

Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Zarządzania



Rozprawa doktorska

**Model ergonomicznego balansowania linii montażowej
w produkcji pojazdów użytkowych**

Autor:

mgr inż. Marek SZKUDLAREK

Promotor:

dr hab. inż. Marcin BUTLEWSKI, prof. PP

Poznań, 2023

Podziękowania

Pragnę serdecznie podziękować Panu Promotorowi, dr hab. inż. Marcinowi Butlewskiemu, prof. PP za opiekę merytoryczną, zaangażowanie oraz życzliwość okazaną w trakcie realizacji rozprawy.

SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE	10
UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU	10
PROBLEM BADAWCZY.....	16
LUKA BADAWCZA	17
ZAKRES I CEL PRACY BADAWCZEJ.....	19
PRZEDMIOT BADAŃ	19
PYTANIA BADAWCZE	20
METODYKA PRACY BADAWCZEJ	20
SŁOWNIK POJĘĆ STOSOWANYCH W ROZPRAWIE	25
1. ISTOTA BALANSOWANIA LINII MONTAŻOWEJ.....	27
1.1. BALANSOWANIE LINII MONTAŻOWEJ	27
1.2. SYSTEM ANALITYCZNY MTM JAKO NARZĘDZIE WSPOMAGAJĄCE BALANSOWANIE LINII MONTAŻOWEJ	53
1.3. MIERNIKI DO OCENY ZBALANSOWANIA LINII MONTAŻOWEJ.....	57
1.4. CZYNNIKI NIEPOŻĄDANE W ORGANIZACJI PRACY LUDZKIEJ NA LINII MONTAŻOWEJ	62
1.5. SPOSOBY PRZEDSTAWIANIA ZBALANSOWANIA LINII NA PRZYKŁADZIE WYKRESÓW YAMAZUMI.....	66
1.6. PROBLEMATYKA ROTACJI PRACOWNIKÓW W ZAGADNIENIU BALANSOWANIA LINII.....	71
PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU PIERWSZEGO.....	77
2. WYBRANE ASPEKTY DO ERGONOMICZNEGO BALANSOWANIA LINII MONTAŻOWYCH.....	78
2.1. ROTACJA NA STANOWISKACH PRACY W KONTEKŚCIE ZMIAN DEMOGRAFICZNYCH	78
2.2. PRZEGLĄD METOD OCENY RYZYKA ERGONOMICZNEGO MOŻLIWYCH DO WYKORZYSTANIA W ZAKRESIE BALANSOWANIA LINII PRODUKCYJNEJ	81
2.3. OCHRONA PRACOWNIKA PRZED NADMIERNYM OBCIĄŻENIEM I UCIAŻLIWOŚCIĄ PRACY.....	89
2.4. ZASTOSOWANIE EGZOSZKIELETÓW I ROBOTÓW W CELU ODCIĄŻENIA UKŁADU MIĘŚNIOWO-SZKIELETOWEGO.....	94
PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU DRUGIEGO	99
3. BADANIA WŁASNE.....	100
3.1. METODYKA BADAŃ.....	100
3.2. BADANIE DOTYCZĄCE ROZRZUTU CZASU	104
3.2.1. Opis i wyniki badań	104
3.2.2. Wnioski z badań	106
3.3. BADANIE DOTYCZĄCE WAŻNOSCI CZYNNIKÓW PODCZAS ERGONOMICZNEGO BALANSOWANIA LINII.....	111
3.3.1. Opis i wyniki badań	111
3.3.2. Wnioski z badań	117
3.4. BADANIE DOTYCZĄCE ROTACJI PRACOWNIKÓW NA LINII MONTAŻOWEJ.....	124
3.4.1. Opis i wyniki badań	124
3.4.2. Wnioski z badań	144

3.5.	BADANIE DOTYCZĄCE ZASTOSOWANIA EGZOSZKIELETÓW	146
3.5.1.	Opis i wyniki badań	146
3.5.2.	Wnioski z badań	149
3.6.	WYWIADY W ZAKRESIE USTALENIA OGRANICZEŃ DO MODELU ERGONOMICZNEGO BALANSOWANIA.....	151
3.6.1.	Opis i wyniki badań	151
3.6.2.	Wnioski z badań	154
3.7.	BADANIE DOTYCZĄCE ZASTOSOWANIA ALGORYTMU ROTACJI PRACOWNIKÓW	155
3.7.1.	Struktura modelu badawczego	155
3.7.2.	Symulacja z zastosowaniem algorytmu rotacji	161
3.7.3.	Wnioski z badań	173
	PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU TRZECIEGO	174
4.	MODEL ERGONOMICZNEGO BALANSOWANIA LINII MONTAŻOWEJ	175
4.1.	ZAŁOŻENIA MODELU	175
4.1.1.	Ogólna koncepcja modelu.....	175
4.1.2.	Etapy postępowania w zastosowaniu modelu	179
4.1.3.	Karty kontrolne do planowania rotacji pracowników	184
4.1.4.	Wskaźnik kompleksowej oceny ergonomiczności.....	186
4.1.5.	Badanie możliwości ponownego podziału czynności montażowych na niezbalansowanej ergonomicznie linii montażowej.....	194
4.2.	WERYFIKACJA MODELU ERGONOMICZNEGO BALANSOWANIA LINII MONTAŻOWEJ.....	196
4.2.1.	Założenia przebiegu procesu weryfikacji	196
4.2.2.	Symulacja drugiego scenariusza ergonomicznej rotacji pracowników	196
4.2.3.	Weryfikacja z zastosowaniem wszystkich kroków modelu	201
	PODSUMOWANIE ROZDZIAŁU CZWARTEGO	203
	PODSUMOWANIE	204
	ZASTOSOWANIE I OGRANICZENIA MODELU	204
	KONCEPCJE INTEGRACJI GRUPY PRACOWNIKÓW Z POWAŻNYMI OGRANICZENIAMI ZDROWOTNYMI	206
	WNIOSKI KOŃCOWE	208
	KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ.....	213
	BIBLIOGRAFIA	216
	SPIS TABEL	237
	SPIS RYSUNKÓW	238
	SPIS WYKRESÓW.....	240
	SPIS ZAŁĄCZNIKÓW	242

STRESZCZENIE

W naukowym i teoretycznym rozumieniu pojęcie „równoważenie linii montażowej” definiuje się jako równomierne rozłożenie operacji pomiędzy stacje robocze linii tak, aby czas przestoju poszczególnych maszyn był minimalny^{1,2}. Natomiast ergonomia jako dyscyplina naukowa zajmująca się warunkami pracy do anatomicznych i psychofizycznych możliwości człowieka jest zwykle pomijana w kontekście procesu równoważenia linii montażowej. Procesy montażu i produkcji nie są jeszcze w pełni zautomatyzowane ze względu na wysokie koszty, w związku z tym nadal wymagają zatrudniania pracowników, których kondycja fizyczna w stosunku do wymagań stanowiska pracy może być różna, a w dłuższej perspektywie pogarszająca się z uwagi na starzenie się społeczeństwa czy też z powodu lekceważenia wymagań ergonomicznych przez organizację. Przedsiębiorstwa na całym świecie nieustannie ze sobą rywalizują, a dzięki efektywnemu planowaniu procesów i produkcji z uwzględnieniem czynników ergonomicznych mogą utrzymać i stale zwiększać swoją konkurencyjność w długim okresie. Niniejsza rozprawa uzupełnia istniejące modele naukowe dotyczące równoważenia linii montażowej o czynniki ergonomiczne, takie jak zrównoważone obciążenie poszczególnych grup mięśni pracowników. Celem zdefiniowanym przez autora jest opracowanie modelu ergonomicznego balansowania linii produkcyjnej przy uwzględnieniu obciążenia i uciążliwości pracy. Dzięki przeprowadzonym studiom literaturowym zidentyfikowano istotną lukę badawczą w zakresie ergonomicznego balansowania linii montażowej i jego oceny. Autor stworzył model koncepcyjny oparty na obiektywnej i subiektywnej ocenie obciążenia biomechanicznego oraz na wcześniejszych wynikach badań. Wspierając się środowiskiem PyCharm Community Edition 2021.3.2, przeniósł model koncepcyjny do narzędzia, tworząc model skomputeryzowany przy użyciu języka programowania Python. W zaprojektowanym modelu programowania liniowego (LP) wykorzystano bibliotekę narzędziową OR-Tools. Zbiera on ograniczenia do spełnienia ergonomicznego balansowania linii i precyzyjnie odpowiada na pytanie, czy istniejące ograniczenia mogą być spełnione i jeśli tak, to podaje przykłady rozwiązania, w jaki sposób pracownicy powinni zmienić swoje stanowiska pracy w ciągu danego tygodnia pracy.

¹ M. E. Salveson, *The assembly line balancing problem*, „The Journal of Industrial Engineering” 1955, vol. 6, s. 18–25.

² A. Scholl, *Balancing and sequencing of assembly lines*, Physica Verlag, Heidelberg 1999.

W pracy doktorskiej zaproponowano autorski model ergonomicznego balansowania linii, który uwzględnia etapy postępowania w celu zrównoważenia linii montażowej. Każdy z nich uwzględnia kryteria ważne dla ochrony pracownika przed nadmiernym obciążeniem i uciążliwością pracy. Stopień ich spełnienia pozwala ocenić wskaźnik zbalansowania linii montażowej.

SUMMARY

In scientific and theoretical terms, the term "assembly line balancing" is defined as the even distribution of operations between the line's workstations so that the downtime of individual machines is minimised^{3,4}. Ergonomics, on the other hand, as a scientific discipline dealing with working conditions to the anatomical and psychophysical capabilities of the human being, is usually neglected in the context of a balanced assembly line. Assembly and production processes are not yet fully automated due to high costs, and therefore still require the employment of workers whose physical condition in relation to the demands of the workplace may be compromised in the long term due to the organisation's disregard for ergonomics. Companies are constantly competing globally, and by effectively planning processes and production with ergonomic factors in mind, they can maintain and continuously improve their competitiveness in the long term. This dissertation complements existing scientific models for assembly line balancing by including ergonomic factors such as the balanced loading of specific muscle groups of workers. The author's defined objective is to develop a model for ergonomic balancing of the production line, taking into account workload and strenuousness.

Through a literature study, important research gaps in the field of assembly line ergonomic compensation and its evaluation were identified. In order to deepen the issue, the author conducted a survey and an expert study using the Delphi method. In further research, he developed a conceptual model based on objective and subjective assessment of biomechanical loading and previous research findings. Supported by the PyCharm Community Edition 2021.3.2 environment, he transferred the conceptual model into a tool, creating a computerised model using the Python programming language. The designed linear programming (LP) model uses the OR-Tools tool library. It collects the constraints to meet ergonomic line balancing and precisely answers the question of whether existing constraints can be met and, if so, gives examples of a solution for how employees should change their workstations during a given week.

In the further part of the research work, a model of ergonomic line balancing was proposed, which considers the stages of proceeding in order to balance the assembly line. Each of them

³ M. E. Salveson, *The assembly line balancing problem*, „The Journal of Industrial Engineering” 1955, vol. 6, s. 18–25.

⁴ A. Scholl, *Balancing and sequencing of assembly lines*, Physica Verlag, Heidelberg 1999.

includes criteria important for protecting the employee against excessive workload and strenuous work. The degree of their fulfillment allows to assess the balance of the assembly line.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Kern der Überlegungen im wissenschaftlich-theoretischen Kontext steht der Begriff „Ausgleich der Montagelinie“, welcher sich durch eine gleichmäßige Aufgabenverteilung und Berücksichtigung von Produktivitätskennzahlen definiert, die Minimierung der Standzeiten der einzelnen Anlagen^{5,6}. Die Ergonomie als wissenschaftliche Disziplin, die sich mit den Arbeitsbedingungen im Hinblick auf die anatomischen und psychophysischen Fähigkeiten des Menschen befasst, wird dagegen im Zusammenhang mit dem Montage Gleichgewicht übergangen. Montage- und Verarbeitungsprozesse können bislang noch nicht vollständig automatisiert werden. Diese Prozesse erfordern weiterhin den Einsatz von Mitarbeitern, deren physische Kondition gegenüber den Anforderungen an ihren Arbeits-platz durch die Missachtung von Ergonomie durch Organisationen langfristig gefährdet werden kann.

Unternehmen befinden sich im stetigen, globalen Wettbewerb und können durch die Implementierung einer effizienten Prozess- und Produktionsplanung unter der Berücksichtigung ergonomischer Indizien ihre Wettbewerbsfähigkeit langfristig halten und kontinuierlich steigern. Diese Dissertation ergänzt existierende wissenschaftliche Modelle, welche den Ausgleich der Montagelinie betreffen, um ergonomische Faktoren wie eine ausgewogene Belastung einzelner Muskelgruppen der Mitarbeiter. Das Ziel des Autors ist die Entwicklung eines Modells für das ergonomische Gleichgewicht der Produktionslinie unter Berücksichtigung von Arbeitsbelastung und Anstrengung. Durch die Literaturstudie wurde eine wichtige Forschungslücke im Bereich der ergonomischen Fließbandkompensation und ihrer Bewertung festgestellt. Der Autor erstellte ein konzeptionelles Modell, das auf der objektiven und subjektiven Bewertung der biomechanischen Belastung und früheren Forschungsergebnissen basiert. Mit Hilfe der PyCharm Community Edition 2021.3.2 übertrug er das konzeptionelle Modell in ein Werkzeug und erstellte ein computergestütztes Modell unter Verwendung der Programmiersprache Python. Im Modell der linearen Programmierung (LP) wurde die OR-Tools-Werkzeugbibliothek angewendet. Es sammelt die Randbedingungen für die Erfüllung des ergonomischen Zeilenausgleichs und beantwortet präzise die Frage, ob die vorhandenen Randbedingungen erfüllt

⁵ M. E. Salveson, *The assembly line balancing problem*, „The Journal of Industrial Engineering“ 1955, vol. 6, s. 18–25.

⁶ A. Scholl, *Balancing and sequencing of assembly lines*, Physica Verlag, Heidelberg 1999.

werden können, und gibt, wenn ja, Beispiele für die Lösung der Frage, wie die Mitarbeiter ihre Arbeitsplätze während einer bestimmten Arbeitswoche wechseln sollten.

In der Dissertation wird ein Modell des ergonomischen Gleichgewichts der Montagelinie vorgeschlagen, welches die Nachbearbeitungsschritte für den Ausgleich eines Fließbandes berücksichtigt. Jeder von ihnen berücksichtigt Kriterien, die wichtig sind, um den Mitarbeiter vor übermäßiger Belastung und anstrengender Arbeit zu schützen. Der Grad ihrer Erfüllung ermöglicht die Bewertung des Auswuchtungsindex des Gleichgewichts der Montagelinie.

Wprowadzenie

Uzasadnienie podjęcia tematu

Pomimo postępu automatyzacji w przemyśle motoryzacyjnym, nadal przez pewien jeszcze czas będą potrzebni pracownicy na liniach produkcyjnych, ponieważ mechanizacja procesów montażowych jest możliwa i opłacalna tylko dla tej ich części, które spełniają odpowiednie właściwości, takie jak moduł sprężystości oraz sztywność zginania⁷. Zautomatyzowana obsługa wiotkich części jest trudna ze względu na różne właściwości materiału w porównaniu do części sztywnych. Wymaga również zastosowania specjalnych chwytaków oraz kosztownych systemów kontroli wizyjnej. Dyskusja na temat automatyzacji montażu nabrała nowego tempa w 2010 roku w momencie pojawienia się lekkich robotów, które mogą być wykorzystane do prac montażowych, ale nadal z bardzo dużymi ograniczeniami, ponieważ są one powolne i mogą pracować w bardzo znormalizowanym i nieelastycznym środowisku⁸. We wzorcowej fabryce Volkswagena w Zwickau, gdzie rozpoczęła się produkcja nowego samochodu elektrycznego ID.3, stopień automatyzacji wynosi 30%⁹, natomiast w nowoczesnych fabrykach samochodów użytkowych stopień automatyzacji wynosi do 20% i przekroczenie tego poziomu będzie wymagało nowych konstrukcji pojazdów. W związku z powyższym około 70-80% procesów montażowych nadal będzie wymagało ludzkiej pracy. Zarządzanie zasobami ludzkimi pełni istotną rolę, a dostrzeżenie deficytu tych zasobów wpisuje się w pierwszy krok planowania strategii organizacji. Do przyczyn megatrendów XXI wieku, z którymi przychodzi zmierzyć się przedsiębiorstwom, można zaliczyć przede wszystkim zmiany demograficzne¹⁰ oraz rosnącą liczbę pracowników z ograniczeniami zdrowotnymi¹¹. W kontekście stale zmieniających się produktów i zadań, nadal wymagana jest ludzka zdolność do obserwowania, decydowania i przyjmowania odpowiednich działań

⁷ J. Trommnau, A. Frommknecht, J. Siegert, J. Wößner, T. Bauernhansl, *Design for Automatic Assembly: A new Approach to Classify Limp Components*, „Procedia CIRP” 2020, 91, s. 49–54.

⁸ S. Pfeiffer, *Produktivkraft konkret. Vom schweren Start der Leichtbauroboter: Marx und die Roboter, Vernetzte Produktion, Künstliche Intelligenz und lebendige Arbeit*, Dietz, Berlin, 2019, s. 156–177.

⁹ G. Bergmann, *Die fragile Zukunft der Automobilindustrie – und was das für Arbeitstätigkeiten und Jobs bedeutet*, 2021,

https://www.hspforzheim.de/fileadmin/user_upload/uploads_redakteur_wirtschaft/Personalmanagement/Personal_Forum/2021/2021_10_28/Automobilindustrie_Personal_Forum_2021.pdf, 28.10.2021.

¹⁰ GUS, 2022. Mały Rocznik Statystyczny Polski 2022, <Główny Urząd Statystyczny/Obszary tematyczne/Roczniki statystyczne/Roczniki Statystyczne/Mały Rocznik Statystyczny Polski 2022>, 13.07.2022.

¹¹ Ch. Casse, M. De Troyer, *Gender, working conditions and health. What has changed?* <https://www.etui.org/sites/default/files/2021-05/Gender%2C%20working%20conditions%20and%20health-What%20has%20changed-2021-web.pdf>, 10.05.2021.

w przeciągu kilku sekund. W związku z tym pracownicy są i będą nadal narażeni na działanie czynników materialnego środowiska pracy (temperatura, hałas) oraz czynników techniczno-organizacyjnych (siły, ciężary, niekorzystna pozycja ciała).

Biorąc pod uwagę specyfikę przemysłowych systemów produkcyjnych, należy podkreślić szczególne znaczenie tzw. czynnika ludzkiego. Przy projektowaniu miejsc pracy w sposób priorytetowy traktuje się dobre samopoczucie pracowników, na co wskazuje jeden z celów Agendy 2030 na rzecz zrównoważonego rozwoju¹² – promowanie bezpiecznego, ergonomicznego środowiska pracy¹³. Taki stan rzeczy jest spowodowany kilkoma aspektami. Wśród nich należy wyróżnić zarówno czynniki ściśle związane z ochroną bezpieczeństwa oraz zdrowia zatrudnionych osób, jak i wymiar ekonomiczny. Drugi z wymienionych aspektów dotyczy nie tylko kosztów ewentualnego leczenia wynikającego z poszczególnych urazów o charakterze psychicznym bądź fizycznym, ale także kosztów absencji personelu. Na szczególną uwagę zasługuje również potencjalny spadek produktywności spowodowany zastąpieniem tychże pracowników przez niedoświadczone osoby¹⁴.

Ze względu na liczbę pracowników zaangażowanych w przemysł wytwórczy przy poszczególnych procesach należy skupić się na montażu, w którym obecnie odnotowuje się największy odsetek zatrudnionych w branży motoryzacyjnej. W Europie najwięcej jest osób zatrudnionych bezpośrednio w sektorze automotive pracuje w Niemczech, bo aż 916 tys. Na drugim miejscu jest Francja z 232 tys. miejsc pracy, a na trzecim miejscu plasuje się Polska (224 tys.). Fabryki odpowiadają za ok. 20% zatrudnienia w całym sektorze automotive¹⁵.

Pracownicy wykonujący czynności montażu mogą odczuwać fizyczne i energetyczne obciążenie spowodowane manualnym wykonywaniem powtarzalnych ruchów oraz manipulowaniem częstokroć ciężkimi elementami¹⁶. W związku z powyższym wśród czynników determinujących efektywność procesu montażu należy niewątpliwie wyszczególnić

¹² *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*, <https://sdgs.un.org/2030agenda>, 27.09.2015.

¹³ M. Golan, Y. Cohen, G. Singer, *A framework for operator – workstation interaction in Industry 4.0*, „International Journal of Production Research” 2020, 58 (8), s. 2421–2432.

¹⁴ Y. Bukchin, Y. Cohen, *Minimising throughput loss in assembly lines due to absenteeism and turnover via work-sharing*, „International Journal of Production Research” 2013, 51(20), s. 6140–6151.

¹⁵ *Polska w czołowie branży automotive*, 2022, <https://www.goldenline.pl/centrumkariery/polska-w-czolowce-branzy-automotive>, 27.06.2022.

¹⁶ A. Baykasoglu, S. O. Tasan, A. S. Tasan, S. D. Akyol, *Modeling and solving assembly line design problems by considering human factors with a real-life application*, „Hum. Fact. Ergon. Manuf. Serv. Ind.” 2017, 27 (2), s. 96–115.

ergonomiczność zaprojektowanych linii montażowych¹⁷. W tym celu zastosowanie znajduje szereg rozwiązań technologicznych oraz strategii organizacyjnych, których wybór uwzględnia aspekty różnicujące możliwości fizyczne zatrudnionych osób, w tym cechy fizjologiczne i osobowe (np. wiek, płeć) poszczególnych pracowników¹⁸.

Dokonując przeglądu literatury przedmiotu, odnotować można wielokierunkowość badań nad funkcjonalnością systemów montażowych. Jednym z takich aspektów jest zmniejszenie ryzyka ergonomicznego przy jednoczesnym wzięciu pod uwagę przyjmowanej pozycji pracy pracownika¹⁹. Jako przykład takich badań może posłużyć unikanie zaburzeń układu mięśniowo-szkieletowego człowieka. Kontuzje, czy nawet choroby zawodowe mogą być spowodowane realizowaniem zadań w niewygodnych pozycjach, które wymagają wykonywania niekomfortowych ruchów, a można ich uniknąć już w momencie projektowania systemów montażowych²⁰. Wspomniane badanie skupia się nad wpływem ergonomiczności na produktywność. Ściślej ujmując: zostało udowodnione, iż ulepszenia w tym zakresie znacząco wpływają na poprawę komfortu pracy na stanowiskach montażowych.

Aby zoptymalizować obciążenie stanowisk pracy, utrzymać wysoki poziom zdrowia pracowników oraz zachować wysoką produktywność, należy zwrócić szczególną uwagę na proergonomiczne równoważenie linii produkcyjnej²¹. Przed uzyskaniem produktu końcowego należy bowiem wykonać szereg zadań na linii. Niemniej warto skupić się na ustanowieniu tzw. serii ograniczeń pierwszeństwa, czyli konieczności wykonania poszczególnych zadań w odpowiednim odstępie czasowym przed innymi²².

Niniejsza praca poświęcona jest problematyce ergonomicznego balansowania linii montażowych w produkcji, gdzie dotychczas istniejące systemy wspomaganie równoważenia

¹⁷ G. Michalos, A. Karvouniari, N. Dimitropoulos, T. Togias, S. Makris, *Workplace analysis and design using virtual reality techniques*, „CIRP Ann-Manuf Technol” 2018, 67 (1), s. 141–144.

¹⁸ M. Dalle Mura, G. Dini, *Job rotation and human–robot collaboration for enhancing ergonomics in assembly lines by a genetic algorithm*, „Int. J. Adv. Manuf. Technol.” 2022, 118, s. 2901–2914.

¹⁹ A. Otto, O. Battaia, *Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: a survey*, „Computers & Industrial Engineering” 2017, 111, s. 467–480.

²⁰ D. Battini, M. Faccio, A. Persona, F. Sgarbossa, *New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design*, „International Journal of Industrial Ergonomics” 2011, 41 (1), s. 30–42.

²¹ J. Mukund Nilakantan, S.G. Ponnambalam, P. Nielsen, *Chapter 13 – Application of Particle Swarm Optimization to Solve Robotic Assembly Line Balancing Problems*, https://www.researchgate.net/publication/318644692_Chapter_13_Application_of_Particle_Swarm_Optimization_to_Solve_Robotic_Assembly_Line_Balancing_Problems, 1.01.2017; P. Samui, S. Sekhar, V. E. Balas, *Handbook of Neural Computation*, „Academic Press” 2017, s. 239–267.

²² M. Suszyński. *Mechanical Assembly Sequence Determination Using Artificial Neural Networks Based on Selected DFA Rating Factors*, „Symmetry” 2022, vol. 14, nr 5, s. 1013–1–1013–13.

pracy nie sprawdzają się, ponieważ nie uwzględniają indywidualnego podejścia do pracownika i obciążenia poszczególnych partii mięśni. Przykładem takiej produkcji jest branża pojazdów użytkowych, gdzie wstępują znacznie dłuższe czasy taktów i wyższa wariantowość w porównaniu do produkcji samochodów osobowych.

Opracowany model ma mieć wymiar praktyczny – uwzględnia on zagadnienia ergonomiczne na wszystkich etapach przygotowania procesów produkcyjnych oraz w produkcji bieżącej. Zastosowanie modelu przez przedsiębiorstwa produkcyjne poprawia wizerunek firmy przez pryzmat zarządzania zasobami ludzkimi. Praca obejmuje wiedzę z obszaru nauk społecznych w dyscyplinie naukowej nauki o zarządzaniu i jakości.

Przesłanki do podjęcia tematu:

Poniżej przedstawiono najważniejsze przesłanki do podjęcia tematu dysertacji i zadania, z którymi zmagają się obecnie przemysł branży automotive:

- Zarządzanie kapitałem ludzkim pełni istotną rolę i będzie tak, dopóki potrzebni będą jacykolwiek pracownicy na liniach produkcyjnych. Zdrowie i bezpieczne środowisko pracy jest integralną częścią zarządzania przedsiębiorstwem²³. Piąta rewolucja przemysłowa przywraca znaczenie aspektu ludzkiego w produkcji²⁴. W przemyśle 5.0 istotną rolę odgrywać będą obszary społeczne, takie jak: bezpieczeństwo pracy, ergonomiczne warunki pracy, zróżnicowane i zajęcia stymulujące poznawczo²⁵.
- Starzenie się społeczeństwa jest długoterminowym globalnym trendem, który rozpoczął się kilkadziesiąt lat temu i stał się szczególnie widoczny w Europie. Tendencja ta jest widoczna w zmieniającej się strukturze wiekowej ludności, ponieważ odsetek osób starszych rośnie, podczas gdy odsetek osób w wieku produkcyjnym maleje²⁶. Z uwagi na starzejące się społeczeństwa przedsiębiorstwa z całego świata będą zmuszone zatrudniać coraz starszych

²³ I. Gabryelewicz, J. Sadłowska-Wrzesińska, *Problemy z zakresu bezpieczeństwa pracy w MMŚP na przykładzie badania poziomu kultury bezpieczeństwa w firmie rodzinnej*, 2016, wersja elektroniczna publikacji jest wersją podstawową, <http://bazekon.icm.edu.pl/bazekon/element/bwmeta1.element.ekon-element-000171487081>, 18.01.2016.

²⁴ J. Pizoń, J., A. Gola, *Human–Machine Relationship – Perspective and Future Roadmap for Industry 5.0 Solutions*, „Machines” 2023, 11 (2), s. 203.

²⁵ B. Friedman, D. G. Hendry, *Value Sensitive Design: Shaping Technology with Moral Imagination*, 2019.

²⁶ K. Halicka, *Humanoidy poprawiające jakość życia osób starszych: przypadek Polski*, [w]: K. Arai, *Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC)*, Volume 3. FTC 2022, notatki z wykładów w Networks and Systems, tom 561.

pracowników, reprezentantów różnych generacji, płci i pochodzenia, a także osoby z niepełnosprawnościami²⁷. Dostrzeżenie deficytu zasobów ludzkich wpisuje się w pierwszy krok planowania strategii organizacji²⁸.

- Za podjęciem pracy przemawiają następujące fakty dotyczące niepełnosprawności w UE²⁹:
 - 17,9% osób z niepełnosprawnościami w EU mieści się w przedziale wiekowym 16–65 lat.
 - 87 milionów Europejczyków zmaga się z jakąś formą niepełnosprawności.
 - Zatrudnienie ma 50% osób z niepełnosprawnościami w wieku produkcyjnym.
 - Ochrona praw osób z niepełnosprawnościami to jeden z priorytetów UE.
- 37,7% przypadków chorób zawodowych jest związanych z powtarzalnością ruchów lub/i znacznymi obciążeniami³⁰.
- Gałąź przemysłu samochodowego jest istotna dla gospodarki Polski. Polska jest w pierwszej trójce w Europie pod względem zatrudnienia w sektorze automotive (224 tys. osób). Ponad 12,7 mln osób w Unii Europejskiej jest zatrudnionych bezpośrednio lub pośrednio w sektorze automotive³¹.
- Przemysł automotive stosuje głównie metodę MTM EAWS do prognozowania, oceniania i redukcji obciążeń biomechanicznych na stanowisku pracy. Metoda nie uwzględnia indywidualnych dolegliwości układu mięśniowo-szkieletowego pracowników (opiera się na wartościach porównawczych i standardowych danych).
- Rosnąca liczba pracowników z ograniczeniami³², które są spowodowane chorobami zawodowymi wynikającymi z ciężkiej pracy i nieergonomicznych stanowisk na liniach montażowych. Rozpoznanie choroby zawodowej u pracownika lub byłego pracownika może nastąpić w okresie jego zatrudnienia w narażeniu zawodowym albo po zakończeniu pracy w takim narażeniu, pod warunkiem wystąpienia udokumentowanych objawów

²⁷ Jak robot ułatwi życie osobom starszym i niepełnosprawnym?, <https://www.pw.edu.pl/Badania-i-nauka/Badania-Innowacje-Technologie-BIT-PW/Jak-robot-ulatwi-zycie-osobom-starszym-i-niepelnosprawnym>, 28.10.2016.

²⁸ A. Walaszczyk, M. Koszewska, *Zarządzanie przedsiębiorstwem wobec współczesnych wyzwań technologicznych, społecznych i środowiskowych*, Łódź 2021.

²⁹ Niepełnosprawność w UE: fakty i liczby – infografika, <https://www.consilium.europa.eu/pl/infographics/disability-eu-facts-figures/>, 4.07.2022.

³⁰ Polskie Stowarzyszenie MTM, MTM-1, 2017, *Rozwój historyczny Systemu Podstawowego MTM aż po System Bloków Procesu MTM*, 9.10.2017, Wrocław.

³¹ Trudna przyszłość branży moto w Polsce, <https://filarybiznesu.pl/trudna-przyszlosc-branzy-moto-w-polsce/a15584>, 7.06.2022.

³² Ch. Casse, M. De Troyer, op. cit.

chorobowych w okresie ustalonym w wykazie chorób zawodowych³³. Medycyna pracy zajmuje się wpływem wszelkiego rodzaju pracy na zdrowie oraz wpływem zdrowia na zdolność i wydajność pracownika. Pracownicy linii montażowych należą do tej kategorii ze względu na szybko poruszające się maszyny i podnoszenie ciężkich przedmiotów oraz długie godziny pracy. Są oni narażeni na powtarzające się urazy stresowe i choroby zawodowe, takie jak cieśń nadgarstka lub zapalenie stawu z powodu powtarzalnego ruchu potrzebnego na co dzień. Przypadki te wydają się być bardziej skomplikowane, ponieważ są stopniowymi urazami, które pojawiają się z biegiem czasu. Inne urazy, których często doświadczają pracownicy linii montażowych, to nadwyrężenia i skręcenia spowodowane dźwiganiem ciężkich przedmiotów. Naciągnięcia i skręcenia są w rzeczywistości najczęstszymi obrażeniami związanymi z pracą i stanowią 30% wszystkich roszczeń odszkodowawczych dla pracowników³⁴. Te urazy mogą być łatwiejsze do ustalenia w porównaniu z urazami związanymi z powtarzającym się stresem. Równie ważne jest ich zgłaszanie i wnioskowanie o leczenie. Pracownicy linii montażowych są narażeni na wysokie ryzyko obrażeń podczas obsługi maszyn używanych w fabrykach. Możliwe jest wystąpienie poważnych urazów nawet w wyniku użytkowania maszyny zgodnie z zaleceniami (pracownicy linii montażowych są narażeni na wysokie ryzyko uszkodzenia kończyn podczas obsługi szybko poruszających się maszyn). Choroby zawodowe układu mięśniowo-szkieletowego i obwodowego układu nerwowego zaliczane są do chorób mikrourazowych skumulowanych przeciążeniowych będących wynikiem przewlekłego przeciążenia i/lub uszkodzenia określonych struktur nerwowo-mięśniowo-szkieletowych. Predysponujące do nich czynności zawodowe charakteryzują się monotypią (powtarzanie ruchów przez znaczną część zmiany roboczej). Szczegółowa analiza narażenia zawodowego oraz wywiad lekarski z indywidualnym podejściem diagnostycznym pozwalają określić zawodową etiologię chorób, niezależnie od pozazawodowych czynników ryzyka w niektórych przypadkach, nawet jeśli stanowisko pracy nie było powszechne. Trudności w oszacowaniu prawdopodobieństwa wywołania procesu chorobowego na tle narażenia zawodowego spowodowane są częstym współwystępowaniem pozazawodowych czynników ryzyka. Dwupoziomowy system

³³ Dz. U. 2020.1320 z dnia 2020.07.30 Art. 2352, Rozdział VII – Wypadki przy pracy i choroby zawodowe.

³⁴ *Assembly Lines Lead to Injury*, <https://thehwlawfirm.com/2020/04/07/assembly-line-workers-comp>, 7.04.2020.

certyfikacji zapewnia niezależną ocenę historii medycznej i narażenia zawodowego³⁵. Chorobom zawodowym zasadniczo można zapobiegać i można je przypisać nieprawidłowym warunkom pracy³⁶. Kontrola zagrożeń dla zdrowia w miejscu pracy zmniejsza częstość występowania chorób i wypadków związanych z pracą oraz poprawia zdrowie i morale siły roboczej, prowadząc do zmniejszenia absencji i zwiększenia wydajności pracowników. W większości przypadków korzyści moralne i ekonomiczne znacznie przewyższają koszty eliminacji zagrożeń zawodowych.

Problem badawczy

Wobec wcześniej przedstawionych założeń pracy dotyczących modelu balansowania linii montażowej dostrzega się następujące problemy badawcze:

- brak modeli balansowania linii montażowej dostosowanych do specyfiki pojazdów użytkowych,
- niewystarczające praktyczne modele równoważenia linii montażowej, które uwzględniałyby indywidualne podejście do pracownika i obciążenie poszczególnych partii mięśni,
- brak informacji w zakresie ważności czynników podczas ergonomicznego balansowania linii montażowej oraz projektowania rotacji pracowników.

W trakcie realizacji pracy istotnymi kwestiami okazały się również inne problemy badawcze, które nie są bezpośrednio związane z przedmiotem rozprawy. Wśród tych zagadnień wyróżnia się:

- brak opisanego sposobu uwzględniania egzoszkieletów w modelach ergonomicznego balansowania,
- niewystarczające modele rotacji dla pracowników o ograniczonej sprawności lub ograniczeniach w zakresie wykonywania określonych prac.

³⁵ M. Najder-Gawlik, M. Wiszniewska, A. Lipińska-Ojrzanowska, *A dancer, a groomer, a folk artist and a viola player – case reports of occupational musculoskeletal and peripheral nervous system diseases*, „Medycyna Pracy” 2022, 73 (1), s. 71–78.

³⁶ D. Mnerie, A. Patalau, A. F. Szasz, D. E. Popet, G. Mnerie, *Elements of optimization of the visual signaling of safety and health in the workplace, in the prophylaxis of occupational diseases*, http://www.rizik.vtsns.edu.rs/RSE_2020/radovi/01/RIZIK_01_8.pdf, 16.01.2020.

Luka badawcza

W literaturze można spotkać wiele badań, które podejmują znaczenie i rolę materialnego środowiska pracy takiego jak hałas, drgania mechaniczne, oświetlenie, promieniowanie, mikroklimat, szkodliwe gazy, pyły i opary:

- Lean i środowisko pracy³⁷.
- Zagrożenia hałasem na stanowiskach pracy w Polsce i innych państwach unii europejskiej³⁸.
- Funkcjonowanie człowieka w środowisku pracy-wybrane aspekty³⁹.

Znacznie rzadziej w literaturze przedmiotu podejmowany jest temat odnoszący się do ergonomicznego balansowania linii montażowej w kontekście zarówno utrzymania wysokiej produktywności, jak i dbałości o zdrowie pracowników. Mając powyższe na uwadze, autor dostrzegł w tym aspekcie **lukę badawczą**, która jego zdaniem wymaga uzupełnienia. Wnikliwa analiza dostępnych w literaturze dotychczasowych badań na temat balansowania linii montażowych⁴⁰ wskazuje, że nie omawiają one szczegółowo tematów dotyczących aspektów ergonomii. Z ekonomicznego i ergonomicznego punktu widzenia często argumentuje się, że względy ergonomiczne powinny być uwzględniane w procesach planowania, ale w praktyce rzadko ma to miejsce⁴¹.

W procesie analizy literatury i wnioskowania ustalono, że w obszarze balansowania linii montażowej występuje następująca luka badawcza: **Brak propozycji modeli ergonomicznego balansowania linii produkcyjnej w produkcji pojazdów użytkowych ze szczególnym**

³⁷ P. Hasle, A. Bojesen, P. Jensen, P. Bramming, *Lean and the working environment: a review of the literature*, „International Journal of Operations & Production Management” 2012, 32.7, s. 829–849.

³⁸ D. Augustyńska, D. Pleban, J. Radosz, *Zagrożenia hałasem na stanowiskach pracy w Polsce i innych państwach Unii Europejskiej*, „Medycyna Pracy” 2012, 63(6), s. 689–700.

³⁹ M. Korulczyk, *Funkcjonowanie człowieka w środowisku pracy – wybrane aspekty*, „Postępy Nauki i Techniki” 2011, (8), s. 218–225.

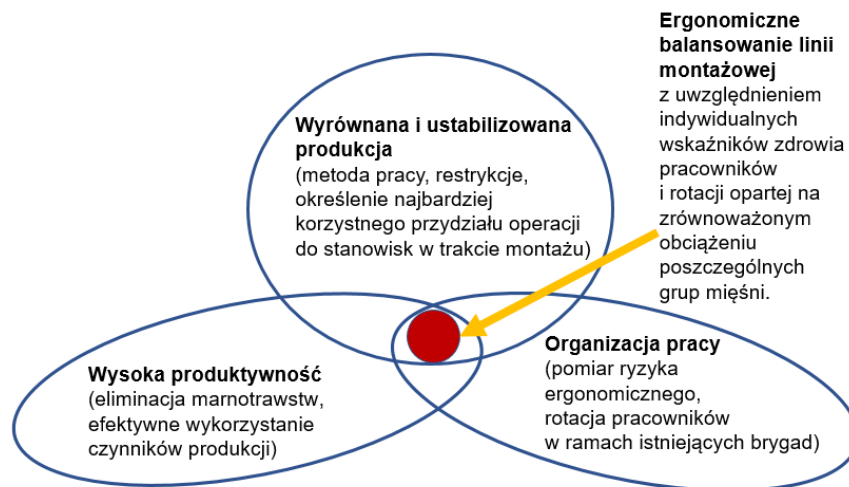
⁴⁰ O. Battai'a, A. Dolgui, *A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches*, „International Journal of Production Economics” 2013, 142, s. 259–277; C. Becker, A. Scholl, *A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing*, „European Journal of Operational Research” 2006, 168, s. 694–715; N. Boysen, M. Fliedner, A. Scholl, *A classification of assembly line balancing problems*, „European Journal of Operational Research” 2007, 183, s. 674–693; N. Boysen, M. Fliedner, A. Scholl, *Assembly line balancing: Which model to use when?*, „International Journal of Production Economics” 2008, III, s. 509–528; A. Scholl, *Balancing and sequencing of assembly lines*, Physica-Verlag, Heidelberg 1999; A. Scholl, C. Becker, *State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing*, „European Journal of Operational Research” 2006, 168, s. 666–693.

⁴¹ P. L. Jensen, *Human factors and ergonomics in the planning of production*, „International Journal of Industrial Ergonomics” 2002, 29, s. 121–131; W. P. Neumann, J. Village, *Ergonomics actions research II: A framework for integrating HF into work system design*, „Ergonomics” 2012, 55, s. 1140–1156.

uwzględnieniem indywidualnych wskaźników zdrowia pracowników i rotacji opartej na zrównoważonym obciążeniu poszczególnych grup mięśni. Wskazuje się, że opracowanie takiej metody w znaczący sposób może przyczynić się do wzrostu efektywności pracy i jej bezpieczeństwa.

Ze względu na wysoką wariantowość produkcji pojazdów użytkowych, nie każda operacja wymaga jednakowych ruchów oraz wysiłku fizycznego. Nie wszystkie stanowiska pracy na linii montażowej powodują jednakowe obciążenie układu mięśniowo-szkieletowego ze względu na specyfikę zabudowy części. Przykładem są pracownicy działający w obszarze komory silnika, którzy narażeni są na wysokie obciążenia palców podczas montażu opaski zaciskowej. Palce narażone są również na działanie wysokich sił podczas montażu tapicerki wewnątrz auta. Wszystkie czynności wykonywane w obszarze podwozia (pod autem) wymagają pracy z rękoma podniesionymi nad linią barków. W związku z tym w pierwszej kolejności należy wyrównać czasy wykonywania poszczególnych czynności na stanowiskach pracy tak, by pomimo wysokiej wariantowości stanowiska były w miarę możliwości równo obciążone pod względem czasu. Następnie pozostaje tak zaplanować rotacje pracowników, aby nie obciążać podczas dnia roboczego tych samych partii mięśni.

Podejmowany obszar ergonomicznego balansowania linii montażowej można umiejscowić na styku trzech ważnych obszarów takich jak: zapewnienie wyrównanej i ustabilizowanej produkcji, utrzymaniu wysokiej produktywności i organizacji pracy, która uwzględni ochronę pracownika przed nadmiernym obciążeniem i uciążliwością pracy (Rysunek 1).



Rysunek 1. Umieszczenie luki badawczej w analizowanych zagadnieniach. Źródło: opracowanie własne.

Zakres i cel pracy badawczej

W wyniku analizy zakresów pracy badawczej oraz wcześniej zdefiniowanej luki badawczej autor definiuje następujący cel dysertacji: **Opracowanie modelu ergonomicznego balansowania linii produkcyjnej przy uwzględnieniu obciążenia i uciążliwości pracy.** Cel rozprawy osiągnięto realizując poszczególne zadania szczegółowe:

- Ustalenie ważności czynników podczas balansowania linii montażowej i przy projektowaniu rotacji.
- Opracowanie koncepcji dotyczących integracji grupy pracowników z ograniczeniami zdrowotnymi.
- Opracowanie algorytmu rotacji pracowników z uwzględnieniem obciążenia poszczególnych partii mięśni.
- Badanie możliwości ponownego podziału czynności montażowych na niezbalansowanej ergonomicznie linii montażowej.
- Zbadanie przydatności i akceptowalności środków techniki przez pracowników produkcji.

Przedmiot badań

Przedmiotem badań jest proces balansowania linii montażowej samochodów użytkowych ze szczególnym uwzględnieniem ochrony pracownika przed obciążeniem i uciążliwością pracy.

Rozwijając ujęcie przedmiotu badań przyjęto następujące rozumienie pojęć:

Obciążenie pracą to ogół dających się ustalić wpływów działających na człowieka w systemie pracy (DIN 33 400). Można je opisać poprzez rodzaj, wysokość, czas trwania kolejność i przemieszczanie obciążeń podczas jednej zmiany⁴².

Uciążliwość pracy jest indywidualnym skutkiem, jaki w wyniku obciążenia pracą powstaje u człowieka w zależności od jego cech i zdolności (DIN 33 400). Skutki uciążliwości aktywnością zawodową zależą od wydajności i cech człowieka⁴³.

⁴² REFA Group, 2003, Standardowo metody organizacji. Moduł 3210336, s. 2, 15.04.2008, Poznań.

⁴³ REFA Group, 2003, Standardowe metody organizacji. Moduł 3210336, s. 4, 15.04.2008, Poznań.

Pytania badawcze

W celu przeprowadzenia analizy problemu i odpowiedniego przygotowania procesu badawczego przeprowadzono przegląd i krytyczną analizę literatury, które doprowadziły do sformułowania pytań badawczych:

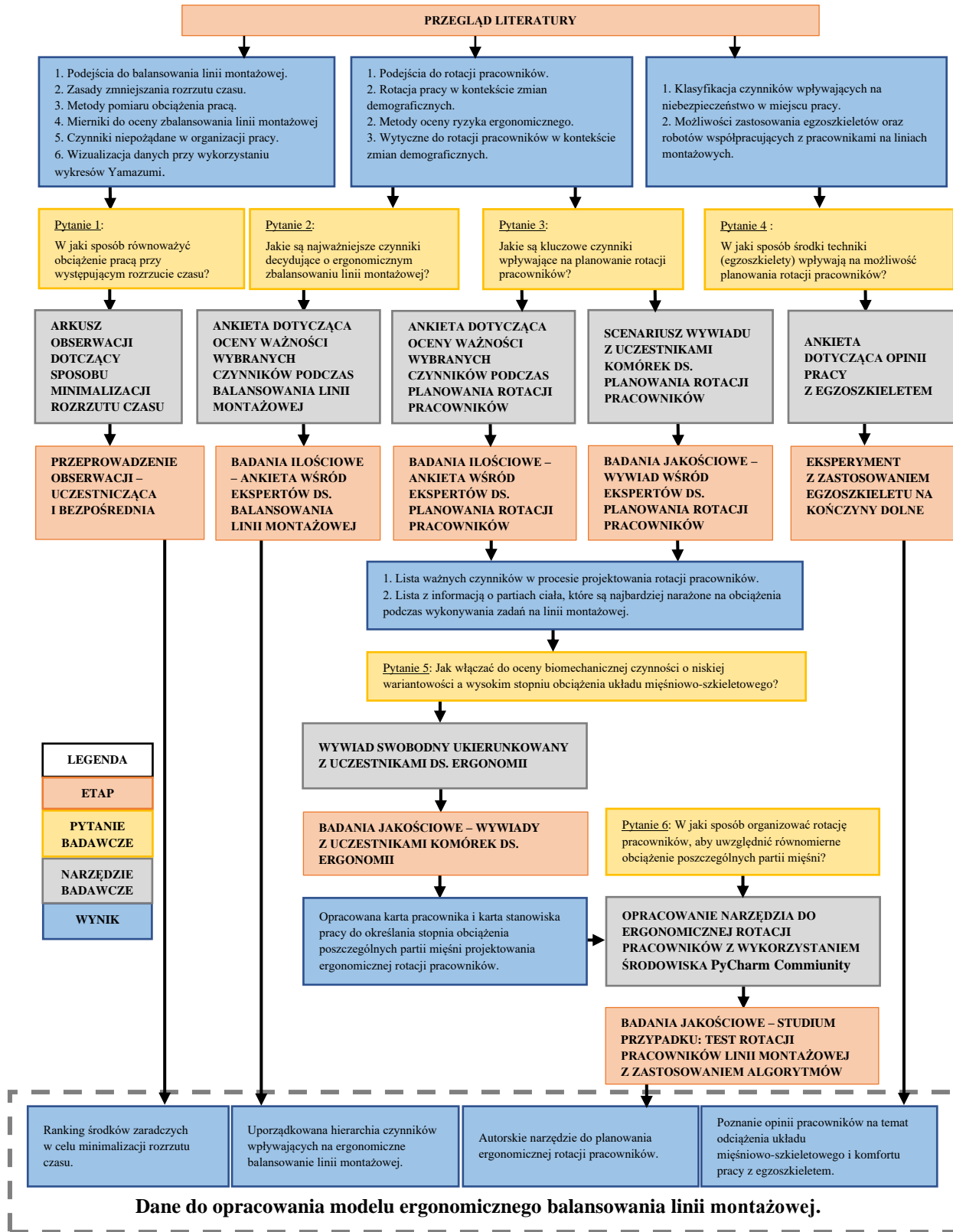
1. W jaki sposób równoważyć obciążenie pracą przy występującym rozrzucie czasu?
2. Jakie są najważniejsze czynniki decydujące o ergonomicznym zbalansowaniu linii montażowej?
3. Jakie są kluczowe czynniki wpływające na planowanie rotacji pracowników?
4. W jaki sposób środki techniki (egzoszkielety) wpływają na możliwość planowania rotacji pracowników?
5. Jak włączyć do oceny biomechanicznej czynności o niskiej wariantowości a wysokim stopniu obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego?
6. W jaki sposób organizować rotację pracowników, aby uwzględnić równomierne obciążenie poszczególnych partii mięśni?

Metodyka pracy badawczej

By odpowiedzieć na zadane pytania badawcze, a tym samym uzupełnić lukę badawczą, dokonano analizy literatury naukowej w zakresie metod balansowania linii montażowej, metod pomiaru obciążenia pracą, metod oceny ryzyka ergonomicznego, organizacji rotacji pracowników, środków techniki, które skutecznie odciążają pracę mięśni.

W realizacji badań własnych wykorzystano następujące metody badawcze: obserwacja uczestnicząca i bezpośrednia, badanie ankietowe wśród pracowników ds. planowania rotacji pracowników, ekspertów ds. balansowania linii montażowych, eksperymenty z zastosowaniem egzoszkieletów na kończyny dolne, wywiady z uczestnikami komórek ds. ergonomii oraz studium przypadku, w którym testowano rotację pracowników z zastosowaniem algorytmów. Zrealizowane zadania zostały przedstawione schematycznie na Rysunku 2.

Model ergonomicznego balansowania linii montażowej w produkcji pojazdów użytkowych



Rysunek 2. Schemat badawczy. Źródło: opracowanie własne.

Struktura realizacji pracy

Na **wstępie** zaprezentowano tematykę realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej. Autor przedstawił powody podjęcia tematu pracy oraz zidentyfikowaną lukę badawczą, a także przedmiot, problem badawczy, pytania badawcze i cel pracy.

W **pierwszym rozdziale** przedstawiono teoretyczne podstawy analizowanego problemu. Uwzględniono przegląd literatury dotyczący balansowania linii montażowej w odniesieniu do przedsiębiorstw produkcyjnych oraz podejścia do minimalizacji rozrzutu czasu. Następnie autor porusza problem ergonomii i czynnika ludzkiego w projektowaniu rotacji pracowników. Scharakteryzowana została metoda MTM oraz zastosowanie wykresów Yamazumi, które często są stosowane w produkcji samochodów użytkowych.

W **rozdziale drugim** zebrano zidentyfikowane aspekty ergonomicznego balansowania linii montażowej. Wskazano czynniki występujące w miejscu pracy związane z przedmiotem podejmowanego zagadnienia. Przedstawiono podejście do rotacji w pracy w kontekście zmian demograficznych. Kolejne podrozdziały dotyczą kultury bezpieczeństwa w przedsiębiorstwach produkcyjnych w kontekście wspomaganie pracownika środkami techniki.

W **rozdziale trzecim** autor przedstawił wyniki badań własnych, jakościowych i ilościowych, przeprowadzonych w grupie ekspertów oraz na podstawie badań ankietowych, obserwacji, eksperymentu oraz studium przypadku. W rozdziale tym przedstawiono wyniki wnikliwej analizy sytuacji kilku przedsiębiorstw produkcyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem wszystkich aspektów niezbędnych do realizacji celu badawczego, jakim jest opracowanie modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej. W tym celu przeprowadzono także dwa badania z ekspertami w oparciu o arkusz ankiety:

- Badanie ważności czynników mających wpływ na ergonomiczne balansowanie linii montażowej. Wzięło w nim udział 23 ekspertów ds. projektowania i balansowania linii produkcyjnej (pracownicy koncernu Volkswagen AG).
- W drugim badaniu oceniano ważność czynników podczas ustalania rotacji pracowników. Wzięło w nim udział 27 ekspertów ds. projektowania rotacji (pracownicy firmy Volkswagen Group Services GmbH).

W rozdziale tym także przedstawiono badania fokusowe dotyczące uwzględnianych czynników ergonomicznych podczas balansowania linii montażowej. W tym zakresie przeprowadzono

wywiady z ekspertami ds. zdrowia (4 ergonomistów, 3 fizjoterapeutów, 2 lekarzy medycyny pracy), z którymi omówiono założenia modelu oraz wytyczne do ergonomicznego projektowania rotacji pracowników. Przeprowadzono również wywiady z ekspertami ds. projektowania rotacji w celu uwzględniania ich opinii i uwag w algorytmie do planowania ergonomicznej rotacji pracowników.

Eksperyment z zastosowaniem egzoszkieletu pozwolił na analizę wpływu zasobów technicznych na poziom optymalnego ergonomicznego balansowania linii, w tym ocenę możliwości wprowadzenia egzoszkieleatów w kontekście możliwości włączenia do rotacji pracowników z ograniczeniami zdrowotnymi. Na linii produkcyjnej testowano zastosowanie pasywnego egzoszkieletu na kończyny dolne typu Chairless Chair.

W ramach realizacji pracy została zaprojektowana również wirtualna linii montażowa do przeprowadzania badań symulacyjnych. Wspierając się środowiskiem PyCharm Community Edition 2021.3.2, autor przeniósł model koncepcyjny do narzędzia, tworząc jednocześnie model skomputeryzowany przy użyciu języka programowania Python. W przeprowadzonych eksperymentach badano wpływ zaprojektowanego narzędzia zmniejszającego obciążenie fizyczne pracowników.

Wnioski z przeprowadzonych badań posłużyły autorowi do opracowania modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej, którego założenia przedstawiono w **rozdziale czwartym**. Wskazano etapy zadań do realizacji zaproponowanego modelu oraz wnioski z jego implementacji na wybranym przykładzie. Każdy z etapów (w zaproponowanym modelu) uwzględnia kryteria ważne dla ochrony pracownika przed nadmiernym obciążeniem i uciążliwością pracy. Stopień ich spełnienia pozwala ocenić wskaźnik zbalansowania linii montażowej.

W **ostatniej części** dysertacji autor przedstawia możliwości dalszego rozwoju zaproponowanego modelu, rozważa możliwości jego aplikacji w różnych przedsiębiorstwach, wskazuje również kierunki dalszych badań w zakresie wdrażania modelu oraz podsumowuje rozprawę. Struktura realizacji pracy badawczej wraz z poszczególnymi etapami przedstawiona jest na Rysunku 3.

	WPROWADZENIE	CZĘŚĆ TEORETYCZNA		CZĘŚĆ PRAKTYCZNA		CZĘŚĆ KOŃCOWA
Etapy	Etap 1 Wprowadzenie	Etap 2 Rozdział 1 Balansowanie linii montażowej	Etap 3 Rozdział 2 Wybrane aspekty ergonomicznego balansowania linii	Etap 4 Rozdział 3 Badania własne	Etap 5 Rozdział 4 Model ergonomicznego balansowania linii montażowej	Etap 6 Podsumowanie i przyszłe kierunki rozwoju
	Przedstawienie tematyki rozprawy; uzasadnienie podjęcia tematu	Prezentacja koncepcji balansowania linii montażowej	Przedstawienie podejścia do rotacji pracy w kontekście zmian demograficznych	Przedstawienie metod badawczych	Prezentacja opracowanego modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej	Wskazanie możliwości zastosowania modelu
	Charakterystyka luki badawczej	Przedstawienie podejścia do minimalizacji rozrzutu czasu	Wskazanie czynników występujących w miejscu pracy	Charakterystyka badań	Zaprezentowanie etapów, które należy przeprowadzić w celu dokonania oceny ergonomicznego zbalansowania linii	Wnioski z przeprowadzonych badań oraz w odniesieniu do całości rozprawy
	Wskazanie celów rozprawy, problemu badawczego, przedmiotu badań i pytań badawczych	Przedstawienie podejścia do produktywności procesu produkcyjnego oraz eliminacji marnotrawstw	Charakterystyka metod oceny ryzyka ergonomicznego	Zaprojektowanie wirtualnej linii do prowadzenia symulacji	Wnioski z weryfikacji modelu	Wskazanie dalszych kierunków rozwoju modelu
	Charakterystyka metody MTM oraz wykresów Yamazumi	Prezentacja koncepcji pracy z egzoszkieletemi i robotami HCR	Prezentacja wyników badań			
	Przedstawienie podejścia do metod rotacji pracowników		Wnioski			

Rysunek 3. Struktura realizacji rozprawy. Źródło: opracowanie własne.

Słownik pojęć stosowanych w rozprawie

Choroba zawodowa – według art. 235 Kodeksu pracy: za chorobę zawodową uważa się chorobę wymienioną w wykazie chorób zawodowych, jeżeli w wyniku oceny warunków pracy można stwierdzić bezspornie lub z wysokim prawdopodobieństwem, że została ona spowodowana działaniem czynników szkodliwych dla zdrowia występujących w środowisku pracy albo w związku ze sposobem wykonywania pracy, zwanych „narażeniem zawodowym”.

eHPV (engineered Hours Per Vehicle) – wskaźnik stosowany w przemyśle motoryzacyjnym do pomiaru kosztów montażu wszystkich elementów niezbędnych do powstania samochodu. Pomiar skupia się jedynie na konkretnych czasach produkcji i montażu (przykręcanie, zabudowa części). Niezbędne, ale pomocnicze zadania (drogi do części, rozpakowywanie części) są pomijane, ponieważ nie są to stałe czasy i w zależności od miejsca zabudowy (dwie różne fabryki) mogą się od siebie różnić.

Ergonomia – jej głównym celem jest polepszanie warunków pracy człowieka, które obejmuje dostosowanie ich do możliwości pracownika oraz właściwy dobór pracownika do danej pracy i jego edukację obejmującą specyfikę stanowiska⁴⁴. Wyróżnia się ergonomię koncepcyjną (czyli wprowadzanie zasad ergonomii podczas opracowania koncepcji oraz projektowania) i ergonomię korekcyjną (czyli korektę warunków pracy na drodze modernizacji już funkcjonujących stanowisk pracy maszyn i urządzeń⁴⁵). Twórcą tego terminu jest Wojciech Jastrzębowski.

HCR (ang. Human Robot Collaboration) – współpraca człowieka z robotem.

Humanizacja pracy – ogólny system wszelkich zasad oraz działań praktycznych mających na celu takie kształtowanie systemu pracy, aby ludzka praca była wydajniejsza, ale także dostosowana do psychofizycznych możliwości oraz potrzeb określonego człowieka⁴⁶.

Job rotation – systematyczna zmianę stanowisk pracy w celu rozwijania i pogłębiania wiedzy fachowej i doświadczenia odpowiednich pracowników lub w celu uniknięcia monotonii pracy i jednostronnego obciążenia (...), przy czym z reguły rozszerzany jest tylko zakres czynności, ale nie zakres decyzyjny⁴⁷.

⁴⁴ W. Jastrzębowski, *Rys ergonomii, czyli nauki o pracy, opartej o prawa poczerpniętych z nauki przyrody*, „Ergonomia” 1979, t. 2, nr 1.

⁴⁵ A. Maliszewski, A. Batogowska, *Ergonomia dla każdego*, Sorus, Warszawa 1997.

⁴⁶ A. Kawecka-Endler, *Humanizacja a nowe formy pracy*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Organizacja i Zarządzanie” 2014, nr 63, s. 116.

⁴⁷ R. Nissen, *Job rotation*, [hasło w:] Gablerwirtschaftslexikon, <https://wirtschaftslexikon.gabler.de>, 1.06.2023.

Model dojrzałości – zespół różnorodnych narzędzi i praktyk umożliwiających dokonanie oceny kompetencji danej organizacji w zakresie zarządzania⁴⁸, jak również doskonalenia kluczowych czynników prowadzących do osiągnięcia założonych celów⁴⁹.

PCU – Proces Ciągłego Ulepszania.

Restrykcja – ograniczenie posiadające moc prawną. Restrykcją w planowaniu procesów produkcyjnych nazywamy np. ograniczenie ilości karoserii ze specjalną zabudową wchodzącą na linię montażową w celu wywarcia równomiernego obciążenia pracą pracowników lub zachowania dostępności urządzeń w przypadku, gdy zabudowa elementów w karoserii auta na danym taktie przekracza czas zaplanowanego czasu taktu linii.

Zwinność przedsiębiorstwa (*agile enterprise*) – zdolność przedsiębiorstwa do prosperowania w turbulentnym otoczeniu. Wiąże się ona ze zdolnością przedsiębiorstwa do odnoszenia sukcesów w konkurencyjnym otoczeniu, w którym ciągle zachodzą nieprzewidywalne zmiany stwarzające okazje rynkowe⁵⁰.

⁴⁸ Axelos, *Zarządzanie ryzykiem: przewodnik dla praktyków*, PeopleCert 2022.

⁴⁹ A. Looy, *Business Process Maturity: A Comparative Study on a Sample of Business Process Maturity Model*, Springer 2014.

⁵⁰ H. Włodarczykiewicz-Klimek, *Koncepcja i modele zwinnego przedsiębiorstwa*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Organizacja i Zarządzanie” 2016, nr 71, s. 214.

1. Istota balansowania linii montażowej

1.1. Balansowanie linii montażowej

Linia montażowa jest kompletnie zbalansowana, gdy na stacjach nie występują przestoje, a obciążenia zostały rozłożone w sposób równomierny⁵¹. Dlatego też balansowanie linii montażowej jest działaniem mającą na celu określenie najbardziej korzystnego przydziału operacji do stanowisk w trakcie montażu. Problem ten pojawia się zawsze wówczas, gdy wyroby są produkowane lub montowane na liniach o stałym taktie. Zadanie to ma bogatą literaturę, ponieważ jest istotnym problemem praktycznym. Problem BLM (balansowania linii montażowej) był powszechnie studiowany od czasu pionierskich prac Brytona w roku 1954⁵², Salvesona w roku 1955⁵³ oraz Jacksona w roku 1956⁵⁴. Potwierdzono użyteczność wielu podejść opracowanych do rozwiązywania problemu BLM w niezliczonych gałęziach przemysłu montażowego, takich jak: **przemysł samochodowy**, wytwórstwo, RTV, AGD itd.

W tradycyjnym problemie BLM zbiór operacji jest dany razem z czasami wykonywania oraz ograniczeniami kolejnościowymi definiującymi dozwolone uszeregowanie operacji⁵⁵. Celem rozwiązywania problemu BLM jest przydzielenie zbioru zadań do kolejnych stanowisk pracy w taki sposób, aby zminimalizować ilość potrzebnych stacji oraz spełnić założenia i cele produkcyjne⁵⁶.

W swoim podstawowym przypadku jest znane jako SALBP (ang. *Simple Assembly Line Balancing Problem*). Znane są metody dokładnego rozwiązywania tego problemu, polegające na przeszukiwaniu wszystkich możliwych kombinacji, algorytmy typu „dziel i rządź”, które w trakcie przeszukiwań odrzucają gałęzie nieprowadzące do rozwiązań lepszych od otrzymanych dotychczas, a także heurystyki prowadzące do rozwiązań przybliżonych. Każda

⁵¹ W. Grzechca, *Strategia just in time w problemie balansowania linii montażowej*, „Logistyka” 2012, nr 2, Poznański Instytut Technologiczny, <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BUS6-0040-0026?q=bwmeta1.element.baztech-volume-1231-5478-logistyka-2012-nr-2:38&qt=CHILDREN-STATELESS>, 2.02.2012

⁵² B. Bryton, *Balancing of continuous production line*, praca magisterska, Northwestern University, Evanston, IL, 1954.

⁵³ M. E. Salveson, *The assembly line balancing problem*, „The Journal of Industrial Engineering” 1955, 6, s. 18–25.

⁵⁴ J. R. Jackson, *A computing procedure for a line balancing problem*, „Management Science” 1956, 2, s. 261–271.

⁵⁵ por. A. Scholl, *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*, Physica-Springer Verlag, Heidelberg 1999.

⁵⁶ por. N. Nakase, T. Yamada, M. Matsui, *A Management Design Approach to Assembly Line Systems*, „International Journal of Production Economics” 2002, 76, s. 281–292.

z wymienionych metod ma jednak istotne ograniczenia. Należy zauważyć, iż zadanie prostego balansowania linii montażowej także ma istotne ograniczenia wymagające w praktyce przemysłowej modyfikacji⁵⁷.

Podczas pracy na linii montażowej często stosowane jest przypisywanie wybranego pracownika do jednej stacji roboczej. Aby w takim przypadku zminimalizować narażenie pracownika na urazy wynikające z wykonywania zadań, potrzebne jest przemyślane przydzielenie operacji do stacji (uwzględniając przy tym sugerowaną kolejność zabudowy przewidzianą przez konstruktora), które zbalansuje również obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego. Pracownik przydzielony do danej stacji roboczej wykonuje kilka operacji, które zostały przydzielone do tej stacji.

Pod pojęciem równoważenia linii montażowej (równoważenia linii) rozumie się taką alokację operacji, by zapewnić optymalny przydział. Warto bowiem podkreślić, iż ten optymalizacyjny problem ma istotne znaczenie przemysłowe. Równoważenie linii jest ściśle związane z rozmieszczeniem zadań na poszczególnych stanowiskach roboczych, by zoptymalizować cel, jaki może stanowić np. czas bezczynności produkcji bądź minimalna liczba stanowisk. Należy pamiętać, że cel ten nie powinien naruszać ograniczenia pierwszeństwa. Maksymalny czas pracy w tym przypadku nie powinien przekraczać podanego czasu cyklu linii montażowej, który z góry określa pożądana prędkość produkcji⁵⁸. Dodatkowo ustalony jest także czas przetwarzania poszczególnych zadań⁵⁹.

Rozwój linii montażowej wiąże się z wieloma wyzwaniami. W pierwszym czterdziestoleciu od wynalezienia linii montażowej, w celu jej wyważenia, zastosowanie znajdowała metoda prób i błędów. Niezwykle istotne jest, by wszelkie procesy były ustawione w zgodzie ze specyfikacją danego produktu. Co więcej, zachodzi konieczność wyrównania wszystkich obciążeń na zaplanowanych stanowiskach pracy. Rozmieszczenie zadań do wykonania na linii produkcyjnej uznawane jest zatem za kluczowy element. Aby to osiągnąć, można zastosować jedną z wielu metod heurystycznych, które zapewniają odpowiednie zrównoważenie linii montażowej. Oto najważniejsze.

⁵⁷ por. J. Żurek, M. Pastwa, *Heurystyczny program balansowania linii montażowej*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika” 1992, nr 97, s. 21–27.

⁵⁸ M. P. Groover, *Automation. Production Systems and Computer-Integrated Manufacturing*, 2008, 3rd Edition, Pearson Education, New Delhi.

⁵⁹ Ibidem.

METODA RANGOWANYCH WAG POZYCYJNYCH⁶⁰ (Helgeson-Birnie)

To stosunkowo szybka do wdrożenia technika heurystyczna. Waga pozycyjna wyznaczana jest wprost z grafu kolejnościowego; to suma wszystkich czasów wykonania wszelkich operacji. Metoda RPW to technika bilansowania produkcji liniowej opracowana przez Helgesona i Berniego. Metoda ta opiera się na wagach pozycyjnych, czyli współczynnikach przypisanych do każdej operacji tak, aby operacja była przypisana do stanowisk na linii.

Waga pozycyjna czynności jest określana przez sumę czasu wykonania zadania i wszystkich operacji, które następują po niej na diagramie priorytetów. Zatem

$$RPW_i = \sum_{k=1}^n t_k \quad (1.1.1)$$

gdzie:

- i: i-ta operacja;
- n: całkowita liczba operacji;
- tk: czas wykonania każdej operacji.

Po obliczeniu RPW czynności są umieszczane na liście w porządku malejącym według ich wagi. Następnie czynności o największej wadze pozycyjnej są przypisywane do otwartych stacji, z uwzględnieniem maksymalnego czasu cyklu, jaki może ona obsłużyć. Jeśli czas cyklu zostanie przekroczony, otwierana jest nowa stacja.

Zalety: dzięki tej metodyce wykorzystuje się większość czasu cyklu każdego stanowiska pracy, uzyskując najmniejszą liczbę stanowisk i minimalizując bezczynność.

Wady: metodologia ta zapewnia jedno rozwiązanie, które nie jest najlepszym.

METODA ODWRÓCONYCH WAG POZYCYJNYCH

Na szczególną uwagę zasługuje też heurystyka *Inverse Positional Weight*, czyli metoda odwróconych wag pozycyjnych⁶¹. Zasadniczo działa ona w sposób analogiczny do omówionego wcześniej RPW, lecz zadania waży się w formie sumy czasu wykonywania ich oraz wszystkich

⁶⁰ Rosnani Ginting and William, 2020, *Assembly Line Balancing with Method Ranking Positional Weight* (case study: XYZ Company), IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 3.09.2020, Medan, Indonezja.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1003/1/012032/pdf>, 1.12.2020.

⁶¹ W. B. Helgeson, D. P. Birnie, *Wyważanie linii montażowej przy użyciu techniki ważenia pozycyjnego*, „Journal of Industrial Engineering” 1961, 12, s. 394–398,

<https://www.scirp.org/%28S%28lz5mqp453edsnp55rrgjt55%29%29/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1780890>, 15.06.2016.

czasów przeznaczonych na wykonanie poprzednich zadań. Wówczas sekwencję przypisania rozpoczyna się nie od pierwszej, lecz od ostatniej pikiety. Metoda ta rozpoczyna się od grupowania zestawów poszczególnych zadań, między którymi występują bezpośrednie powiązania na wykresie pierwszeństwa. W dalszej kolejności grupy te są traktowane w formie pojedynczych czynności. Odpowiednie ich pogrupowanie sprawia, iż każdy taki zestaw odpowiada mniej więcej czasowi zagregowanego. Następnym etapem jest zastosowanie ograniczonego rozmiaru zestawu operacji w celu identyfikacji prawidłowego zadania. Gdy zakończy się to sukcesem, wówczas algorytm wygładza zadania między sąsiadującymi stacjami, co ma na celu usprawnienie tego rozwiązania. Warto nadmienić, iż zachowuje przy tym pierwszeństwo oraz spełnia ograniczenia powiązane z czasem cyklu. W przeciwnym wypadku grupy dzielone są na kolejne podzbiory o mniejszych rozmiarach i dochodzi do powtórzenia całego procesu⁶².

METODA POWIĄZANYCH DZIAŁAŃ

W dalszej kolejności warto skupić się na heurystyce powiązanej aktywności autorstwa Agrawaa. Metoda ta – w zakresie oceniania zadań – działa analogicznie do heurystyki odwróconych wag pozycyjnych. Główna różnica między nimi dotyczy metody przypisywania. Ściślej ujmując: wybierane jest zadanie o największej liczbie punktów, mniejszej jednocześnie od czasu cyklu. Kolejnym etapem jest przydzielenie nowemu pracownikowi konkretnego zadania, uwzględniając przy tym wszelkie czynności je poprzedzające. Algorytm zajmuje się ponownym obliczeniem rezultatów dla wszelkich nieprzypisanych dotąd zadań. Następnie dochodzi do powtórzenia całego procesu przypisywania. W efekcie zestaw pracowników ulega sekwencjonowaniu w oparciu o zasadę ważności pierwszeństwa.

EFEKTYWNA METODA HEURYSTYCZNA DLA PROSTEGO PROBLEMU RÓWNOWAŻENIA LINII MONTAŻOWEJ

W tej metodzie autorstwa Baybars opracowywany jest zestaw złożony z kilku kroków wstępnego przetwarzania. Realizacja tych kroków ma na celu ograniczenie złożoności danego problemu. Dane wejściowe analizuje się w tym przypadku pod kątem oszczędzenia złożoności. Pozwala na to np. rozłożenie głównego problemu na mniejsze, tzw. podproblemy oraz na wykrycie niejawnych ograniczeń związanych z przypisaniem.

⁶² F. M. Tonge, *A heuristic program for assembly line balancing*, Prentice-Hall Inc., 1961.

Wstępne przetworzenie finalizuje pojedynczy przydział zadań, co odbywa się począwszy od końca linii montażowej.

Biorąc pod uwagę metrykę priorytetyzacji zadań, nacisk jest położony na podzbiór zadań niezawierających aktualnie nieprzypisanych następców. Kolejnym krokiem jest wybór podzbioru posiadającego najwięcej poprzedników. Następnie wybrane zadanie zostaje przypisane do ostatniej z dostępnych stacji.

METODA COMSOAL

Nazwa tej metody to skrót od z ang. *Computer Method for Sequencing Operations for Assembly Lines*. Prezentowana technika wyważania linii powstała w 1966 roku, a jej twórcą był Arcus. Początkowo stosowano ją wyłącznie do rozwiązywania problemów w zakresie wyważania linii montażowych, ze szczególnym uwzględnieniem problemu ALB⁶³.

COMSOAL znajduje zastosowanie przy generowaniu wykonalnych rozwiązań problemów z alokacją zasobów dla poszczególnych iteracji. Wielokrotne uruchomienie tej komputerowej heurystyki zapewnia kilka wykonalnych rozwiązań. Wówczas należy wybrać najlepsze z nich.

Na początku należy stworzyć tabelę z wszystkimi listami działań, które przedstawia się z zachowaniem relacji pierwszeństwa w odpowiedniej kolejności. Drugi etap polega na wyborze działań dostępnych w tabeli, które nie posiadają zadania poprzedzającego. W tym celu należy zakończyć wszelkie poprzednie operacje dotyczące rozważania działania. W trzecim etapie dochodzi do stworzenia listy dostępnych działań. Proces ten trwa do momentu uzyskania najbardziej efektywnego rozwiązania⁶⁴.

W porównaniu z wynikami popularnych algorytmów ta metoda okazuje się być najbardziej właściwą do rozwiązywania problemów alokacji zasobów, co poświadcza wielu naukowców. Istnieje możliwość identyfikacji optymalnych rozwiązań w wybranych przypadkach⁶⁵. Gosh i Gagon w swojej publikacji zaprezentowali bardziej kompleksowy przegląd⁶⁶. Zdaniem

⁶³ W. G. Depuy, G. E. Whitehouse, *A simple and effective heuristic for the resource constrained project scheduling problem*, „International Journal of Production Research” 2001, 39 (14), s. 3275–3287.

⁶⁴ V. Pachghare, R. S. Dalu, *Assembly Line Balancing Methods – A Case Study*, „International Journal of Science and Research” (IJSR) 2012, ISSN s. 2319–7064,

⁶⁵ G. W. DePuy, G. E. Whitehouse, *Applying the COMSOAL Computer Heuristic to the Constrained Resource Allocation Problem*, „Computers & Industrial Engineering” 2000, 38, s. 413–422; M. M. Nkasu, K. H. Leung, *Computer Integrated Manufacturing Assembly System Design*, „Integrated Manufacturing Systems” 1995, 6, s. 4–14.

⁶⁶ S. Gosh, R. Gagnon, *A Comprehensive Literature Review and Analysis of the Design, Balancing and Scheduling of Assembly System*, „Int. J. Prod. Res.” 1996, 27, 4, s. 637–670.

niektórych badaczy oparcie organizacji linii montażowej jedynie o rezultaty COMSOAL może wywrzeć negatywny wpływ na ogólną wydajność tej linii. Jest to szczególnie powszechny problem w przypadku, gdy stosowane są zautomatyzowane systemy transportu materiałów, których przestrzenie buforowe są ograniczone. W efekcie konieczne jest wdrożenie narzędzia pozwalającego na weryfikację słuszności linii. Wśród narzędzi stosowanych w tym celu wyróżnić można symulację komputerową, która zastosowana przed rzeczywistą implementacją pozwala na identyfikację ewentualnego problemu o operacyjnym charakterze w zakresie złożonych systemów⁶⁷.

Wśród najważniejszych zalet metody COMSOAL wymienia się:

- optymalizację wydajności linii produkcyjnej,
- ograniczenie czasu bezczynności,
- ograniczenie liczby stanowisk pracy.

INNE METODY KOMPUTEROWE

Wśród pozostałych metod komputerowych wyróżnić można CALB, NULISP, WOSTAS czy MRPW. Rozwiązania te omówiono w poniższej części.

Pierwsze z nich – *Computer Aided Line Balancing* (CALB) powstało w 1969 roku. Jak podaje Schofield (1979), deweloper tej metody (Magdad) wskazał, iż CALB jest w stanie pokonać większość praktycznych ograniczeń zważywszy na równoważenie linii.

Kolejną metodą jest NULISP, czyli *Nottingham University Line Sequencing Program*. Ten program komputerowy został opracowany przez Bonney, Schofield i Green w 1976 roku z myślą o wyważaniu linii montażowych. W efekcie operator z większą łatwością mógł generować akceptowalne salda linii. Dodatkowym założeniem programu było zrozumienie ograniczeń, jakie nakładane są na poszczególne zadania (grupowanie i rozdzielanie zadań), a także pozostałych ograniczeń charakterystycznych dla równoważenia linii montażowej.

Po dwóch latach Haider oraz Moodie stworzyli interaktywny program komputerowy, który – w przeciwieństwie do przetwarzania wsadowego typu – umożliwia rozmowę między operatorem a komputerem w trakcie wyważania. Ma to na celu wspomoczenie użytkowników profesjonalną wiedzą. Warto nadmienić, iż w 1979 roku program NULISP został w pełni interaktywny, dzięki

⁶⁷ M. Sameh, D. B. Mike, *Comprehensive Simulation Analysis of a Flexible Hybrid Assembly System*, „Integrated Manufacturing Systems” 1998, 9, 3, s. 156–167.

czemu operator mógł jeszcze skuteczniej pracować z komputerem bezpośrednio w trakcie procesu wyważania⁶⁸.

Na uwagę zasługuje także WOSTAS, czyli *Work Station Assessment*⁶⁹. Metoda ta powstała w 1985 roku, a jej autorzy (Pulat i Pulat) pochodzą z Japonii. Rozwiązanie to uwzględnia system wyważania linii montażowych w czasie rzeczywistym i początkowo było stosowane w wojsku przy realizacji zadań załogowych. System ten jest w stanie gromadzić czasy wykonywania zadań i właściwie rozdzielać je w przypadku załamania się równowagi.

Technologia komputerowa została także wykorzystana w 1987 roku przez Brandta i Renschlera – autorów techniki zmodyfikowanej wagi pozycyjnej w rankingu (MRPW). Dzięki dostępowi do wyposażenia eksperckiego systemu, MRPW jest w stanie zlokalizować wiedzę przyczynową, którą stanowią ograniczenia związane z montażem produktów – zarówno logiczne, jak i fizyczne. Zastosowanie technologii systemu eksperckiego pozwoliło też na łatwe dodawanie różnorodnych rodzajów ograniczeń. W tym celu do programu dodawane są poszczególne reguły. Warto nadmienić, iż omawiany system jest w stanie dokonywać interpretacji fizycznych ograniczeń, co jest szczególnie pożyteczne z punktu widzenia operatora. Pomaga to bowiem podczas interaktywnego opracowywania bilansów linii.

ZASADA NAJWIĘKSZEGO KANDYDATA

Metoda LCR jest prostą aplikacją służącą do rozwiązywania nieskomplikowanych problemów bilansowania, w której czas zadania jest jedynym parametrem służącym do przypisania zadania do stacji⁷⁰.

W metodzie LCR buduje się tabelę, która jest charakteryzowana przez operacje, czasy ich wykonania i poprzedników. Zadania są porządkowane zgodnie z głównym czasem zadania, a operacje są przydzielane w otrzymanej kolejności, z zachowaniem relacji pierwszeństwa

⁶⁸ N. A. Schofield, *Wyważanie linii montażowych i zastosowanie technik komputerowych*, „Komputery i inżynieria przemysłowa” 1979, t. 3, nr 1, s. 53–69.

⁶⁹ B. M. Pulat, P. K. Pulat, *A workstation assessor for crew operations – WOSTAS*, „International Journal of Man-Machine Studies” styczeń 1985, t. 22, nr 1, s. 103–126.

⁷⁰ M. Bagher, M. Zandieh, H. Farsijani, *Balancing of stochastic U-type assembly lines: an imperialist competitive algorithm*, „International Journal of Advanced Manufacturing Technology” 2010, 54, s. 271–285.

i maksymalnego czasu cyklu obsługiwanego przez stację. Procedura ta jest powtarzana do momentu, gdy nie ma dostępnych operacji⁷¹.

Zalety: łatwa do zastosowania. W szczególności metodyka ta wykorzystuje tylko jeden parametr jako punkt odniesienia do przypisywania zadań do stacji.

Wady: niska skuteczność w poszukiwaniu optymalnego rozwiązania przy bardzo wysokim współczynniku opóźnienia bilansującego.

METODA KILBRIDGE & WESTER

Metoda KWM polega na wyborze czynności, które mają być przypisane do stanowisk, z uwzględnieniem ich pozycji na diagramie priorytetów. Czynności są więc umieszczane w kolumnach i sortowane w tabeli według szeregu, do której należą, oraz w porządku malejącym czasu trwania zadania. Po wypełnieniu tabeli zadania są przydzielane, zaczynając od pierwszej kolumny, aż do osiągnięcia maksymalnego czasu cyklu. Jeśli maksymalny dozwolony czas cyklu zostanie przekroczony, a pozostaną nieprzydzielone operacje, otwiera się nowe stanowisko. Stosowanie tej metody kończy się, gdy lista transakcji jest pusta⁷².

Zalety: prosta metoda realizacji.

Wady: zapewnia jedno rozwiązanie, a stacje mają małe nasycenie.

MAKSYMALNY STOPIEŃ NASYCENIA

Zastosowanie tego algorytmu jest dość proste: metoda zaczyna się od otwarcia nowej stacji, ponieważ zbiór już przypisanych czynności jest pusty. Uwzględniając relacje pierwszeństwa, znajdujemy drugi zbiór składający się z sekwencji możliwych działań⁷³.

Operacje są dostępne, gdy poprzednie czynności zostały już przypisane do stacji. W tym momencie oblicza się stopień nasycenia dla każdej zidentyfikowanej kombinacji. Parametr ten jest

⁷¹ L. Damiani, P. Giribone, G. Guizzi, R. Revetria, E. Romano, *Different approaches for studying interruptible industrial processes: Application of two different simulation techniques* (Book Chapter). *Handbook of Research on Computational Simulation and Modeling in Engineering*, 2015, s. 69–104.

⁷² F. De Felice, A. Petrillo, A. Silvestri, *Offshoring: Relocation of production processes towards low-cost countries through the project management & process reengineering performance model*, „Business Process Management Journal” 2015, 21 (2), s. 379–402.

⁷³ R. Gamberini, A. Grassi, B. Rimini, *A new multi-objective heuristic algorithm for solving the stochastic line re-balancing problem*, „International Journal of Production Economics” 2006, 102, s. 226–243.

porównywany z narzuconym stopniem nasycenia α . Kombinacje czynności, które nie spełniają zależności:

$$GS \leq \alpha \quad (1.1.2)$$

są odrzucane, podczas gdy pozostałe są brane pod uwagę.

Zalety: ta metodologia pozwala uzyskać jedno rozwiązanie, które okazuje się optymalne, ponieważ jej celem jest zminimalizowanie współczynnika opóźnienia.

Wady: nie pozwala wyznaczyć jedyne rozwiązanie.

METODA KOTTAS–LAU

Algorytm Kottasa–Lau ma na celu optymalizację całkowitych kosztów produkcji i pozwala osiągnąć dobry poziom zrównoważenia linii produkcyjnych. W metodzie tej rozpatruje się stochastyczne czasy wykonania należące do rozkładu normalnego z przypisaną wartością średnią i odchyleniem standardowym. Aby opisać działanie algorytmu, należy wprowadzić następujące parametry: zdolność produkcyjną linii, czas cyklu oraz koszt pracy⁷⁴. Ponadto obliczane są odpowiednio średni czas trwania i odchylenie standardowe k-tej operacji:

$$m_k = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}; \sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - m_k)^2}{n-1}} \quad (1.1.3)$$

Ponadto definiuje:

- operacja dostępna: operacja zwolniona z poprzednich (już przypisanych),
- operacja pożądana: operacja dostępna, dla której:

$$L_k = P_k * I_k \quad (1.1.4)$$

Gdzie:

- L_k to średni koszt wykonania w k-tym wierszu transakcji:

$$L_k = m_k * \frac{C}{60} \quad (1.1.5)$$

czyli iloczyn kosztu pracy na jednostkę czasu i średniego czasu wykonania operacji.

- P_k to procent nieukończenia k-tej operacji.
- I_k to całkowity koszt wykonania poza linią produkcyjną wszystkich operacji, które nie mogą być wykonane, jeśli operacja k-ta nie została zakończona.

⁷⁴ J. F. Kottas, H. S. Lau, *A cost-oriented approach to stochastic line balancing*, „AIIE Trans.” 1973, 5, s. 164–171.

– Operacja krytyczna: jest to rodzaj operacji, dla której jest ona dostępna:

$$L_k < P_k * I_k \quad (1.1.6)$$

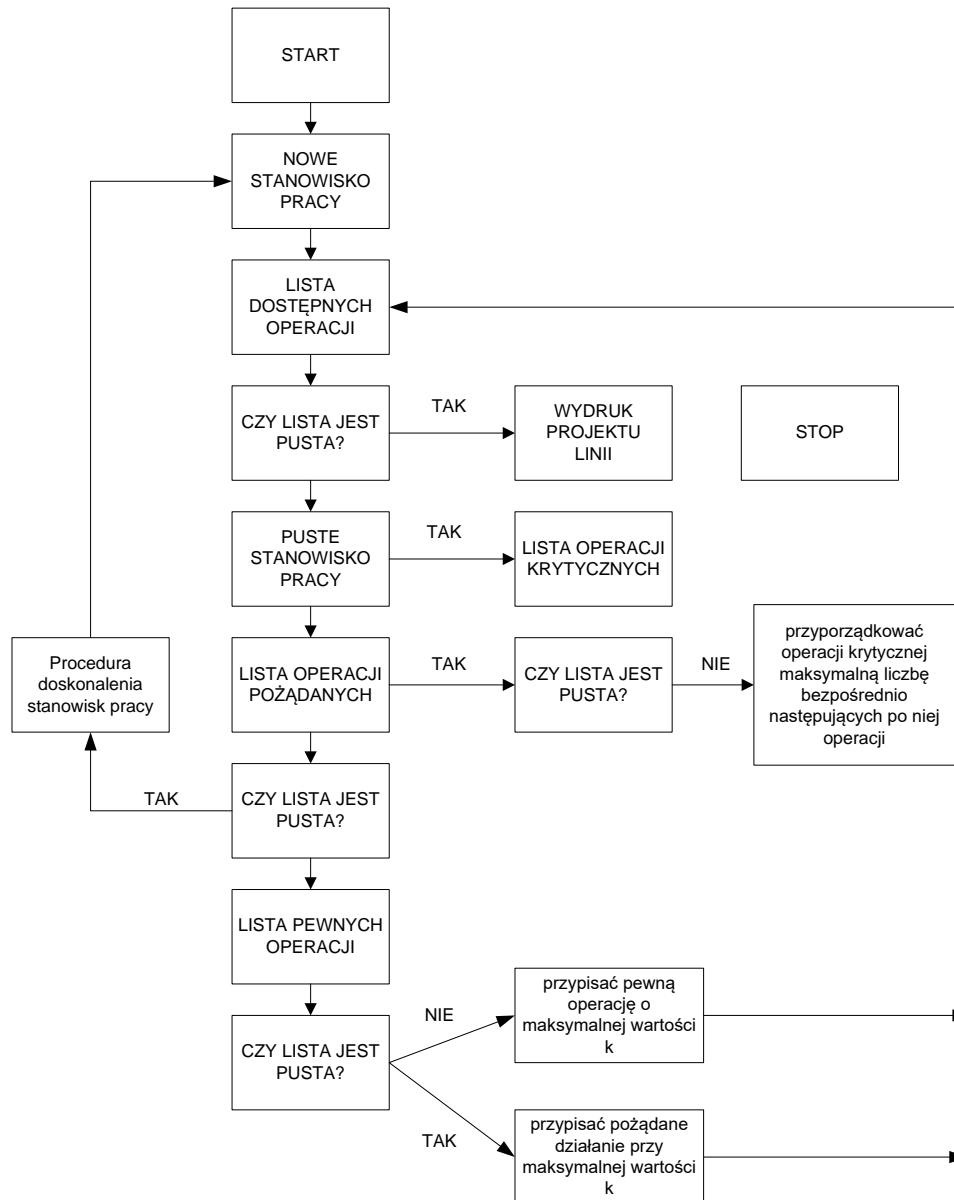
nawet na „pustych” stacjach, dlatego można ją określić jako operację niepożądaną.

– Operacja pewna: operacja, z której wynika:

$$P_k < 0,005 \quad (1.1.7)$$

co znaczy, że prawdopodobieństwo niezrealizowania transakcji nie może przekraczać

0,5%. Schemat blokowy algorytmu Kottasa–Lau wygląda następująco:



Rysunek 4. Schemat blokowy algorytmu Kottasa–Lau. Źródło: J. F. Kottas, H. S. Lau, *A cost-oriented approach to stochastic line balancing*, „International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice”, 1973.

Zalety: bardzo ważne w sektorze przemysłowym. Większa dokładność rozwiązania w porównaniu z innymi metodami.

Wady: długa i złożona procedura obliczeniowa. Zapewnia jedno rozwiązanie, które będzie wykonalne, ale niekoniecznie optymalne.

SYMULOWANE WYŻARZANIE

Metoda symulowanego wyżarzania rozpoczyna się od wygenerowania rozwiązania początkowego, używanego jako pierwsze rozwiązanie bieżące. Parametr kontrolny T, oznaczający „temperaturę”, jest zmniejszany zgodnie z szybkością chłodzenia CR. W miarę obniżania się temperatury, znajdują się rozwiązania sąsiadujące z rozwiązaniem bieżącym. Rozwiązanie sąsiednie staje się nowym rozwiązaniem bieżącym, jeśli wartość funkcji celu jest większa niż wartość rozwiązania bieżącego. W przeciwnym razie rozwiązania gorsze mogą zostać przyjęte jako rozwiązania bieżące, jeśli spełnione jest pewne kryterium akceptacji, aby uniknąć ugrzęźnięcia w perspektywie lokalnej i osiągnięcia optimum globalnego⁷⁵.

Funkcja określająca prawdopodobieństwo zaakceptowania gorszego rozwiązania jest dana przez:

$$\text{Exp} (-(F [\textit{candidate solution}] - F [\textit{current solution}]) / t) \quad (1.1.8)$$

gdzie F jest funkcją służącą do oceny rozwiązania.

Na początku algorytmu wartość T jest wyższa i maleje wraz z funkcją chłodzenia, co wiąże się z długim poszukiwaniem początkowego optymalnego rozwiązania, a następnie intensyfikacją w dobrych obszarach. Algorytm zatrzymuje się, gdy spełnione jest kryterium zakończenia. Kryterium to jest reprezentowane przez liczbę iteracji, czas wykonania lub końcową wartość parametru sterującego T.

W przeciwieństwie do innych technik linii montażowych, w których operator może zajmować nierównoległe stanowiska pracy, ta metodologia uwzględnia problem równoległości zadań na stanowiskach pracy. Jeśli więc łączny czas wymagany przez zadania nie przekracza określonego czasu cyklu, czynności te można umieścić w centrum roboczym.

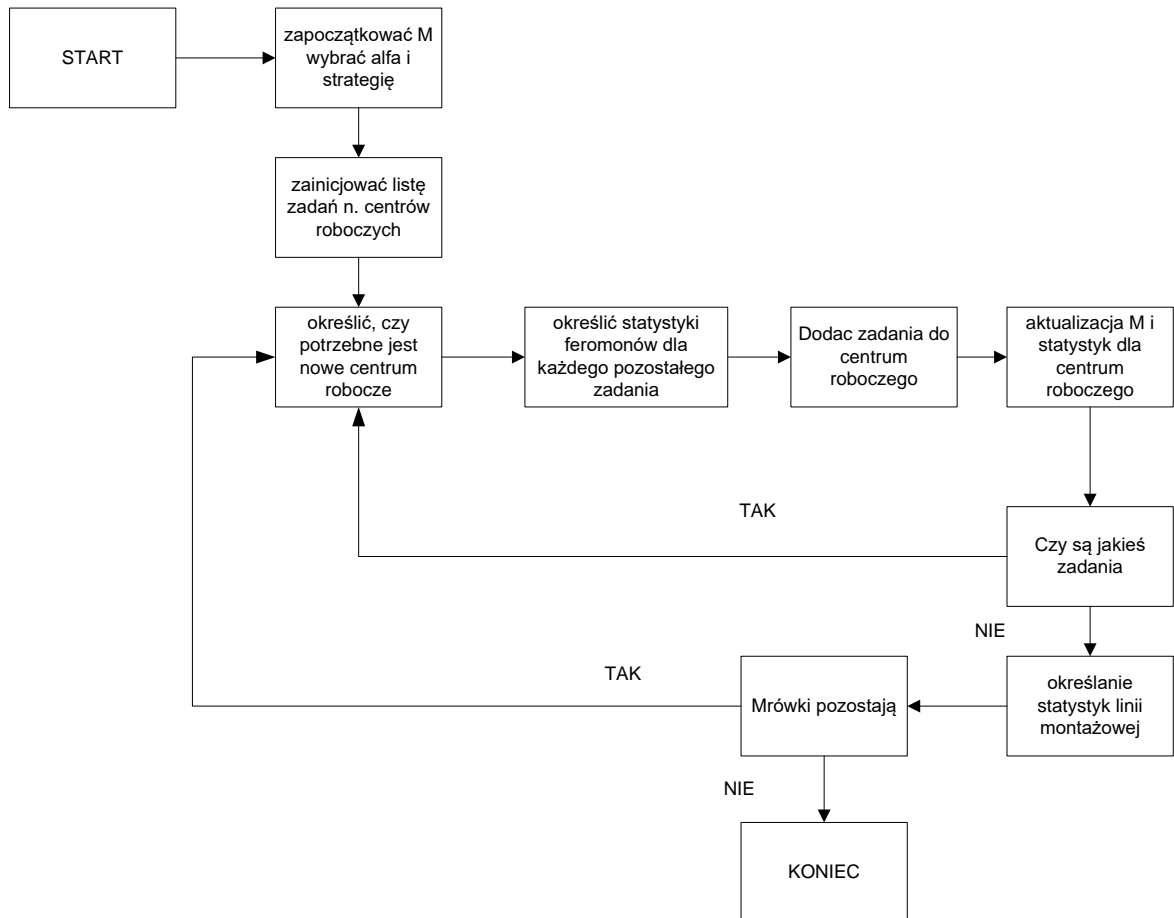
⁷⁵ A. Petrillo, G. Di Bona, A. Forcina, A. Silvestri, *Building excellence through the Agile Reengineering Performance Model (ARPM): A strategic business model for organizations*, „Business Process Management Journal” 2017, 24 (1), s. 128–157.

Wady: algorytm wyszukiwania lokalnego kończy się na minimum lokalnym i nie ma informacji, jak bardzo to minimum różni się od minimum globalnego.

OPTIMALIZACJA Z WYKORZYSTANIEM KOLONII MRÓWEK

Optymalizacja kolonii mrówek (ACO), wprowadzona w 1992 roku przez Marco Dorigo, jest metaheurystycznym podejściem do rozwiązywania problemów optymalizacji kombinatorycznej. Metodologia ta symuluje naturalne zachowanie mrówek i rozwija mechanizmy współpracy. Jak wiadomo mrówki to owady żyjące w koloniach, które potrafią znaleźć najkrótszą drogę między swoim gniazdem a źródłem pożywienia. Co więcej – mrówki są ślepe, ale wracając do gniazda, pozostawiają feromony, dzięki którym inne mogą podążać tą samą drogą. Proces ten nazywany jest stygmatyzacją. W ten sposób mrówki mogą podążać już istniejącą ścieżką, nie poruszając się przypadkowo. Dlatego algorytm ACO symuluje wędrówkę sztucznych mrówek, a ponadto „mrówka” wybiera czynność, którą należy dodać do bieżącego centrum roboczego dzięki mechanizmowi probabilistycznemu. Prawdopodobieństwo wyboru aktywności jest określone przez poziom „feromonu” obecnego na ścieżce pomiędzy mrówką a kandydującą aktywnością⁷⁶. Ilość feromonu jest miarą względnie pożądanego rozwiązania, a procedura jest kontynuowana do momentu, gdy wszystkie aktywności zostaną umieszczone w centrach roboczych. Poniżej przedstawiono schemat blokowy związany z procedurą algorytmu.

⁷⁶ A. Petrillo, F. De Felice, F. Zomparelli, *Performance measurement for world-class manufacturing: a model for the Italian automotive industry*, „Total Quality Management and Business Excellence” 2019, Tom 30, nr 7-8, s. 908-935.



Rysunek 5. Schemat blokowy algorytmu mrówek. Źródło: A. Petrillo, F. De Felice, F. Zomparelli, *Performance measurement for world-class manufacturing: a model for the Italian automotive industry*, „Total Quality Management & Business Excellence” 2017, 30, s. 7–8, s. 908-935, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14783363.2017.1408402>, 22.01.2018.

Zalety: możliwość tworzenia lepszych rozwiązań dzięki wykorzystaniu sparametryzowanego prawdopodobieństwa na modelu reprezentującym drogę feromonów.

Wady: nie dostarcza doskonałego rozwiązania w skończonym czasie w przypadku problemów optymalizacyjnych ani rozwiązania dopuszczalnego w przypadku problemów z zaspokojeniem ograniczeń.

METODA RAOUF TSUI ELSAYED

Metoda ta ma na celu priorytetyzację elementów, które podczas nadawania ich stacjom są preferowane. Owa metoda akceptuje czasy elementów zarówno ze znanych, jak i nieznanych dotąd rozkładów symetrycznych. W efekcie zminimalizowana jest zmienność w obrębie stacji. Elementy

są tak przypisywane do poszczególnych stacji, iż czas żadnej z nich nie jest większy niż ustalone przez kierownictwo poziomy ufności prawdopodobieństwa⁷⁷.

Wyważanie linii montażowej uwzględnia szereg podejść heurystycznych. Początkowo popularnością cieszyły się probabilistyczne podejścia. Niemniej ich stosowanie przestało przynosić efekty w momencie, gdy okazało się, iż uzyskiwane w ten sposób wyniki nie są powtarzalne⁷⁸. W pozostałych metodach kładziono szczególny nacisk na wykorzystanie ustalonych reguł decyzyjnych. Metody te skupiały się przede wszystkim na uproszczeniu procesu rozwiązania, bazując na wymaganiach pierwszeństwa. W 1975 roku Pinto, Dannenbring i Khumawala stworzyli heurystyczną procedurę sieciową, która – przy użyciu reguł heurystycznych – generowała sieć. Owa sieć była następnie dogłębnie analizowana przez algorytm najkrótszej trasy, co miało na celu pozyskanie heurystycznego rozwiązania. Warto zwrócić szczególną uwagę na skuteczność tej metody podczas analizowania wrażliwości problemu dla poszczególnych czasów cyklu. Nie zachodzi bowiem konieczność regeneracji sieci.

W 1983 roku Johnson stworzył metodę zajmującą się modyfikacjami podstawowego problemu wyważania linii montażowej pojedynczego problemu *branch-and-bound*. Wdrożenie tej metody pozwoliło na wyjaśnienie tzw. nieregularności formacji. Wśród nieprawidłowości szczególną uwagę przykuwa separacja i grupowanie zadań, a także kilka sytuacji w modelu mieszanym. Trzy lata później Baybars zasugerował skuteczną heurystykę pozwalającą na rozwiązywanie prostych problemów dotyczących wyważania linii montażowej. Dzięki wprowadzeniu jednoprzebiegowej metody możliwe było zmniejszenie rozmiaru problemu. Rozkładany był on bowiem na mniejsze podproblemy.

Warto zwrócić również uwagę na pozostałe ograniczenia, jakie pojawiają się w trakcie próby zrównoważenia linii montażowej. W tym zakresie interesująca jest metoda z 1980 roku autorstwa Raoufa, Tsui i ElSayed, która podczas przydziałów stacji preferuje zadania priorytetowe nad niepriorytetowymi. Po upływie trzech lat Raouf, Lashkari i Akgun stworzyli metodę grupowania zadań w problemie równoważenia linii montażowej w przypadku modeli mieszanych bez konieczności zwiększania liczby stacji. W roku 1985 Agrawal opracował

⁷⁷ A. Raouf, C.L. Tsui, *A new method for assembly line balancing having stochastic work elements*, „Computers & Industrial Engineering” 1982, vol. 6, nr 2, s. 131–148.

⁷⁸ P. K. Agrawal, *The related activity concept in assembly line balancing*, „International Journal of Production Research” 1985, 23:2, s. 403–421.

natomiast koncepcję powiązanej działalności, która uznawała powiązane wzajemnie zadania, jakie mają być – w oparciu o to powiązanie – przydzielane właściwym stacjom.

Równie interesująca jest wprowadzona w 1987 roku przez Brandta i Rentschlera technika MRPW (z ang. *Modified Ranked Positional Weight Technique*), która bazuje na technice Helgesona i Birniego⁷⁹ integrując również kilka innych koncepcji w tym:

- koncepcję powiązanych działań Argawala z 1985 roku w zakresie grupowania zadań,
- koncepcję nieprawidłowości formacji Johnsona z 1983 roku,
- koncepcję rozkładu problemu Baybarsa z 1986 roku.

W rezultacie możliwe stało się grupowanie zadań na trzech następujących podstawach:

- zadań koniecznych do wykonania na tej samej stacji,
- zadań niemożliwych do wykonania na tej samej stacji,
- zadań zajmujących stację bez udziału jakichkolwiek innych zadań.

Warto nadmienić, iż omawiana technika MRPW umożliwia analizę problemu z uwzględnieniem różnych czasów cyklu. Nie wymaga to regeneracji sieci opisującej problem. Heurystyka ta jest też w stanie zdeterminować odpowiedni czas cyklu. W tym celu zastosowanie znajduje dwudzielne wyszukiwanie. Należy dodać, że w MRPW, podobnie jak w metodzie wagi rankingowej, nie dochodzi do zmian po określeniu sekwencji wagowej, które potencjalnie mogłyby nastąpić w trakcie fazy przydzielania stacji. Innymi słowy metoda ta nie pociągnie za sobą zadania mogącego spełnić ograniczenie czasowe cyklu, czyli zadania, jakie zostało nieprecyzyjnie ograniczone.

Ogromną rolę w procesie organizacji pracy odgrywa również ergonomia. Organizacją pracy można określić sumę działań technicznych, ekonomicznych i organizacyjnych dążących do zaprojektowania optymalnego połączenia pracy człowieka i środków produkcji (przedmiotów i środków pracy), jak również zapewnienie właściwych i odpowiednich dla zatrudnionych pracowników warunków pracy⁸⁰. Organizowanie pracy oznacza celowe kształtowanie rzeczywistości. Zjawisko to pozostaje nadrzędne wobec czynności, które są związane z przygotowaniem (planowaniem), porządkowaniem (projektowaniem, kształtowaniem),

⁷⁹ B. Helgeson, D.P. Bernie, *Assembly Line Balancing Using Ranked Positional Weight Technique*, „Journal of Industrial Engineering” 1961, vol. 12, nr 6.

⁸⁰ L. Pacholski, A. Jasiak, *Makroergonomia*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2011, s. 149–150.

realizacją (sterowaniem rozumianym jako zlecenie i zabezpieczanie), weryfikacją (kontrolą i oceną efektów powyższych czynności). W efekcie tych działań powinno mieścić się dostosowanie do nowych wymagań, a więc wejście w kolejny cykl sanacji istniejącej organizacji⁸¹. Koniecznym jest też dostosowanie danego pracownika do warunków pracy po to, by zapewnić możliwie jak największą wydajność pracy, która nie powoduje pogorszenia jego stanu zdrowia⁸².

W Tabeli 1 zostały porównane metody używane w balansowaniu linii, które uwzględniają aspekty ergonomiczne.

	Równoważenie linii	Uwzględnianie ergonomii
Metoda Rangowanych Wag Pozycyjnych	tak	tak
Metoda Odwróconych Wag Pozycyjnych	tak	tak
Metoda Powiązanych Działań	tak	nie
Efektywna Metoda Heurystyczna Dla Prostego Problemu Równoważenia Linii Montażowej	tak	nie
Metoda Comsoal	tak	nie
Inne Metody Komputerowe	tak	nie
Zasada Największego Kandydata	tak	nie
Metoda Kilbridge & Wester	tak	nie
Maksymalny Stopień Nasycenia	tak	nie
Metoda Kottas–Lau	tak	tak
Symulowane Wyżarzanie	tak	tak
Optymalizacja Z Wykorzystaniem Kolonii Mrówek	tak	tak
Metoda Raouf Tsui Elsayed	tak	nie

Tabela 1. Porównanie metod używanych w balansowaniu linii, które uwzględniają aspekty ergonomiczne. Źródło: opracowanie własne.

Dostępne badania literatury na temat balansowania linii montażowych⁸³ nie podejmują

⁸¹ M. Rzeszotarska-Wyrwicka, *Organizowanie systemów pracy*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.

⁸² Ibidem.

⁸³ O. Battai'a, A. Dolgui, *A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches*, „International Journal of Production Economics” 2013, 142, s. 259–277; C. Becker, A. Scholl, *A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing*, „European Journal of Operational Research” 2006, 168, s. 694–715; N. Boysen, M. Flidner, A. Scholl, *A classification of assembly line balancing problems*, „European Journal of Operational Research” 2007, 183, s. 674–693; N. Boysen, M. Flidner, A. Scholl, *Assembly line balancing: Which model to use when?*, „International Journal of Production Economics” 2008, III, s. 509–528; A. Scholl, *Balancing and sequencing of assembly lines*, Physica, Heidelberg 1999; A. Scholl, C. Becker, *State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing*, „European Journal of Operational Research” 2006, 168, s. 666–693.

szczegółowo zagrożeń ergonomicznych. Kilka dostępnych publikacji analizuje aspekty organizacyjne dotyczące tego, jak zintegrować ergonomię z procesami planowania firmy, na przykład poprzez uczestnictwo interesariuszy lub wskaźniki wydajności⁸⁴. Artykuły te nie uwzględniają modeli optymalizacji. Neumann i Dul⁸⁵ podsumowują wyniki studiów przypadków, które porównują skutki dla człowieka (głównie obciążenie fizyczne i zdrowie) oraz efekty systemowe (głównie wydajność i jakość) różnych inicjatyw zarządzania operacjami. Dul, de Vries, Verschoof, Eveleens i Feilzer⁸⁶ podsumowują wymagania norm ergonomicznych odpowiednich dla firm produkcyjnych. Bardzo niewiele artykułów zawiera też przegląd literatury na temat metod optymalizacji w celu zmniejszenia zagrożeń ergonomicznych. Lodree, Geiger i Jiang⁸⁷ badają aspekty ergonomii w literaturze dotyczącej planowania. Natomiast Grosse, Glock i Neumann⁸⁸ oraz Grosse, Glock, Jaber i Neumann⁸⁹ podsumowują literaturę dotyczącą czynników ludzkich w procesie sortowania zamówień.

Otto i Scholl⁹⁰ przedstawiają ogólny przegląd szeroko rozpowszechnionych metod ergonomii i opisują sposób modelowania ich w kontekście problemu wyważenia linii montażowej. Podmiotowi autorzy w swoich eksperymentach obliczeniowych badają ERGO-SALBP typu 1 i minimalizują zagrożenia ergonomiczne jako cel drugiego poziomu. Proponują dwuetapową heurystykę: w pierwszym etapie należy znaleźć minimalną możliwą liczbę stacji za pomocą dobrze znanej procedury SALOME⁹¹. W drugim etapie symulowana technika uzupełniona jest lokalnym algorytmem wyszukiwania, konstruuje rozwiązania przy minimalnej liczbie stanowisk i niskim ryzyku ergonomicznym.

⁸⁴ P. L. Jensen, *Human factors and ergonomics in the planning of production*, „International Journal of Industrial Ergonomics” 2002, 29, s. 121–131; W. P. Neumann, J. Village, *Ergonomics actions research II: A framework for integrating HF into work system design*, „Ergonomics” 2012, 55, s. 1140–1156.

⁸⁵ W. P. Neumann, J. Dul, *Human factors: Spanning the gap between OM and HRM*, „International Journal of Operations Ef Production Management” 2010, 30, s. 923–950.

⁸⁶ J. Dul, H. de Vries, S. Verschoof, W. Eveleens, A. Feilzer, *Combining economic and social goals in the design of production systems using ergonomics standards*, „Computers & Industrial Engineering” 2004, 47, s. 207–222.

⁸⁷ E. J. Lodree Jr., C. D. Geiger, X. Jiang, *Taxonomy for integrating scheduling theory and human factors: Review and research opportunities*, „International Journal of Industrial Ergonomics” 2009, 39, s. 39–51.

⁸⁸ E. Grosse, C. Glock, P. Neumann, *Human factors in order picking: a content analysis of the literature*, „International Journal of Production Research” 2017, 55 (5), s. 1260–1276.

⁸⁹ E. Grosse, C. Glock, M. Jaber, P. Neumann, *Incorporating human factors in order picking planning models: Framework and research opportunities*, „International Journal of Production Research” 2015, 53, s. 695–717.

⁹⁰ A. Otto, A. Scholl, *Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing*, „European Journal of Operational Research” 2011, 212, s. 277–285.

⁹¹ por. A. Scholl, R. Klein, *SALOME: A bidirectional branch and bound procedure for assembly line balancing*. *INFORMS*, „Journal on Computing” 1997, 9, s. 319–334; A. Scholl, R. Klein, *Balancing assembly lines effectively – A computational comparison*, „European Journal of Operational Research” 1999, 114, s. 50–58.

Xu, Ko, Cochran i Jung⁹² proponują linearyzację funkcji pomiaru ryzyka istniejących ergonomicznych metod pomiaru ryzyka, które często są nieliniowe, w celu dostosowania powstałych modeli do bogatego zestawu narzędzi programowania liniowego. Autorzy rozważają ergonomiczne środki dla kończyn górnych zalecane w wytycznych Amerykańskiej Konferencji Rządowych Higienistów Przemysłowych⁹³ i wprowadzają ergonomiczne ograniczenia częstotliwości wysiłku ręki, cyklu pracy, znormalizowanej siły szczytowej oraz przyspieszenia drgań. W ten sposób przekształcają funkcje krokowe w równania liniowe za pomocą standardowych technik programowania matematycznego. Autorzy testują opracowaną metodologię na studium przypadku producenta blendera i rozwiązują problem z gotowym oprogramowaniem IBM ILOG Cplex.

Jeśli ryzyko ergonomiczne na stanowiskach mierzy się jako prostą sumę parametrów przypisanych zadań specyficznych dla procesu, powstały problem równoważenia linii montażowej należy do klasy problemu balansowania linii montażowej ograniczonej czasowo i przestrzennie (TSALBP). Bautista, Alfaro-Pozo i Batalla-Garcia⁹⁴ skonfigurowali TSALBP z podaną liczbą stacji i parametrami ergonomicznymi zadań specyficznymi dla procesu. Rozważają dwa warianty problemowe różniące się funkcją celu: zminimalizować maksymalne ryzyko ergonomiczne dla stacji i zminimalizować absolutne odchylenia między ergonomicznymi zagrożeniami dla stacji. Autorzy proponują mierzenie ryzyka ergonomicznego w kilku wymiarach i agregowanie ich tylko przy obliczaniu funkcji celu. Każdy wymiar może reprezentować na przykład istniejącą metodę pomiaru ryzyka, taką jak OCRA, RULA lub NIOSH-Eq. Autorzy proponują również szereg formuł matematycznych dla funkcji obiektywnych, a opisujących czasy na stacji, wymagania przestrzenne i zagrożenia ergonomiczne na każdej stacji oraz przeprowadzają studium przypadku w fabryce Nissan Spanish Industrial Operations (NSIO) w Barcelonie w Hiszpanii. Sformułowany program liniowy z mieszaną liczbą całkowitą jest rozwiązany za pomocą gotowego oprogramowania IBM ILOG Cplex dla instancji z różnymi scenariuszami zapotrzebowania, różnymi wartościami maksymalnego dozwolonego ryzyka ergonomicznego na

⁹² Z. Xu, J. Ko, D. J. Cochran, M. Jung, *Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models*, „Computers & Industrial Engineering” 2012, 62, s. 431–441.

⁹³ ACGIH, 2010, TLVs and BEIs guidelines. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010, Ohio.

⁹⁴ J. Bautista, R. Alfaro-Pozo, C. Batalla-García, *Maximizing comfort in assembly lines with temporal, spatial and ergonomic attributes*, „International Journal of Computational Intelligence Systems” 2016, 9, s. 788–799.

stacji i różną liczbą stacji. W analizie obliczeniowej autorzy badają wpływ asortymentu produktów na salda linii montażowej oraz „solidność”, czyli „odporność sald linii montażowych, tj. wahań popytu.

W kilku badaniach zaproponowano zastosowanie całościowych, specjalnie zaprojektowanych ocen ekspertów dotyczących ergonomicznych zagrożeń zamiast dostępnych uniwersalnych metod pomiaru ryzyka. Na przykład Choi⁹⁵ formułuje 13 różnych parametrów opisujących obciążenie fizyczne dla każdego zadania. Parametry te należą do trzech kategorii:

- parametry środowiskowe (takie jak nieodpowiednia temperatura, światło, hałas, wibracje i narażenie na chemikalia),
- obciążenie fizyczne niewygodnych i statycznych pozycji (takich jak zginanie lub skręcanie),
- obciążenie fizyczne innych czynników (takich jak ciężar obsługiwanego ładunku lub częstotliwość czynności związanych z chwytaniem).

Eksperti mierzą parametry ergonomiczne każdego zadania za pomocą pięciopunktowej skali porządkowej. Następnie konstruuje się indeks dla każdej kategorii zagrożeń ergonomicznych jako sumę odpowiednich parametrów ergonomicznych. Obciążenia fizyczne każdej stacji w każdej kategorii ryzyka są równe sumie obciążeń fizycznych przypisanych zadań.

Mutlu i Özgörmü⁹⁶ wprowadzają rozmyte ograniczenia zawężające do pewnych granic obciążenie fizyczne każdej stacji. Autorzy wykorzystują szacunki ekspertów dotyczące fizycznych wymagań zadań w dziewięciopunktowej skali porządkowej od 0 („w ogóle nie”) do 9 („bardzo silny”). Stosują model programowania liniowego w studium przypadku firmy tekstylnej i rozwiązują go za pomocą gotowego oprogramowania IBM ILOG Cplex.

Większość artykułów uwzględnia sumę ważoną dwóch grup funkcji obiektywnych: ergonomicznej i ekonomicznej.

Tak więc Carnahan, Norman i Redfern⁹⁷ proponują algorytmy heurystyczne uszeregowania i dwa algorytmy genetyczne dla problemu równoważenia linii montażowej w celu zminimalizowania zmęczenia mięśni i czasu cyklu. Oba cele są traktowane jako suma

⁹⁵ G. Choi, *A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload*, „Computers & Industrial Engineering” 2009, 57, s. 395–400.

⁹⁶ Ö. Mutlu, E. Özgörmü, *A fuzzy assembly line balancing problem with physical workload constraints*, „International Journal of Production Research” 2012, 50, s. 5281–5291.

⁹⁷ B. J. Carnahan, B. A. Norman, M. S. Redfern, *Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing*, „IE Transactions” 2001, 33, s. 875–887.

ważona. Szacują zmęczenie wynikające z zapotrzebowania na chwytanie metodami Woodsa, Fishera i Andresa⁹⁸, biorąc pod uwagę przyłożoną siłę, czas trwania chwytania i indywidualne możliwości operatorów montażu.

Również Jaturanonda i Nanthavanij⁹⁹ oraz Jaturanonda, Nanthavanij i Das¹⁰⁰ formułują w swoich dwóch podobnych strategiach problem balansowania linii montażowej z dwoma celami przyjętymi jako ważona suma: cel równoważenia rozkładu czasów stacji (mierzony za pomocą współczynnik wariancji) i równoważenia ryzyka ergonomicznego między stacjami (mierzony współczynnikiem wariancji specyficznych dla danej stacji ocen ergonomicznych ryzyka). Oba artykuły oceniają ryzyko związane z RULA. Autorzy połączyli heurystyczną regułę pierwszeństwa Kilbridge i Westera¹⁰¹ z iterowaną lokalną procedurą wyszukiwania opartą na zamianach zadań i zmianach. Barathwaj, Raja i Gokulraj¹⁰² szukają równowagi linii montażowej z danym czasem cyklu i minimalizują funkcję celu obliczoną jako suma trzech składników: liczby stacji, średniego odchylenia czasów bezczynności stacji i całkowitej sumy zagrożenia ergonomiczne. Autorzy stosują RULA i badają zaprojektowany algorytm genetyczny dla instancji z 21 zadaniami pochodzącymi ze studium przypadku dostawcy części samochodowych.

Battini, Delorme, Dolgui, Persona i Sgarbossa¹⁰³ przeprowadzili szczegółowe badanie kompromisów między celami ekonomicznymi i ergonomicznymi dla różnych parametrów czasowych w studium przypadku montażu urządzeń ogrodniczych. Autorzy rozważają dwie zorientowane czasowo i dwie ergonomiczne funkcje celu – minimalizację wariancji czasów stacji, minimalizację czasu cyklu, minimalizację wariancji wydatków energii na stacjach i minimalizację maksymalnego wydatku energii na stacji – dla problemu równoważenia linii montażowej z podaną liczbą stacji.

⁹⁸ D. Woods, D. Fisher, R. Andres, *Minimizing fatigue during repetitive jobs: Optimal work rest schedules*, „Human Factors” 1997, 39, s. 83–101.

⁹⁹ C. Jaturanonda, S. Nanthavanij, *Heuristic procedure for two-criterion assembly line balancing problem*, „Industrial Engineering Er Management Systems” 2006, 5, s. 84–96.

¹⁰⁰ C. Jaturanonda, S. Nanthavanij, S. K. Das, *Heuristic procedure for the assembly line balancing problem with postural load smoothness*, „International Journal of Occupational Safety and Ergonomics” 2013, 19, s. 531–541.

¹⁰¹ M. Kilbridge, L. Wester, *A heuristic method of assembly line balancing*, „Journal of Industrial Engineering” 1961, 12, s. 292–298.

¹⁰² N. Barathwaj, P. Raja, S. Gokulraj, *Optimization of assembly line balancing using genetic algorithm*, „Journal of Central South University” 2015, 22, s. 3957–3969.

¹⁰³ D. Battini, X. Delorme, A. Dolgui, A. Persona, F. Sgarbossa, *Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure: A multi-objective model*, „International Journal of Production Research” 2016, 54, s. 824–845.

Sternatz¹⁰⁴ formułuje problem równoważenia linii montażowej, który opisuje typowe ograniczenia w produkcjach samochodowych, takie jak wiele miejsc pracy na stację, ograniczenia przypisywania zadań do stacji, czasy konfiguracji zależne od sekwencji i ograniczenia ergonomiczne zabraniające obciążania stacji o wysokim ryzyku ergonomicznym.

W kilku badaniach osiągnięto większą swobodę w zmniejszaniu ryzyka ergonomicznego poprzez jednoczesne traktowanie równoważenia linii montażowej i przydzielania pracowników do stacji.

Tak więc Kara, Atasagun, Gökçen, Hezer i Demirel¹⁰⁵ rozważają problem przypisania pracownika do stacji i balansowania linii dla stacji wieloosobowych. Pracownicy różnią się umiejętnościami i dziennymi wskaźnikami zużycia energii. Celem funkcji jest zminimalizowanie całkowitego kosztu (np. roczne wynagrodzenie, koszt sprzętu lub koszt oświetlenia). Dlatego zadania wymagające podobnego poziomu oświetlenia, podobnego sprzętu i tej samej pozycji roboczej powinny być najlepiej przypisane do tej samej stacji. Ponadto należy spełnić indywidualne limity całkowitego zużycia energii. W swoim studium przypadku autorzy rozwiązują problem z 30 zadaniami i siedmioma pracownikami za pomocą gotowego oprogramowania XPRESS Solver Engine.

Akyol i Baykasoglu¹⁰⁶ rozważają równoczesne przypisanie pracownika do stanowiska i równoważenie linii montażowej z kilkoma ułożonymi funkcjami celu. Celem pierwszego poziomu jest zminimalizowanie czasu cyklu dla danej liczby stacji. Dalszymi celami są zamysły ergonomiczne (należy dążyć do zminimalizowania średniego ryzyka ergonomicznego, aby zminimalizować średnie odchylenie ryzyka ergonomicznego między stacjami i zminimalizować liczbę stacji o wysokim ryzyku). Dla każdego pracownika istnieje zestaw zadań, które może wykonać, biorąc pod uwagę jego umiejętności i ograniczenia fizyczne. Autorzy mierzą ryzyko ergonomiczne za pomocą OCRA i proponują wielozadaniowy algorytm heurystyczny, aby rozwiązać sformułowany problem.

¹⁰⁴ J. Sternatz, *Enhanced multi-Hoffmann heuristic for efficiently solving real-world assembly line balancing problems in automotive industry*, „European Journal of Operational Research” 2014, 235, s. 740–754.

¹⁰⁵ Y. Kara, Y. Atasagun, H. Gökçen, S. Hezer, N. Demirel, *An integrated model to incorporate ergonomics and resource restrictions into assembly line balancing*, „International Journal of Computer Integrated Manufacturing” 2014, 27, s. 997–1007.

¹⁰⁶ S. D. Akyol, A. Baykasoglu, *ErgoALWABP: A multiple-rule based constructive randomized search algorithm for solving assembly line worker assignment and balancing problem under ergonomic risk factors*, „Journal of Intelligent Manufacturing” 2016, 30, s. 1–12.

Problemem równoważenia linii montażowej jest znalezienie przypisania zadań montażowych do stacji w celu zoptymalizowania określonej funkcji celu. Poniżej opisany zostanie wariant problemu zwany prostym problemem równoważenia linii montażowej (SALBP).

Formalnie prostym problemem równoważenia linii montażowej jest podział zestawu zadań $V = \{1, \dots, n\}$ z deterministycznymi czasami operacji tj w rozłączne podzbiory S_k / V przypisany do stacji $k / \{1, \dots, K\}$ ¹⁰⁷. SALBP opisuje proste linie montażowe, w których elementy są przenoszone wzdłuż zestawu stanowisk. Czas, zwany czasem cyklu c , w którym każdy przedmiot może spędzić na każdej stacji, jest stały. Przydział zadań musi uwzględniać ograniczenia czasu cyklu i pierwszeństwa.

SALBP to problem optymalizacji kombinatorycznej, a jego instancje mają z reguły dużą liczbę optymalnych rozwiązań. W przypadku SALBP-1 wynika to z faktu, że wiele różnych przypisań zadania odpowiada tej samej liczbie stacji roboczych. Dlatego możemy na przykład rozważyć cel pod kątem ergonomii i wybrać równowagę linii montażowej o najniższym ryzyku ergonomicznym.

Z wymienionych dotychczas okoliczności, powiązanych z interesami gospodarczymi przedsiębiorstwa (maksymalne korzyści, minimalizacja kosztów, zwiększenie opłacalności itd.) rodzi się następny opisywany w tej pracy czynnik, a mianowicie znaczenie wspierania pracowników o charakterze prezencyjnym i długofalowym. Z drugiej strony rodzi się także pytanie o odpowiednie koncepcje czy systemy zarządzania personelem, które stanowi wyzwanie dla firmowych przedstawicieli.

Zmniejszenie rozrzutu czasu poprzez wprowadzanie ograniczeń procesowych
Szczególnie w segmencie samochodów użytkowych można zaobserwować, że klienci wymagają i doceniają gamę produktów, która jest bogata w warianty. Jedną z konsekwencji zwiększonej liczby opcji wyboru jest powstawanie rozrzutu czasu. Oznacza to, że czas trwania czynności na danym takcie różni się w zależności od wariantu auta i może również trwać dłużej niż planowany czas taktu. Jest to związane z utratą wydajności, zmniejszoną produktywnością i problemami z jakością. Omawiając zmniejszenie rozrzutu czasu poprzez wprowadzenie restrykcji, warto zwrócić uwagę na klasyfikację podejść metodologicznych, która uwzględnia dwie podstawowe kategorie. **Pierwsza** z nich jest związana z opracowaniem zaawansowanych technik modelowania dokładnego. W tym aspekcie wyróżnić można następujące metody programowania:

¹⁰⁷ por. A. Scholl, *Balancing and sequencing of assembly lines*, Physica, Heidelberg 1999.

- *branch and bound*,
- *branch and cut*,
- programowanie na liczbach całkowitych.

Branch-and-bound to metoda matematyczna często stosowana w dziedzinie badań operacyjnych, której celem jest znalezienie najlepszego rozwiązania dla danego problemu optymalizacji całkowitoliczbowej. Metoda rozgałęzień i powiązań prowadzi do drzewa decyzyjnego, ale sama w sobie nie jest specjalną metodą, ale metodą przetwarzania, meta-metodą. Dla konkretnych kombinatorycznych problemów optymalizacyjnych powstają odpowiednio zaadaptowane algorytmy rozgałęziania i wiązania.

Branch and cut to metoda optymalizacji kombinatorycznej do rozwiązywania całkowitych programów liniowych (ILP), czyli problemów programowania liniowego (LP), w których niektóre lub wszystkie niewiadome są ograniczone do wartości całkowitych.

Warto dodać, iż metody te są zbieżne z treściami programowania matematycznego w zakresie rzeczywistej optymalizacji. Z kolei **druga** kategoria jest ściśle związana z rozwojem heurystyk (metaheurystyk). Pozwala to na szybsze i skuteczniejsze poszukiwanie jakościowych rozwiązań. Choć omówione procedury nie dają gwarancji uzyskania optymalnych rozwiązań, wywierają istotny wpływ na skrócenie wymaganego czasu obliczeń względem konkretnych pojęć. Jest to możliwe dzięki zmniejszeniu ocenianej przez algorytm przestrzeni poszukiwań. W większości przypadków metody heurystyczne dokonują głębokiego wglądu w dany problem, co pozwala na opracowanie szybkich algorytmów. Natomiast metody metaheurystyczne bazują przeważnie na strategii intensyfikacji w celu przeszukania najbliższej przestrzeni, co pozwala na identyfikację efektywnych rozwiązań. Niekiedy w celu „włamania się” do nieprzeszukanej dotychczas przestrzeni rozwiązań stosowane są też strategie dywersyfikacji.

Wszystkie prawidłowe rozwiązania ALB wymagają spełnienia co najmniej trzech warunków, które wspólnie stanowią minimalny zestaw ograniczeń. Po pierwsze: zachodzi konieczność przypisywania wszystkich zadań do konkretnej stacji po to, by po przedmiot poddawany obróbce wyjściu ze stacji końcowej był gotowy. Drugi warunek jest związany z koniecznością spełnienia wszystkich relacji pierwszeństwa. Jest to skorelowane z zapewnieniem braku przypisania żadnego zadania do wcześniejszej stacji niż w przypadku zadania

poprzedzającego ją. Trzecie ograniczenie dotyczy natomiast sumy czasów zadań na każdym stanowisku, która nie może przekraczać czasu cyklu.

Na szczególną uwagę zasługują też założenia SALB, czyli *Simple Assembly Line Balancing Problem* – sformułowanie Salvesona korzystające z terminologii ankiety¹⁰⁸. Pierwszym założeniem jest masowa produkcja jednorodnych produktów. Drugie z założeń skupia się natomiast na braku alternatyw przetwarzania. Innymi słowy wszystkie zadania przetwarzane są w trybie, który został uprzednio wstępnie określony. Czasy zadań są deterministyczne a jednocześnie integralne. Co więcej: linia uznawana jest za szeregową bez elementów równoległych i linii zasilających. Kolejnym założeniem jest linia stymulacji posiadająca stały, wspólny czas cyklu, jaki odpowiada pożądanej wyjściowej wielkości. Warto dodać, iż kolejność przetwarzania zadań ograniczona jest zasadom pierwszeństwa, a poza tymi ograniczeniami nie występują żadne inne ograniczenia przydziału zadań. Wyposażenie każdej stacji, w którego skład wchodzi maszyny oraz pracownicy, jest takie samo. Co istotne: żadne z zadań nie może zostać podzielone na kilka stacji. Niezwykle ważne jest, iż omówione założenia nie są spełniane przez wiele środowisk przemysłowych. W efekcie wpływa to na ogromną ilość badań nad poszczególnymi warunkami produkcji wymagającymi złagodzenia założeń (jednego lub kilku).

Bukchin i in. dodają, iż na tej samej linii – w przypadku linii modeli mieszanych – dochodzi do wytworzenia kilku różnych produktów w mieszanej kolejności¹⁰⁹. W zależności od modelu mogą występować różnice między szeregiem wymagań produkcyjnych, w tym m.in.:

- pierwszeństwa,
- zestawów zadań,
- czasów zadań.

W rezultacie każda ze stacji może posiadać odmienną zawartość pracy. Co ciekawe: zdaniem Deutscha ograniczenie cyklu winno zostać wymuszone na każdej stacji dla każdego modelu. Niemniej w modelu mieszanym coraz częściej odchodzi się od tego ograniczenia i czas cyklu ulega złagodzeniu. Ściślej ujmując: wymagana pozostaje wyłącznie średnia zawartość pracy na każdej stacji spełniającej zadany czas cyklu¹¹⁰.

¹⁰⁸ I. Baybars, *A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem*, „Management Sciences” 1986, 32, s. 909–932.

¹⁰⁹ J. Bukchin, E. Dar-El, J. Rubinovitz, *Mixed Model Assembly Line Design in a Make-to-order Environment*, „Computers & Industrial Engineering” 2002, 41, s. 405–421.

¹¹⁰ D. Deutsch, *A Branch and Bound Technique for Mixed-Product Assembly Line Balancing*, Ph. D. Dissertation, Arizona State University, 1971.

W celu wykorzystania efektu kompensacyjnego elementów obrabianych cechujących się niską i dużą zawartością pracy stosowana jest funkcja ustawiania ich w schodkowej kolejności. Jednak wykorzystanie jej stanowi pobudkę dla problemu planowania produkcji w taki sposób, by ustalona kolejność była jak najbardziej optymalna. Pierwotny problem przejmowany jest przez schemat dekompozycji modelu. Wówczas zastępowany jest on przez tożsame, a zarazem niezależne instancje ALB dla poszczególnych modeli. Wielu autorów (m.in. Roberts i Villa¹¹¹, Rao¹¹²) w swych publikacjach zastąpiło zadanie dotyczące wielu modeli, zestawem zadań. W efekcie każda nowa dyrektywa była ściśle związana z jednym modelem pochodzącym z oryginalnego, wielomodelowego zadania. Takie oddzielenie zapewnia dostęp do nieosiągalnych dotąd przez połączenie zadań, skuteczniejszych rozwiązań ALB. Innymi słowy: zadania wielomodelowe mogą być z powodzeniem wykonywane na innych stacjach dla wszystkich modeli.

Warto nadmienić, że przestrzeń rozwiązań dla problemu dotyczącego sprzężonych zadań wielomodelowych stanowi swoisty podzbiór przestrzeni rozwiązań nowego problemu obejmującego swym zakresem odsprężone zadania pojedynczego modelu. Tym samym możliwe staje się zidentyfikowanie efektywniejszych rozwiązań. Co istotne, schemat dekompozycji modelu nie wiąże się wówczas z koniecznością adaptacji w metodologii rozwiązania. W zrównoległaniu zawarto wielomodelowe aspekty problemu. Dla każdego równoległego wystąpienia ALB zachodzi możliwość zastosowania metod rozwiązania pojedynczego modelu.

Na uwagę zasługuje też przekształcenie problemu dotyczącego modelu mieszanego przez Thomopoulou¹¹³ oraz Macaskilla¹¹⁴, którzy skupili się na wersji jednego aspektu z uwzględnieniem uśrednionego czasu dla każdego zadania. W omawianej metodzie zmienność pomiędzy elementami w zawartości pracy jest ignorowana, co może przyczyniać się do występowania zakłóceń w działaniu linii. Próba kompensacji owego efektu została podjęta przez Thomopoulou. W tym celu dla każdego modelu zminimalizowano – do średniego czasu pracy stanowisk w modelach – drugorzędny cel sumy bezwzględnych odchyleń rzeczywistych czasów stanowisk. Stanowi to wczesną formę poziomego równoważenia, które dąży do wyrównania

¹¹¹ S. Roberts, C. Villa, *On a Multiproduct Assembly Line Balancing Problem*, „AIIE Transactions” 1970, 2, s. 361–364.

¹¹² D. Rao, *Single and Mixed-model Assembly Line Balancing Methods for both Deterministic and Normally Distributed Work Element Times*, M.S. Thesis, Industrial Engineering Department, Oregon State University, 1971.

¹¹³ N. Thomopoulos, *Mixed Model Line Balancing with Smoothed Station Assignments*, „Management Science” 1970, 16, s. 593–603.

¹¹⁴ J. Macaskill, *Production-line Balances for Mixed-model Lines*, „Management Science” 1972, 19, s. 423–434.

zawartości pracy na stacji we wszelkich modelach alternatywnych. Ma to na celu zapewnienie większej odporności równowagi wynikowej na zmiany w zapotrzebowaniu na dany model i determinuje jednocześnie sekwencjonowanie produkcji. Cel równoważenia poziomego został udoskonalony przez Domschke, Klein i Scholl¹¹⁵, którzy przypisywali mu istotę zminimalizowania sumy czasu przeciążenia pracą. Innymi słowy tyczy się to zawartości pracy we wszystkich modelach oraz stacjach, która przekracza czas cyklu. Warto zwrócić też uwagę na podejście autorstwa Vilarinho i Simaria¹¹⁶ dotyczące symulowanego wyżarzania. Autorzy skupili się nie tylko na celach równoważenia poziomego, ale też pionowego, uwzględniając model z równoległymi stacjami i dodatkowymi ograniczeniami przypisania.

Istnieje tendencja do wykazywania zmienności przez poszczególne czasy zadań. Jest ona widoczna głównie w środowiskach cechujących się jednocześnie niską automatyzacją i dużą złożonością. Metody ignorujące ową zmienność mogą okazać się nieefektywne. Jest to spowodowane zbyt obszerną zawartością rozwiązań nieuwzględniających prawdopodobieństwa przekroczenia czasu cyklu przez czasy stacji. W tym zakresie na uwagę zasługują m.in. badania przeprowadzone przez Moodie i Young, którzy w pierwszej kolejności – zakładając normalne rozłożenie czasów zadań – przeanalizowali problem związany z równoważeniem linii stochastycznych. Kolejnym etapem badania była ocena całkowitej zmienności obciążenia stacji. Zadania zostały przeniesione na różne stacje wskutek przeprowadzenia procedury heurystycznej. Pozwoliło to na identyfikację minimalizacji przekroczenia czasu cyklu o największym prawdopodobieństwie. Podejście programowania dynamicznego (PD) zostało przebadane przez Kao¹¹⁷, Sniedovich¹¹⁸ i Carrawaya¹¹⁹, którzy w swoich kwerendach skupili się na ogólniejszych rozkładach dla czasów zadań. Algorytm optymalizacji stochastycznej COMSOAL został wykorzystany przez Nkasu oraz Leung w celu wygenerowania zestawów rozwiązań o charakterze alternatywnym.

¹¹⁵ W. R. Domschke, A. Scholl, *Antizipative Leistungsabstimmung bei moderner Variantenfließfertigung*, „Zeitschrift für Betriebswirtschaft” 1996, 66, s. 1465–1490.

¹¹⁶ P. Vilarinho, A. Simaria, *A Two-stage Heuristic Method for Balancing Mixed-model Assembly Lines with Parallel Workstations*, „International Journal of Production Research” 2002, 40, s. 1405–1420.

¹¹⁷ E. Kao, *A Preference Order Dynamic Program for Stochastic Assembly Line Balancing*, „Management Science” 1976, 22, s. 1097–1104.

¹¹⁸ M. Sniedovich, *Analysis of a Preference Order Assembly Line Problem*, „Management Science” 1981, 27, s. 1067–1080.

¹¹⁹ R. Carraway, *A Dynamic Programming Approach to Stochastic Assembly Line Balancing*, „Management Science” 1989, 35, s. 459–471.

Heurystyki mogą być też stosowane w celu oszacowania górnych granic, czego dokonali Sphicas i Silverman¹²⁰. Granice te nie zostaną – z określonym prawdopodobieństwem – przekroczone przez zadania. Autorzy w tym celu, za pomocą współczynnika bezpieczeństwa, przekształcili problem natury stochastycznej w problem deterministyczny. W tej metodzie transformacji pominięto jednak scenariusze związane z przekroczeniem czasu cyklu. W przyszłości wielu naukowców podjęło próbę wyjaśnienia przeciążenia stacji wskutek wprowadzenia interwencyjnej polityki. Wśród nich na uwagę zasługują Kottas i Lau¹²¹, którzy w zorientowanym na koszty podejściu do równoważenia stochastycznej linii założyli zatrudnienie dodatkowych pracowników na stacjach. Skutkiem ubocznym tego rozwiązania może być niekompletna praca.

W literaturze można znaleźć wiele metod opisujących problem balansu linii montażowej. Wszystkie jednak dotyczą oceny balansu całej linii i niestety nie pozwalają na szczegółową analizę poszczególnych stacji montażowych i rotujących tam pracowników z różnymi niepełnosprawnościami. Zdobyta wiedza posłuży jako baza do opracowania modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej, który uwzględni indywidualne cechy pracownika.

1.2. System analityczny MTM jako narzędzie wspomagające balansowanie linii montażowej

Od wielu już lat niektóre **koncerny samochodowe na liniach montażowych przyjęły metodę MTM-UAS**, aby wyznaczyć podstawowy czas na wykonanie ruchu czynności opisanej na arkuszach procesów, w których cykle produkcyjne są ustrukturyzowane i mierzone za pomocą standardowego i uniwersalnego systemu¹²². Wstępne ustalenie ruchów ma na celu uzyskanie dokładnego czasu cyklu aktywności, bez wpływu jakiegokolwiek środowiska zewnętrznego¹²³. Ponieważ MTM-UAS opiera się na z góry określonych czasach, zapewnia symulację czynności,

¹²⁰ G. Sphicas, F. Silverman, *Deterministic Equivalents for Stochastic Assembly Line Balancing*, „AIIE Transactions” 1976, 8, s. 280–282.

¹²¹ J. Kottas, H. Lau, *A Cost-oriented Approach to Stochastic Line Balancing*, „AIIE Transactions” 1973, 5, s. 164–171.

¹²² D. Colombini, E. Occhipinti, A. Grieco, *Risk Assessment and Management of Repetitive Movements and Exertions of Upper Limbs*, „Elsevier Ergonomics Book Series”, vol. 2, Amsterdam Elsevier, 2002.

¹²³ G. di Gironimo, C. Di Martino, A. Lanzotti, A. Marzano, G. Russo, *Improving MTM-UAS to predetermine automotive maintenance times*, „International Journal on Interactive Design and Manufacturing” (IJIDeM) 2012, 6, s. 265–273.

planowanie stanowiska pracy przy użyciu metody najkrótszego czasu cyklu bez zatrzymywania linii produkcyjnej do obserwacji. W ten sposób MTM-UAS stał się narzędziem poprawy procesu, a nie tylko narzędziem pomiarowym¹²⁴. Melo i in.¹²⁵ dokonali balansowania linii produkcyjnej w firmie motoryzacyjnej. Aby obliczyć czas cyklu operacji, wykorzystali analizę czasu narzędziem MTM-UAS. W rezultacie mogą skrócić czas wykonywania każdego działania bez wpływu na wydajność produkcyjną linii.

Methods Time Measurement (w skrócie MTM) jest metodą rozkładającą analizowany proces na ruchy podstawowe zwane elementarnymi. Każdy z elementów jest odpowiednio zmierzony, aby mógł posłużyć do analizy. W celu wyodrębnienia poszczególnych ruchów podstawowych i ustalenia czasu niezbędnego do wykonania konkretnej czynności, w zakładach produkcyjnych sfilmowano liczne przebiegi pracy. Na podstawie materiału wideo wyliczono liczbę klatek na jeden ruch (przy prędkości filmu równiej 16 zdjęć na sekundę) i tym samym ustalono czas rzeczywisty czynności. *Methods Time Measurement* jest jednym ze sposobów normalizacji i standaryzacji procesów¹²⁶. Na potrzeby metody ustalono czasy normatywne 17 ruchów podstawowych. Są one jednak wykorzystywane w produkcji przedmiotów bardzo precyzyjnych np. produkcja zegarków czy telefonów. Przemysł motoryzacyjny korzysta z metody MTM UAS (Uniwersalny System Analityczny).

Czas wykonania czynności ma bardzo ważne znaczenie, gdyż przekłada się bezpośrednio na wartości pozostałych wielkości. W umiejętnym gospodarowaniu czasem wymaga się uzyskania wysokiego współczynnika zwymiarowania ważnych procesów produkcyjnych przedsiębiorstwa. Zarządzanie czasem samo w sobie nie wiąże się z rozwojem procesu. Należy pamiętać, że mając wpływ na czas, posiada się realny wpływ na jakość wytwarzanego produktu.

MTM może być również bardzo przydatny przy optymalizowaniu systemu produkcji. Na etapie planowania należy określić podstawowe cele usprawnienia, jak na przykład optymalizacji produkcji o wysokiej wariantowości¹²⁷.

Elementami, które można poddać analizie, są:

- przebieg ruchu,

¹²⁴ Ibidem.

¹²⁵ D. J. Melo, 2014, *Utilização do método MTM-UAS como ferramenta de análise e aumento de produtividade*, XIV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial, 09.2014, Salvador, Ba/Brasil.

¹²⁶ M. Kujawa, D. Mikła, *MTM – podstawa do optymalizacji procesów logistycznych*, Różne oblicza logistyki. Zbiór prac studentów, 2018, s. 59-69

¹²⁷ Podręcznik MTM-1. Dokument podstawowego kursu nauki, niemieckie stowarzyszenie MTM, 2017, Hamburg.

- struktura pracy,
- przepływ materiału.

Dzięki przeprowadzonej analizie przed rozpoczęciem pracy można dokładnie ustalić jej sposób oraz czas wykonania. Przeprowadzenie analizy jest możliwe wyłącznie w oparciu o przyjęte standardy, co pozwoli na wyeliminowanie dużej części błędów w procesie. Standardy powinny być tak opracowane, aby każdy z pracowników mógł odtworzyć proces w ten sam sposób, czyli przejrzyste, łatwe do nauczenia się i stosowania.

Na jakość procesu wpływa metoda pracy, która jest uwarunkowana sprawnością wykonującego. Przez sprawność rozumiemy zdolność do wykonywania ruchów nabytą podczas realizowania zadań roboczych, zależną od umiejętności, a także doświadczenia i wprawy. Czas wykonywania zadania będzie zmniejszał się wraz ze wzrostem liczby powtórzeń. Jeśli weźmie się pod uwagę ruchy, które wymagają dużej wprawy wykonującego, a także takie, które takiej wprawy nie wymagają, wówczas można zauważyć, że poziom wprawy nie zależy od prędkości ruchu, lecz głównie od stosowanej metody pracy. Nowo poznana operacja wymaga na początku większej liczby ruchów niż operacja znana.

Nowo wprowadzona operacja bez dostatecznej ilości ćwiczeń składa się z szeregu nieporadnych ruchów, ruchów pomocniczych i funkcji wzrokowych, które to przekładają się na wydłużenie czasu obsługi danej czynności. Ćwiczenia stanowiskowe przyczyniają się do poprawienia koordynacji ruchów oraz zmniejszają nakład kontroli niezbędnej do ich wykonania. Konsekwencją wykonywanych ćwiczeń jest wypracowanie metody pracy.

Już na etapie projektowania można w łatwy sposób określić ergonomicznie idealne miejsce do pracy, jak również stwierdzić i wyeliminować zaistniałe kolizje czy przeanalizować czas potrzebny na czynności w procesie produkcyjnym. Czas jest jednym z bardziej istotnych elementów przy kształtowaniu i wprowadzaniu produktu. Roztropne gospodarowanie tym czynnikiem rozpoczyna się już na etapie rozwoju produktu. Jest on ściśle powiązany z kwestią finansową w przedsiębiorstwie – im więcej czasu upłynęło, tym droższe staje się znalezienie ponownego rozwiązania.

System analityczny MTM ma na celu opis i kwantyfikację ruchów wykonywanych przez człowieka. Regułą kształtowania optymalnej metody pracy jest wykonanie zadania z jak

najmniejszą liczbą ruchów przy możliwie najmniejszej czasochłonności procesu¹²⁸.

MTM opiera się na przedstawionych wyżej zasadach. Przekazuje praktyczne zastosowanie technik pomiaru czasu w takich obszarach, jak: kształtowanie produktów i środków pracy, ergonomiczne kształtowanie systemów pracy oraz ciągły proces ulepszania procesów w różnych obszarach przedsiębiorstwa. Pomiar czasu pracy są bardzo istotnym elementem z uwagi na nowoczesne systemy symulacji komputerowych dające możliwości odwzorowania sposobu pracy i jego wizualizacji. MTM może być pomocny przy planowaniu liczby linii produkcyjnych, a konkretnie do zdefiniowania jej przepustowości¹²⁹.

Często niewydolnie zaplanowany proces będzie wąskim gardłem dla całego systemu. Wszelkiego rodzaju kwantyfikowalne wartości są istotne z poziomu wykonywanej symulacji i projektu przepływu materiału. Metodę MTM możemy zastosować we wszystkich sektorach przemysłu. Zaletą jej standaryzacji jest łatwość w przyswojeniu i interpretacji. Czas wykonywania operacji zależy od wybranej metody. Winna ona być stosowana na całym świecie według jednolitych standardów.

Dodatkowym atutem metody jest miarodajność, gdyż do analizy tempa pracy brana jest pod uwagę wydajność wzorcowa, czyli tempo średnio wprawionego człowieka, które potrafi on utrzymać bez zmęczenia.

Istotnym elementem dostosowania pracy do człowieka jest projektowanie prawidłowych stosunków przestrzennych na stanowisku roboczym, czyli zapewnienie człowiekowi pracy z uwzględnieniem dogodnego dla niego zasięgu rąk (obszar pracy) i dogodnej pozycji ciała, tak aby mógł wykonywać ruchy swobodnie i bez zbędnego wysiłku, a – co za tym idzie – bez zmęczenia, bezpiecznie i wydajnie¹³⁰. Celem kształtowania przebiegu ruchów z użyciem metody ruchów elementarnych jest znalezienie ich prostszych odpowiedników, tzn. mniej obciążających i męczących, a także zagęszczenie ruchów przez przejście na pracę oburęczną, która jest postrzegana przez pracowników jako bardziej rytmiczna i przyjemniejsza. Typową cechą zastosowania metod MTM w przedsiębiorstwach produkcyjnych jest dążenie do bezinwestycyjnej racjonalizacji, czyli do polepszania warunków systemów pracy przy stosunkowo małych nakładach

¹²⁸ A. Grzelczak, *Ergonomia w organizacji pracy. Analiza wybranych aspektów na przykładzie Metody Ruchów Elementarnych*, „Zeszyt Naukowy Politechniki Poznańskiej. Organizacja i Zarządzanie” 2014, nr 63, s. 77–89.

¹²⁹ por. J. Żurek, O. Ciszak, R. Cieślak, M. Suszyński, *Metody badania czasu pracy w procesie montażu*, „Technologia i automatyzacja montażu” 2006, nr 3, s. 43–46; J. Żurek, O. Ciszak, R. Cieślak, M. Suszyński, *Dobór metod badania czasu pracy w procesie montażu*, „Technologia i automatyzacja montażu” 2007, nr 2 i 3, s. 30–35.

¹³⁰ L. Pacholski (red.), *Ergonomia*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1986, s. 110.

inwestycyjnych w środki techniki, takie jak urządzenia (manipulatory, balansery), narzędzia (wkrętarki) i inne środki pracy (np. wózki na części), które mają doprowadzić do zmniejszenia obciążenia pracownika¹³¹.

Przypisywanie zadań w przemyśle produkcyjnym jest bardzo ważne, szczególnie gdy rozważane są linie montażowe (równoważenie/balansowanie linii). Rzeczywiście, po obliczeniu całkowitej zawartości pracy (całkowity podstawowy czas wszystkich działań niezbędnych do wykonania pełnego zadania), biorąc pod uwagę docelową liczbę jednostek do wyprodukowania i dostępny czas pracy na zmianie (czas trwania zmiany minus przerwy), możliwe jest ustawienie tempa przepływu produkcji (*Takt Time* – Tk).

Opisana powyżej metoda do analitycznego wyznaczania czasu, pomimo iż ma 75 lat, jest nadal skuteczna i stosowana w przemyśle do ustalania obiektywnej i standardowej wartości czasu.

1.3. Mierniki do oceny zbalansowania linii montażowej

W celu oceny dobroci zbalansowania linii montażowej należy uwzględnić takie wskaźniki jak: produktywność zaplanowanego procesu oraz stopień bezpieczeństwa pracy. Produktywność jest powszechnie definiowana jako stosunek wielkości produkcji do wielkości nakładów. Innymi słowy mierzy ona efektywność wykorzystania czynników produkcji, takich jak praca i kapitał, w gospodarce w celu wytworzenia danego poziomu produkcji. Inwestycję w nową technologię, taką jak automatyzacja stanowiska pracy, pozwala w łatwy sposób oszacować zwrot z inwestycji. W przypadku inwestowania w poprawę warunków pracy trudno jest argumentować, że dana inwestycja jest dla przedsiębiorstwa ważna i przyniesie zwrot.

W związku z tym ważne jest, aby przedsiębiorstwa zapewniały utrzymanie kompromisów między celami ekonomicznymi i ergonomicznymi. W tym celu należy wskazać, jak takie kompromisy zapewnić i nazwać mierniki (głównie do oceny ergonomicznej).

Praca w produkcji samochodów odbywa się często na trzy zmiany, by zmaksymalizować efektywność i jak najlepiej wykorzystać infrastrukturę oraz oprzyrządowanie. O ile inwestycje w poprawę produktywności łatwo udowodnić na liczbach, to inwestycje w poprawę ergonomii jest już trudniej udowodnić.

¹³¹ MTM – Metoda podstawowa, Deutsche MTM-Vereinigung e.V., Hamburg 2004, s. 367.

Przykład: ustawienie robota o wartości 500.000 Euro może zastąpić 1 pracownika i w skali czasu można mówić o zysku, jaki wygenerowała ta inwestycja.

Zainwestowanie 500.000 Euro w poprawę ergonomii można przeliczyć w szczególnych przypadkach na ilość punktów ergonomicznych, natomiast nie można tutaj wykazać, jaki jest zysk, ponieważ nie ma przelicznika Euro = punkt ergo.

Produktywność jest uważana za kluczowe źródło wzrostu gospodarczego i konkurencyjności i jako taka stanowi podstawową informację statystyczną dla wielu porównań międzynarodowych i ocen wyników poszczególnych krajów. Na przykład dane dotyczące wydajności są wykorzystywane do badania wpływu regulacji dotyczących rynku produktów i rynku pracy na wyniki gospodarcze. Wzrost produktywności stanowi ważny element w modelowaniu zdolności produkcyjnych gospodarek. Pozwala on również analitykom określić wykorzystanie mocy produkcyjnych, co z kolei umożliwia ocenę pozycji gospodarek w cyklu koniunkturalnym i prognozowanie wzrostu gospodarczego. Co więcej: zdolności produkcyjne są wykorzystywane do oceny popytu i presji inflacyjnej.

Jak podają M. Rostek i R. Knosala, produktywność jest to stosunek wielkości produkcji wytworzonej i sprzedanej (dostarczanej do klienta) w rozpatrywanym okresie do ilości wykorzystywanych i/lub zużytych w tym okresie zasobów wejściowych. Produktywność dzieli się na całkowitą oraz cząstkową. Całkowita produktywność jest to stosunek całkowitej ilości produkcji do łącznej ilości zasobów zużytych lub wykorzystywanych do jej wytworzenia¹³². Powyższa zależność wyraża się następującym wzorem:

¹³² M. Rostek, R. Knosala, *Badanie produktywności procesów logistycznych w przedsiębiorstwie produkcyjnym*, „Zarządzanie Przedsiębiorstwem” 2014, vol. 17, nr 1, s. 41–48, <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-4481f468-8f02-4c93-a6a1-24e688ebeabe>, 2014.

$$P_i = \frac{\sum_{t=1}^T Q_{ti}^o p_{ti}^o}{\sum_{r=1}^R Q_{ri}^l p_{ri}^l} \quad (1.4.1)$$

gdzie:

P_i – produktywność całkowita w okresie i ;

$t, r = 1, 2, \dots$;

T – rodzaje produktów wytwarzanych przez system;

Q_{ti}^o – ilość produktów rodzaju t wyprodukowana i dostarczona do odbiorców w okresie i ;

p_{ti}^o – cena jednostkowa produktu rodzaju t uzyskiwana w okresie i ;

R – rodzaje zasobów zużywanych/wykorzystywanych przez system;

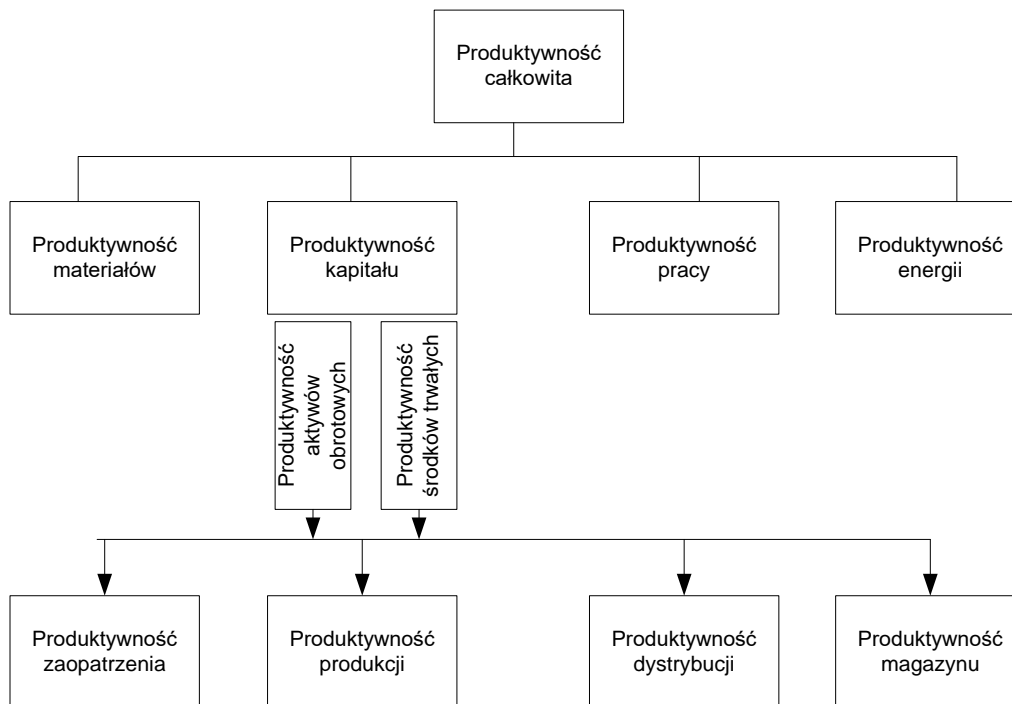
Q_{ri}^l – ilość zasobu wejściowego rodzaju r zużywana (wykorzystywana) w okresie i ;

p_{ri}^l – koszt jednostkowy zasobu rodzaju r płacony w okresie i .

Najczęściej w literaturze przedmiotu omawianymi produktywnościami cząstkowymi są:

- stosunek produkcji do nakładów kapitałowych,
- stosunek produkcji do nakładów energii,
- stosunek produkcji do nakładów materiałów,
- stosunek produkcji do nakładów pracy zasobów ludzkich.

Wszystkie systemy produktywności prezentuje wykres:



Rysunek 6. Systemy produktywności; Źródło: opracowanie własne.

Produktywność produkcji jest zatem wynikiem produktywności materiałów, kapitału, pracy oraz energii. W badaniach empirycznych dotyczących pomiaru nakładu pracy w produkcji godziny pracy są traktowane w różny sposób. Jednym z podejść jest całkowite pominięcie godzin pracy i mierzenie wkładu pracy za pomocą liczby zatrudnionych pracowników. Innym podejściem jest wykorzystanie godzin pracy, czyli iloczynu liczby pracowników i średniej liczby godzin przypadających na pracownika, co sugeruje, że dana proporcjonalna zmiana liczby pracowników ma taki sam wpływ na nakład pracy, jak taka sama proporcjonalna zmiana liczby godzin pracy na pracownika.

Przetrwanie branż korporacyjnych zależy od maksymalizacji zysków z istniejących możliwości, przy jednoczesnym uznaniu i dostosowaniu się do faktu, że to, co działa dziś, niekoniecznie musi działać w przyszłości. Aby osiągnąć lub utrzymać rentowność swoich firm, liderzy przedsiębiorstw muszą ciężko pracować nad zaangażowaniem pracowników. Jednak mogą oni mieć czasem trudności z dostosowaniem organizacji do zmian, jeśli ograniczają swoją uwagę do istniejących produktów i procesów. Bardzo ważne jest zrozumienie faktu, że zarządzanie równowagą pomiędzy relacjami z pracownikami, wprowadzanie innowacji i maksymalizacja zysków ma kluczowe znaczenie dla dalszego rozwoju przedsiębiorstwa.

Efektywność i bezpieczeństwo pracy w systemie zmianowym jest tematem budzącym duże zainteresowanie z dwóch głównych powodów. Po pierwsze: wiele największych wypadków, takich jak Bhopal, Three Mile Island, Czarnobyl, wyciek chemikaliów do Renu i Exxon Valdez, miało miejsce w nocy i zwróciło uwagę zarówno na ryzyko, jak i na koszty obniżonego bezpieczeństwa w systemach zmianowych. Po drugie: praca zmianowa jest często wprowadzana z powodów czysto ekonomicznych, aby zmaksymalizować wykorzystanie kosztownego sprzętu. Podczas gdy wielu badaczy zajmujących się pracą zmianową twierdzi, że praktyka ta powinna być odradzana ze względu na koszty zdrowotne i koszty dobrego samopoczucia poszczególnych pracowników zmianowych, argumenty ekonomiczne przemawiające za wprowadzeniem pracy zmianowej zależą w oczywisty sposób od utrzymania wydajności i bezpieczeństwa na akceptowalnym poziomie. Upośledzenie wydajności poszczególnych osób pracujących w systemie zmianowym może zatem poważnie osłabić wszelkie potencjalne korzyści ekonomiczne wynikające z jego wprowadzenia. Niedobór bezpieczeństwa i produktywności w systemach zmianowych będzie niemal na pewno odzwierciedlał połączony wpływ wielu czynników, m.in. psychospołeczne i fizyczne skutki

zdrowotne typowo związane z nienormowanym czasem pracy itd.¹³³. Od dawna wiadomo, że wydajność ludzi przy wykonywaniu różnych zadań nie jest stała, lecz zmienia się w ciągu normalnego dnia pracy. Wcześni teoretycy przypisywali to albo narastaniu zmęczenia umysłowego w okresie czuwania, albo leżącemu u podstaw rytmowi senności, który był niezależny od tego, czy ludzie rzeczywiście spali. Badania potwierdziły, że oba te generatory przyczyniają się do okołodobowej zmienności wyników¹³⁴.

Niestety, choć te modele matematyczne mogą uwzględniać opisane powyżej tendencje w zakresie wydajności, to nie uwzględniają tendencji w zakresie ryzyka. Tak więc, choć modele przewidywałyby, że bezpieczeństwo powinno być najniższe w nocy, przewidywałyby również, że powinno być ono najwyższe na zmianie popołudniowej, co wyraźnie nie ma miejsca. Podobnie modele przewidywałyby, że ryzyko będzie najwyższe o godzinie 4.00 rano, podczas gdy w rzeczywistości jest ono wtedy znacznie niższe niż o 12:00 w nocy. Wreszcie modele przewidywałyby, że ryzyko powinno pozostać na stałym poziomie lub nieznacznie się zmniejszać podczas kolejnych zmian nocnych, a nie wykazywać nieznaczny wzrost. Przyczyny tak znacznych rozbieżności między przewidywaniami obecnych modeli a obiektywnie stwierdzonymi tendencjami w zakresie ryzyka są na razie niejasne, ale mogą wynikać z dodatkowych, jeszcze niezidentyfikowanych czynników, które należy uwzględnić w modelach, i/lub z możliwości, że ryzyko nie jest liniowo związane z czujnością i wydajnością w zadaniach laboratoryjnych. Inne badania, głównie laboratoryjne, wykazały, że tendencje w zakresie wydajności w ciągu dnia różnią się w zależności od rodzaju danego zadania. Ogólnie rzecz biorąc, wydaje się, że szybkość (w niektórych przypadkach także dokładność) wykonywania prostych zadań percepcyjno-ruchowych rośnie przez większą część dnia i z ewentualnym wyjątkiem poobiedniego spadku pokrywa się ze zmianami temperatury ciała¹³⁵. Z kolei pamięć krótkotrwała, a w szczególności pamięć informacji przedstawionych prozą, osiąga maksimum rano (między około 8:00 a 11:00) i zmniejsza się przez większą część dnia. Wydaje się jednak mało prawdopodobne, by niepowodzenie modeli matematycznych w uwzględnieniu trendów w zakresie ryzyka wynikało

¹³³ T. Åkertedt, *Shift work and disturbed sleep/wakefulness*, „Occup Med” 2003, 53, s. 89–94, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12637592/>, 8.03.2003.

¹³⁴ J. Carrier, T. H. Monk, *Circadian rhythms in performance: new trends*, „Chronobiol Int.” 2000, 17, s. 719–732, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11128289/>, 12.07.2000.

¹³⁵ P. Tucker, N. Sytnik, I. Macdonald, S. Folkard, *Temporaldeterminants of accident risk: the ‘2–4 h shiftphenomenon’*, [w:] S. Hornberger, P. Knauth, G. Costa, S. Folkard, *Shiftwork in the 21st Century*, Peter Lang, Frankfurt, 2000, s. 99–105, https://www.researchgate.net/publication/8001985_Shiftwork_Safety_Sleepiness_and_Sleep, 1.02.2005.

z obciążenia pamięci, ponieważ większość badań nad ryzykiem opierała się na wysoce powtarzalnych zadaniach percepcyjno-ruchowych.

Szczególnie w przypadku produkcji samochodów użytkowych koszty są bardzo ściśle związane z czasem potrzebnym do wykonania zadania montażowego. Dlatego też podejście do rachunku kosztów docelowych, jak również podejście do śledzenia kosztów zostało uproszczone, aby skupić się na czasie montażu, a nie na całkowitych kosztach¹³⁶. EHPV (*engineered Hours Per Vehicle*) jest stosowany w przemyśle motoryzacyjnym do pomiaru kosztów montażu wszystkich elementów niezbędnych do powstania samochodu. Pomiar skupia się jedynie na konkretnych czasach produkcji i montażu (przykręcanie, zabudowa części). Niezbędne, ale pomocnicze zadania (drogi do części, rozpakowywanie części) są pomijane, ponieważ nie są to stałe czasy i w zależności od miejsca zabudowy (dwie różne fabryki) mogą się od siebie różnić. Konstruktorzy pojazdów mają na celu minimalizację EHPV. Przykładem redukcji EHPV może być takie zaprojektowanie konstrukcji danego elementu (np. osłona podwozia), aby zredukować ilość przykręcanych śrub.

1.4. Czynniki niepożądane w organizacji pracy ludzkiej na linii montażowej

Ergonomiczne zbalansowanie linii montażowej będzie wiązało się także z ograniczeniem występowania czynników uznawanych za niepożądane, a tym samym znalezienie takiego rozwiązania, aby całkowity koszt produkcji pojedynczego produktu był minimalny przy jednoczesnym zachowaniu dobrostanu pracowników (jako jednego z celów istnienia organizacji). Skutkiem nieodpowiedniej organizacji pracy pozostaje bezcelowe zużycie środków produkcji oraz pracy człowieka nieprzynoszące efektów ekonomicznych współmiernych do nakładów, jak również nieprzyczyniające się do zagwarantowania optymalnych warunków dla pracującego człowieka, które powinny się przekładać na humanizację pracy¹³⁷.

Zagadnienie walki z marnotrawstwem stało się tematem przewodnim wielu różnorodnych koncepcji naukowych. Jedną z nich jest Lean Management – LM, czyli swoista wizja zarządzania mająca na celu stałe dążenie do perfekcji w zakresie działań podejmowanych w przedsiębiorstwie. Innymi słowy: regularne i ponawiające się eliminowanie marnotrawstwa umożliwia doskonalenie

¹³⁶ T. Streichert, M. Traub, *Elektrik/Elektronik-Architekturen im Kraftfahrzeug*, Springer, Heidelberg 2012.

¹³⁷ T. Kożak-Siara, A. Olak, *Organizowanie pracy zasobów ludzkich w zwinnym przedsiębiorstwie*, „Współczesne Problemy Zarządzania” 2021, 2, s. 23.

funkcjonowania organizacji. Ścisłej ujmując: jest to związane z optymalizacją tworzenia oraz przepływu wartości w sposób kompleksowy – w całym procesie wytwarzania w danym przedsiębiorstwie¹³⁸. Według autora koncepcji F. Damrath, marnotrawstwo powinno być definiowane jako *muda*, *mura*, *muri* (tzw. 3M). Pierwsze z tych japońskich słów – *muda* – odnosi się do marnotrawstwa postrzeganego jako bezwartościowe i bezcelowe wykonywanie poszczególnych czynności. Drugie natomiast – *mura* – oznacza nieregularność, czyli wolniejsze wykonywanie pracy w porównaniu z pozostałymi pracownikami, co wiąże się z koniecznością dostosowania tempa pracy do osoby, która pracuje w najwolniejszym tempie. Z kolei trzecie M, czyli *muri*, to nadmierne obciążenie, jakie swoim zakresem obejmuje nie tylko zatrudnionych pracowników, ale też wykonywane procesy czy stosowane maszyny¹³⁹.

Biorąc pod uwagę tematykę niniejszej pracy, autor skupił się na zagadnieniu *muda*, w którego skład wchodzi następujące elementy:

- nadprodukcja,
- czas oczekiwania,
- niepotrzebny transport,
- nadmierny stan zapasów,
- niepotrzebny ruch,
- błędy i związane z nimi poprawki,
- brak wystarczającej komunikacji,
- brak ergonomiczności w obrębie stanowisk pracy,
- niepotrzebne procesy.

Pierwszy z wyżej wymienionych elementów to tzw. produkowanie „na wszelki wypadek” (ang. *just in case*) i realizowanie kroków procesu szybciej niż to konieczne, czyli **nadprodukcja**. Dochodzi do niej m.in. poprzez produkcję maksymalnej ilości produktów w procesie, bez uwzględnienia tempa produkcji po to, by całkowicie wykorzystać zdolność produkcyjną danej maszyny. W rezultacie procesy i linie technologiczne ulegają izolacji, a ich produktywność zauważalnie wzrasta. Niemniej skutek wytwarzania produktów, na które nie otrzymano

¹³⁸ J. Czekaj J., *Koncepcja lean administration*, [w:] W. Błaszczuk, I. Bednarska-Wnuk, P. Kuźbik (red.), *Nurt metodologiczny w naukach o zarządzaniu*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2010.

¹³⁹ F. Damrath, *Increasing Competitiveness of Service Companies: Developing Conceptual Models for Implementing Lean Management in Service Companies*, Politecnico di Milano, Milano 2012.

konkretnych zamówień, a zatem na które nie ma zapotrzebowania, dochodzi do planowanego marnotrawstwa – akumulacji zapasów na różnorodnych etapach produkcji. Problem ten dotyczy zarówno gotowych wyrobów, jak i produktów będących w trakcie wyrobienia. Wytworzone w ten sposób produkty muszą podlegać dodatkowej obsłudze (przechowywanie, liczenie, itp.)¹⁴⁰.

Kolejny element marnotrawstwa *muda* stanowi **czas oczekiwania**, czyli bezczynność poprzedzająca np. dostawę materiałów (opóźnienia w dostawach, braki w magazynach). Może być ona spowodowana również opóźnieniami w procesie poprzedzającym, brakiem informacji do danego procesu, oczekiwaniem na kontrolę oraz awariami urządzeń bądź maszyn. W wielu przypadkach do tego rodzaju marnotrawstwa dochodzi wskutek występowania tzw. wąskich gardeł. Czas pozostały do dyspozycji w wielu przedsiębiorstwach stanowi niezwykle uciążliwy problem¹⁴¹.

W dalszej kolejności należy zwrócić szczególną uwagę na **nieuzasadniony transport**, czyli zbędne przemieszczanie się pracowników, materiałów lub informacji powodujące marnotrawstwo czasu i wysiłku zatrudnionych w organizacji osób, a także zauważalny wzrost ponoszonych kosztów. Biorąc pod uwagę problematykę zbędnego transportu, przyczyn tego problemu można upatrywać w przenoszeniu produkcji będącej w toku na większe odległości. Kolejnym motorem napędowym tego marnotrawstwa jest stosowanie niewydajnych środków transportu. Niewątpliwie powodować go może również lokowanie w magazynie wyrobów gotowych, materiałów lub wyrobów będących w trakcie przygotowania w celu pobrania ich na kolejne etapy procesu bądź przechowania ich między poszczególnymi procesami¹⁴². Efektem nieuzasadnionego transportu może być zniszczenie wyrobów i materiałów, ich psucie się, a nawet zaginięcie¹⁴³.

Pod pojęciem **nadmiernego stanu zapasów** należy natomiast rozumieć nadwyżkę w zakresie wyrobów gotowych, wyrobów będących w trakcie produkcji bądź surowców, a także

¹⁴⁰ J. K. Liker, M. Hoseus, *Kultura Toyoty. Serce i dusza filozofii Toyoty*, MT Biznes, Warszawa 2008; J. K. Liker, D. P. Meier, *Toyota Talent. Developing Your People, The Toyota Way*, McGraw-Hill, eBook, 2007; J. K. Liker, D. P. Meier (2011), *Droga Toyoty. Fieldbook*, MT Biznes, Warszawa 2011.

¹⁴¹ K. Lisiecka, I. Burka, *Lean Service w teorii i praktyce*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice 2016.

¹⁴² M. Imai, *Gemba Kaizen. Zdroworozsądkowe, niskokosztowe podejście do zarządzania*, MT Biznes, Warszawa 2006.

¹⁴³ A. Stoller, *Lean CEO. W drodze do doskonałości*, MT Biznes, Warszawa 2015.

sprzętu oraz wyposażenia. Wielu pracowników zapasy postrzega jako swoistą asekurację, która zapewnia im poczucie bezpieczeństwa, aczkolwiek takie marnotrawstwo przyczynia się do spowolnienia procesów (np. poświęcanie dodatkowego czasu na wyszukiwanie źle przechowywanego sprzętu), a – co za tym idzie – ich nieekonomiczności. W efekcie dochodzi nie tylko do starzenia się produktów, ale też do ich uszkodzeń. Wpływa to też na ponoszenie dodatkowych kosztów magazynowania i transportowania oraz na wydłużenie czasu realizacji zamówień. Warto również zauważyć, iż nadmierny stan zapasów może powodować ukrywanie problemów związanych z defektami, przestojami oraz opóźnieniami dostawców¹⁴⁴.

Omawiając problematykę marnotrawstwa na linii montażowej, należy skupić się także na **zbędnym ruchu**, jaki wykonywany jest podczas realizacji poszczególnych czynności. Dochodzi do niego wskutek nieodpowiedniej organizacji (ergonomii) stanowisk pracy. Zagadnienie to jest często lekceważone przez pracodawców – zabiegani pracownicy sprawiają wrażenie zapracowanych, co budzi pozytywne konotacje. Do przykładów tego rodzaju marnotrawstwa zaliczyć można zbędne schylenie się, bezzasadne przekładanie poszczególnych elementów, niepotrzebne wyszukiwanie poszczególnych współpracowników, informacji, narzędzi czy materiałów. Równie problematyczne jest tworzenie dokumentów (np. wieloosobowych raportów, które wymagają długotrwałego przeglądania i analizowania). W celu identyfikacji tego rodzaju marnotrawstwa konieczne jest zejście do tzw. poziomu *gemba* i dokonanie obserwacji w miejscu wykonywania rzeczywistej pracy.

Wśród elementów *muda* nie sposób nie wspomnieć też o **błędach i poprawkach**. Wszelkie odchylenia, bez względu na to, czy są spowodowane przez ludzi, czy maszyny, sprawiają, iż produkt wymaga poprawki, przeróbki a nawet zezłomowania. W efekcie nie nadaje się do sprzedaży i wpływa na marnotrawstwo obsługi, wysiłków oraz czasu. Zgodnie z koncepcją *Lean Management*, wszelkie defekty nie powinny być usuwane. Kluczowe jest bowiem zapobieganie ich powstawaniu. Dopiero wtedy dana organizacja nie będzie narażona na koszty, które – wraz z upływającym czasem niezbędnym do identyfikacji tychże defektów – mogą drastycznie wzrastać¹⁴⁵.

¹⁴⁴ J. K. Liker, D. P. Meier, *Droga Toyoty. Fieldbook*, MT Biznes, Warszawa 2011.

¹⁴⁵ M. E. Bayou, A. De Korvin, *Measuring the Leanness of Manufacturing Systems: A Case Study of Ford Motor Company and General Motors*, „Journal of Engineering and Technology Management” 2008, 4, s. 25–287.

Kluczowym problemem prowadzącym do marnotrawstwa w organizacji jest również **brak wystarczającej komunikacji**. Sprawna komunikacja umożliwia bowiem wykonywanie właściwych i celowych czynności, a – co za tym idzie – nie przyczynia się do marnowania czasu ani zasobów, sprzyjając efektywnemu funkcjonowaniu przedsiębiorstwa.

Za następny element *muda* uznaje się **brak ergonomiczności w zakresie stanowisk pracy**, co może powodować wśród pracowników negatywne konsekwencje zdrowotne, zaś pracodawców narażać na zbędne koszty. Należy nadmienić, iż za nieergonomiczne stanowiska pracy uznaje się takie miejsca, które wymagają częstego schylania się, sięgania wysoko, dźwigania i przenoszenia nieporęcznych przedmiotów oraz przyjmowania nienaturalnych pozycji. Dodatkowo problem ten występuje przy monotonii i monotypii pracy wiążącej się z powtarzalnością takich samych ruchów.

Ostatnim, lecz niemniej istotnym aspektem wchodzącym w skład marnotrawstwa *muda* są **zbędne procesy**, których nieprawidłowe zaprojektowanie wiąże się z wykonywaniem nieuzasadnionych kroków i nadmiernym przetwarzaniem. Do tego problemu dochodzi głównie przy przetwarzaniu informacji i wykonywaniu poszczególnych czynności przy pomocy nieodpowiednich i nieergonomicznych zestawów narzędzi, systemów oraz nadmiernie skomplikowanych lub przestarzałych procedur. Warto nadmienić, iż taki stan rzeczy może być spowodowany brakiem komunikacji, błędem ludzkim, nakładającymi się na siebie obszarami uprawnień, a także niewłaściwym rozplanowaniem obiektu bądź niepoprawnym oprzyrządzeniem stanowiska¹⁴⁶.

Eliminacja marnotrawstwa zapewnia skuteczną przewagę konkurencyjną na rynku oraz osiągnięcie wyższych zysków przedsiębiorstwa. Ocena balansu całej linii i poszukiwanie najlepszego rozmieszczenia zadań pozwala na dokładną analizę zaplanowanych czynności, co wpływa na wyższą wykrywalność czynności, które nie przynoszą wartości dodanej.

1.5. Sposoby przedstawiania zbalansowania linii na przykładzie wykresów Yamazumi

Oprócz opisowego prezentowania zbalansowania linii produkcyjnych popularnym sposobem jest wykorzystanie wykresu Yamazumi, który oprócz tego, że przedstawia obciążenie wszystkich operatorów i czasy realizowanych operacji, zawierać może również analizę wartości dodanej.

¹⁴⁶ S. Bhim, S. K. Garg, S. K. Sharma, C. Grewal, *Lean implementation and its benefits to production industry*, „International Journal of Lean Six Sigma” 2010, 1 (2), s. 157–168.

Wykres Yamazumi to diagram ułożonych w stos słupków. Poszczególne elementy słupka reprezentują poszczególne etapy pracy na stanowisku roboczym. Cały wykres pokazuje całkowity czas na stacji roboczej¹⁴⁷. Przygotowanie wykresów jest bardzo czasochłonne, ale w połączeniu z metodą MTM UAS i EAWS zapewnia kompletne dane wejściowe do balansowania linii produkcyjnej. Mając już zebrane dane, można przystępować do wyrównywania stopnia obciążenia na wszystkich stanowiskach poprzez przekazywanie operacji ze stanowisk przeciążonych do stanowisk niedociążonych.

Yamazumi to japońskie słowo, które dosłownie oznacza układanie w stosy¹⁴⁸. Wykresy bilansu pracy Yamazumi służą do wizualnego przedstawienia zawartości pracy w serii zadań i ułatwiają bilansowanie pracy oraz wyodrębnianie i eliminowanie pracy bez wartości dodanej. Wykres Yamazumi (lub tablica Yamazumi) to ułożony w stos wykres słupkowy, który przedstawia źródło czasu cyklu w danym procesie; wykres ten jest wykorzystywany do graficznego przedstawiania procesów w celu ich optymalizacji. Zadania procesowe są indywidualnie przedstawiane na wykresie słupkowym, można je skategoryzować jako zadania o wartości dodanej, zadania bez wartości dodanej lub odpady. Średni czas trwania każdego zadania jest rejestrowany i wyświetlany na wykresie słupkowym. Każde zadanie procesowe jest układane w stos, aby reprezentować cały etap procesu.

Aby uzyskać strumień wartości dostosowany do potrzeb producenta, należy zaprojektować system produkcyjny lub system produkcyjny w taki sposób, aby był zgodny z tempem, w jakim producent wymaga części lub produktu. Tempo to jest często określane jako czas Takt.

Takt lub czas zegarowy jest podstawowym wskaźnikiem szczupłej produkcji. Wskazuje szybkość (tempo), w jakim części mają być produkowane, aby zrealizować zamówienie. Celem czasu zegarowego jest dokładne dopasowanie produkcji do popytu. Czas Takt (TT) jest obliczany jako udział dostępnego czasu produkcji i liczby sztuk, których żąda klient. Rzeczywisty proces jest spowolniony przez nieefektywne działania i nieprawidłowości, które wydłużają nasz czas lub czas

¹⁴⁷ K. Zientek, *Wykres Yamazumi – jedno z narzędzi wykorzystywanych w firmach motoryzacyjnych*, <https://leanaction.pl/2019/12/17/wykres-yamazumi-jedno-z-narzedzi-wykorzystywanych-w-firmach-motoryzacyjnych/>, 17.12.2019.

¹⁴⁸ C. O. Chan, H. Lau, Y. Fan, *Rola wykresu Yamazumi w standaryzacji lean: modelowanie i analiza z wykorzystaniem funkcji utraty wydajności*, „International Journal of Productivity and Quality Management” 2023, 38 (4), s. 435–463.

cyklu. Podstawową ideą szczupłej produkcji jest zbliżenie czasu cyklu do taktu, tak aby można było „porywać się na produkcję”. Czas cyklu musi być krótszy niż czas cyklu¹⁴⁹.

Sabadka i inni¹⁵⁰ charakteryzują wykres Yamazumi jako wykres słupkowy, który pokazuje całkowity czas cyklu dla każdego operatora podczas wykonywania jego procesu w przepływie produkcji. W celu zaplanowania i rozwiązania problemów, a następnie sporządzenia Yamazumi przedsiębiorstwo musi szczegółowo poznać proces montażu. Nie wystarczy znać tylko ważne szczegóły dotyczące montażu, ale trzeba znać długość przechowywania komponentu lub ile czasu zajmuje wyjęcie go z półki. Należy również pamiętać o długiej drodze do komponentu. Konieczne jest zapisanie, ile sekund potrzeba na wykonanie zadania, np. czas pracy pras, wkrętarek, zgrzewarek, laminatorów itp. Należy również mieć świadomość, czy pracownik postępuje zgodnie z procesem pracy, czy też nie. Bardzo ważne jest, aby podczas tworzenia wykresu Yamazumi zrozumieć szczegóły pracy, zanim będzie można usprawnić proces. Umożliwia on tworzenie płynnych, bezpiecznych i wydajnych procesów. Wizualizuje bieżącą sytuację i podkreśla krytyczne punkty operacji montażowych.

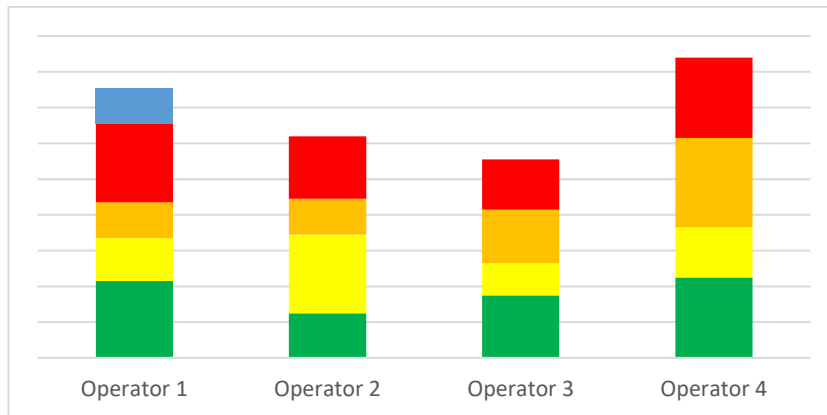
Sukces w zastosowaniu wykresów Yamazumi może wynikać z tego, że można stosować je na tablicach magnetycznych, które są dostępne i znajdują się w pobliżu linii montażowych, tym samym wizualizując obciążenia i proces montażu pozwala na bieżąco prześledzić go w kolejnych sekwencjach. Bardzo ważne jest, aby audyty u klientów odbywały się tam, gdzie można zobaczyć cały proces montażu i prześledzić go w kolejnych sekwencjach. Yamazumi przedstawia pewien przegląd sekwencji montażowej, gdzie każda część kroku jest przedstawiona za pomocą kolorów¹⁵¹.

Przykładowy wykres Yamazumi przedstawia poniższa grafika na Rysunku 7:

¹⁴⁹ Ariyanti, Silvi & Azhar, M. & Lubis, Sobron, 2020, *Assembly Line Balancing with The Yamazumi Method*, IOP Conference Series: „Materials Science and Engineering”, 4.08.2020, Dżakarta, https://www.researchgate.net/publication/348113315_Assembly_Line_Balancing_with_The_Yamazumi_Method, 1.12.2020.

¹⁵⁰ D. Sabadka i in., *Optimization of Production Processes Using the Yamazumi Method*, „Advances in Science and Technology. Research Journal”, 2017, 11.4, s. 175–182, <https://doi.org/10.12913/22998624/80921>, <http://www.astrj.com/Optimization-of-Production-Processes-Using-the-Yamazumi-Method.80921.0,2.html>, 5.12.2017.

¹⁵¹ M. Fekete, J. Hulvej, 2013, „*Humanizing*” *Takt Time and Productivity in the Labor – Intensive Manufacturing Systems*, International Conference Zadar [online], 19.06.2013, Zadar, Croatia, <http://www.tknowpress.net/ISBN/978-961-6914-02-4/papers/ML13-245.pdf>, 22.06.2013.



Rysunek 7. Przykład wykresu Yamazumi. Źródło: opracowanie własne.

Opisywane kategorie na wykresie dotyczą:

- kolor zielony – VAA (aktywność dodana),
- kolor żółty – czas spędzony na działaniach SVAA; praca opcjonalna, nie jest wykonywana przy każdym wyrobie i zależy od specyfikacji – rozróżnienie typu produktu,
- kolor pomarańczowy – SVAA (aktywność o częściowej wartości dodanej),
- kolor czerwony – NVAA (aktywność niezwiązana z wartością dodaną),
- kolor niebieski – brak równowagi.

Pod pojęciem **aktywności dodanej (VAA)** należy rozumieć zawartość pracy bądź maszyny dodającej wartość dla klienta lub inne korzyści. Czynności te stanowią zatem pracę przekształcającą produkt fizycznie. Czas ten (robocizna bądź maszyna) poświęca na wykonanie pracy, za którą klient jest gotowy zapłacić – np. zmiana formy produktu, dostosowanie jego funkcji. Integralną częścią VAA są **działania o częściowo wartości dodanej (SVAA)**, które wspierają działania dotyczące dodanej wartości. Wśród przykładowych czynności SVAA wyróżnić można:

- kompletację,
- pozycjonowanie,
- rozładunek,
- uzyskiwanie,
- załadunek.

W dalszej kolejności należy zwrócić uwagę na **aktywność niezwiązaną z dodaną wartością (NVAA)**. Czynności te stanowią taką treść pracy, za którą klient nie byłby skory

zapłacić. To swoiste straty lub odpady będące częścią marnotrawstwa. Przykładowe działania NVAA to:

- chodzenie,
- czekanie,
- podwójna obsługa,
- przerabianie.

Omawiając istotę wykresu Yamazumi nie sposób nie wspomnieć o czasie nierównowagi, czyli różnicy między czasem taktu a czasem cyklu. Innymi słowy czas ten stanowi dostępny czas wolny na danym stanowisku pracy¹⁵².

Podsumowując powyższe, należy wskazać, że wykresy bilansowe służą do wizualnego przedstawienia treści pracy serii zadań i ułatwiają równoważenie pracy oraz izolowanie i eliminowanie pracy niewnoszącej wartości dodanej. Wykres Yamazumi (lub tablica Yamazumi) to skumulowany wykres słupkowy, który pokazuje źródła czasu cyklu w danym procesie. Służy również do graficznego przedstawienia konkretnych procesów dla celów optymalizacji. Zadania procesu są indywidualnie reprezentowane na skumulowanym wykresie słupkowym. Może to być sklasyfikowane jako wartość dodana lub jako zadanie bez wartości dodanej. Średni czas trwania każdego zadania jest rejestrowany i wyświetlany na wykresie słupkowym. Każde zadanie procesowe jest ułożone w stos, aby reprezentować cały proces.

Wykres Yamazumi może pomóc szybko wykryć, które procesy są przeciążone lub niedostatecznie wykorzystane. Jest to również pomocne, gdy zachodzi potrzeba ponownego zrównoważenia linii lub przeorganizowania procesu. Zwykle dzieje się tak, gdy zmienia się czas taktu. Wykres Yamazumi może ponadto pomóc w porównaniu wydajności między stacjami roboczymi lub maszynami. Dysponując czasem cyklu na wszystkich liniach, można zobaczyć, które z nich wymagają optymalizacji. Osiągnięcie bardziej zrównoważonej linii pomoże osiągnąć przewidywalność i zapewnić, że zapotrzebowanie klientów będzie konsekwentnie zaspokajane na czas.

Będąc narzędziem wizualnym, wykres Yamazumi może skutecznie motywować pracowników do doskonalenia procesu. A ponieważ pracownicy mierzą i oceniają swoje wyniki,

¹⁵² Ł. Waclawik, *Zastosowanie wykresu yamazumi w analizie wartości dodanej procesu pracy*, <https://doi.org/10.15678/ZNUEK.2020.0990.0604>, <https://zeszyty-naukowe.uek.krakow.pl/article/view/2082>, 1.01.2020.

ciągłe doskonalenie, czyli *kaizen*, jest o wiele bardziej osiągalne. Wykres Yamazumi pomaga również firmom upewnić się, że wszystkie ich zadania procesowe wnoszą wartość dodaną do ich celu końcowego. Kwestionowanie obecnego procesu i zastanawianie się nad sposobami jego dalszego ulepszania w celu dodania większej wartości można zaszczerpić w kulturze firmy za pomocą wskaźników wizualnych, takich jak wykres Yamazumi.

Wykres Yamazumi staje się sygnałem ostrzegawczym dla zespołów biznesowych, aby wykrywały marnotrawstwo i zwalczały je, koncentrując się na tym, gdzie występują w procesie. Jest to również narzędzie do monitorowania i porównywania wydajności procesu z celami. Ponadto może być narzędziem do pokazywania możliwości ulepszeń i motywowania zespołów biznesowych do znajdowania sposobów na wydajniejsze wykonywanie pracy.

Konkludując: pierwszym krokiem do bycia produktywnym jest uświadomienie sobie, na co poświęca się swój czas. Dotyczy to również procesów biznesowych. Jeśli zbyt dużo czasu poświęca się nieproduktywnym czynnościom, można oczekiwać, że ucierpi na tym efektywność pracy. Nieekonomiczne działania zwiększają również koszty, zmniejszają zadowolenie pracowników i negatywnie wpływają na doświadczenia klientów. Posiadanie możliwości sprawdzenia, gdzie w procesie występują marnotrawne działania, może pomóc firmom je wyeliminować. Do najważniejszych zalet korzystania z wykresu Yamazumi należy wymienić:

- zmniejszenie kosztów spowodowanych marnotrawstwem czasu (wyeliminowanie zadań nietworzących wartości dodanej zmniejsza koszty, przywraca czas, który można by poświęcić na działania lub inwestycje zwiększające wartość dodaną),
- pomocne narzędzie w równoważeniu linii montażowej (wykres pomaga porównywaniu wydajności stacji roboczych lub maszyn),
- skuteczny motywator (dzięki prostej wizualizacji) dla pracowników do usprawnienia procesu montażu,
- szybkie wykrywanie procesów, które są przeciążone lub niedostatecznie wykorzystywane.

1.6. Problematyka rotacji pracowników w zagadnieniu balansowania linii

W przemysłowych liniach produkcyjnych odnotować można szerokie zastosowanie interwencji ergonomicznych, które nie tylko poprawiają warunki pracy, ale też zapobiegają pojawianiu się

chorób zawodowych¹⁵³. Jedną z takich interwencji jest planowanie rotacji pracowników. Rotacja stanowisk jest sprawdzoną metodą rozwoju kwalifikacji zatrudnionych, która polega na oddelegowaniu pracownika na pewien czas na nowe stanowisko. Może on być skierowany do wykonywania zadań zgodnych z jego kwalifikacjami lub do takich, które wymagają zdobycia nowych umiejętności. Zmiana taka jest alternatywnym narzędziem do projektowania pracy, która może pozwolić pracownikom poznać różne umiejętności. Eliminuje ono zmęczenie zatrudnionych spowodowane nudnymi zadaniami, motywuje do pracy i podnosi morale zespołu. Zważywszy na komórki produkcyjne, w których poszczególne zadania wiążą się z koniecznością obciążenia fizycznego, interwencje kognitywne pozwalają na ograniczenie poziomu narażenia pracowników bądź ograniczenie czasu trwania owego narażenia. Wśród takich działań wyszczególnić można m.in.¹⁵⁴:

- przeprojektowanie stanowisk pracy,
- zmiana narzędzi oraz mebli na odpowiednie,
- wdrożenie wytycznych w zakresie ergonomii,
- traktowanie odpoczynku pracowników w sposób bardziej priorytetowy.

Poza wyżej wymienionymi aspektami na szczególną uwagę zasługuje też funkcja rotacji miejsc pracy (ang. *job rotation*), którą stosuje się głównie przy zadaniach charakteryzujących się brakiem możliwości obniżenia poziomu narażenia przy pomocy środków fizycznych¹⁵⁵. Warto jednak zauważyć, iż wdrażanie *job rotation* przynosi stosunkowo niejednorodne rezultaty. Wynika to niewątpliwie ze stosowania różnorodnych metod badawczych oraz odmiennych kryteriów. Na taki stan rzeczy wpływa także brak klinicznych, randomizowanych i kontrolowanych badań, które skupiłyby się na ocenie efektywności tego zagadnienia w zakresie zapobiegania dolegliwości o charakterze mięśniowo-szkieletowym. Co więcej: uzyskanie pozytywnych (dla zdrowia

¹⁵³ M. Eklöf, M. Hagberg, *Are simple feedback interventions involving workplace data associated with better working environment and health? A cluster randomized controlled study among Swedish VDU workers*, „Appl. Ergon.” 2006, 37 (2), s. 201–210.

¹⁵⁴ S. E. Mathiassen, *Diversity and variation in biomechanical exposure: what is it, and why would we like to know?*, „Appl. Ergon.” 2006, 37 (4), s. 419–427.

¹⁵⁵ T. O. Sato, H. J. Coury, *Evaluation of musculoskeletal health outcomes in the context of job rotation and multifunctional jobs*, „Appl. Ergon.” 2009, 40 (4), s. 707–712.

pracownika) wyników jest możliwe wyłącznie w przypadku, gdy zaplanowana rotacja miejsc pracy spełnia m.in. następujące warunki¹⁵⁶:

- jednakowa liczba zatrudnionych osób,
- jednakowy poziom oraz czas trwania narażenia pracowników wraz z żądanym obszarem ciała,
- jednakowa częstotliwość ruchów,
- jednakowa ilość angażujących zadań,
- jednakowa długość przerwy na odpoczynek.

Jak wskazują Weise i Bruder, do rotacja pracy w zespole może odbywać się w zróżnicowany sposób¹⁵⁷. Za kluczowe aspekty różnicujące przyjąć można interwał rotacji oraz jej częstotliwość¹⁵⁸. Warto bowiem nadmienić, iż za długość interwału rotacji przyjmuje się okres, w którym wymagane jest pozostanie pracownika przy konkretnym stanowisku do momentu kolejnego punktu rotacji. Zmiana w tym zakresie może mieć miejsce raz w tygodniu, raz dziennie bądź raz na godzinę.

Inni autorzy sugerują przeprowadzanie spontanicznych zmian¹⁵⁹. Stanić zauważa, iż praca na zmiany wywiera bardziej pozytywny wpływ na pracownika niż praca w jednej, dziennej zmianie¹⁶⁰. Zdaniem Filus i Okimorto maksymalny czas narażenia jednego pracownika na konkretne obciążenie pracą wynosi 2–3 godziny¹⁶¹. Schreibers i wsp.¹⁶² podkreślają natomiast istotę co najmniej dwukrotnej rotacji podczas ośmiogodzinnej pracy.

¹⁵⁶ S. Asensio-Cuesta, J. A. Diego-Mas, L. V. Cremades-Oliver, M. C. González-Cruz, *A method to design job rotation schedules to prevent work-related musculoskeletal disorders in repetitive work*, „Int. J. Prod. Res.” 2012, 50 (25), s. 7467–7478.

¹⁵⁷ F. Weise, R. Bruder, 2015, *Investigation of attitude of production workers towards job rotation in automotive industry against the background of demographic change*. In: ICHFE2015, 17th International Conference on Human Factors and Ergonomics, 13.04.2015, Daventry, <https://www.waset.org/abstracts/29275>, 6.08.2015.

¹⁵⁸ R. Filus, M. L. Okimorto, *The effect of Job Rotation intervals in muscle fatigue – Lactic acid*, „Work” 2012, (41), s. 1572–1581.

¹⁵⁹ P. P. F. M. Kuijer, W. H. K. Vries, A. J. Beek, J. H. van Dieën, B. Visser, M. H. W. Frings-Dresen, *Effect of job rotation on work demands, workload and recovery of refuse truck drivers and collectors*, „Human Factors”, 2004, 46 (3), s. 437–448.

¹⁶⁰ S. Stanic, *Fahrzeugendmontage – Herausforderung für den demografischen Wandel*, „Sträter” 2010, 8; E. Frieling (Hrsg.), *Schriftenreihe Personal- und Organisationsentwicklung*, Band 8, University Press, Kassel 2010.

¹⁶¹ R. Filus, M. L. Okimorto, (2012), *The effect of Job Rotation intervals in muscle fatigue – Lactic acid*, „Work” 2012, 41, s. 1572–1581.

¹⁶² K. B. J. Schreibers, J. P. De Groot, W. Van Tuil, *Jak zaprojektować zadania rotacyjne w ramach zadań*, [w]: R. N. Pikaar, E. Koningsveld, P. Settels (red.), *Meeting Diversity in Ergonomics*, Elsevier Science, Amsterdam 2006.

Tymczasem czas trwania czynności podejmowanych przez pracownika nie jest jedynym determinantem. Równie istotny okazuje się czas trwania przerw oraz częstotliwość ich występowania pomiędzy poszczególnymi zadaniami w trakcie jednej zmiany¹⁶³. Niewątpliwie jest to związane z interakcją między zmęczeniem a regeneracją. Należy bowiem podkreślić, iż w trakcie wykonywania przez pracownika różnorodnych zadań doświadczane są zróżnicowane poziomy stresu. W efekcie może dojść nie tylko do przepracowania mięśni, ale też do ogólnego uczucia zmęczenia. By zregenerować siły, pracownik powinien skorzystać z przerwy. Optymalnie przerwa powinna trwać do chwili, gdy pracownik całkowicie odzyska zdolność do działania (jaką obniżyło wykonywanie konkretnej czynności). Tucker nadmienia jednak, iż kilka krótkich przerw ma większą wartość regeneracji w porównaniu z kilkoma długimi przerwami o jednakowym czasie trwania¹⁶⁴. Wynika to z faktu, iż w czasie przerwy maleje wartość regeneracji pojedynczej przerwy. Należy dodać, iż zarówno długość przerwy, jak i miejsce jej odbywania podczas jednej zmiany roboczej winna być uzależniona od następujących aspektów¹⁶⁵:

- rodzaju pracy,
- intensywności pracy,
- czasu, w jakim pracownik jest obciążony daną pracą.

Biorąc pod uwagę specyfikę *job rotation*, warto zauważyć, że kolejność miejsc pracy może być zewnętrznie ustalona zważywszy na istniejące warunki pracy bądź nakazana przez przełożonego lub kierownika. Dodatkowo kolejność ta może być wybierana samodzielnie przez zespół. Wówczas określa się ją mianem autodeterminacji¹⁶⁶.

Bez względu na sposób ustalenia kolejności miejsc pracy, zmiana może wiązać się z oddelegowaniem pracownika do miejsca znajdującego się najbliżej jego stanowiska pracy bądź do losowego punktu. Co więcej, zmiana ta może być uwarunkowana ilością i jakością zadań, które

¹⁶³ S. Asensio-Cuesta, J. A. Diego-Mas, J. Canós-Darós, C. Andrés-Romano, *A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria*, „International Journal of Advanced Manufacturing Technology” 2012, 60, s. 1161–1174.

¹⁶⁴ P. Tucker, *The impact of rest breaks upon accident risk, fatigue and performance: a review*, „Work & Stress” 2003, 17 (2), s. 123–137.

¹⁶⁵ J. Vogt, J. Lambrecht, D. Steudle, *Pausenentnahme und psychosomatische Beschwerden bei pädagogischen Mitarbeitern aus Sicht der Betroffenen*, „Zeitschrift für Arbeitswissenschaft” 2014, 68 (1), s. 27–34.

¹⁶⁶ P. Hartung, *Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz im Büro*, Weka, München 2004.

mają zostać wykonane podczas zmiany. Determinują ją również występujące podczas realizacji zadań poziomy stresu¹⁶⁷ określone przez Rohmerta jako obciążenia łączone¹⁶⁸.

W wielu przypadkach nacisk kładziony jest na naprzemienne wykonywanie czynności wymagających przyjęcia różnorodnych postaw z uwzględnieniem nie tylko kryteriów ekonomii, ale też psychicznych wymagań. Jak wskazuje Rohmert, przy zmianie pracy wyszczególnić można zarówno pracę lekką, jak i ciężką¹⁶⁹. By zapewnić wsparcie dla optymalnej zmiany obciążenia, a zatem stworzyć tzw. stan uzdrowienia, ta mniej wymagająca – zdaniem autora – winna odbywać się między dwiema aktywnościami o bardziej wymagającym charakterze. Rohmert proponuje również wykonywanie pracy statycznej (bardziej męczącej) na przemian z pracą dynamiczną (wbrew pozorom – mniej męczącą)¹⁷⁰. Ściślej ujmując: po pierwszej z nich warto skupić się nie na przerwie, lecz na bardzo lekkiej pracy dynamicznej angażującej inne grupy mięśniowe, co pozwoli na regenerację tych uprzednio zaangażowanych. Podobnego zdania są Thommen i Achleinter. Autorzy sugerują, że wykonywanie czynności o bardziej wymagającym charakterze powinno być przeplatane czynnościami mniej wymagającymi¹⁷¹.

Warto dodać, iż stosowanie wyrównawczej, zintegrowanej z całym procesem pracy stało się przedmiotem badań niektórych autorów już w 1933 roku. Wówczas Krause w swoich obserwacjach doszedł do wniosku, iż taktyka ta pozwala na 15-procentowy wzrost wydajności¹⁷².

Głównym celem *job rotation* jest nabycie nowych kwalifikacji i kompetencji¹⁷³. Przejawia się ona zatem w:

- planowym przesuwaniu pracowników między stanowiskami,
- świadomym powierzaniu im nowych zadań i obowiązków,
- poszerzaniu kwalifikacji przez zatrudnionych i zdobyciu nowych umiejętności.

¹⁶⁷ M. L. C. Comper, R. S. Padula, *The effectiveness of job rotation to prevent work-related musculoskeletal disorders: protocol of a cluster randomized clinical trial*, BMC Musculoskeletal Disorders (ed.) 2014, 15, s. 170.

¹⁶⁸ W. Rohmert, *Formen menschlicher Arbeit*, [w:] w. Rohmert, J. Rutenfranz (Hrsg.), *Praktische Arbeitsphysiologie*, Georg Thieme, Stuttgart–New York 1983.

¹⁶⁹ W. Rohmert, *Arbeitswissenschaft. Umdruck zur Vorlesung*, Institut für Arbeitswissenschaft der technischen Hochschule Darmstadt, 1989.

¹⁷⁰ J. Stegmann, *Leistungsphysiologie: Physiologische Grundlagen der Arbeit und des Sports. 4. überarbeitete Auflage*, Thieme, Stuttgart–New York 1991.

¹⁷¹ J.-P. Thommen, A.-K. Achleitner, *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 7. voll-ständig überarbeitete Auflage*, Gabler, Springer, Wiesbaden 2012.

¹⁷² E. Ulich, *Arbeitspsychologie. 6. überarbeitete und erweiterte Auflage*, Schäffer-Poeschel Verlag, Zürich 2005.

¹⁷³ E. Prędką, *Rotacja stanowisk*, „Personel Plus” 2016, nr 10 (107), s. 8–12.

Rotacja na stanowisku pracy jest elementem planowania personelu adekwatnego do potrzeb organizacji. Właściwie przeprowadzony proces ułatwi ustalenie optymalnej struktury i wielkości zatrudnienia dzięki zapewnieniu podmiotowi kompetentnych pracowników¹⁷⁴. Planowanie to pozwala na ustalenie potrzeb personalnych pod względem ilościowym, jakościowym, a także czasowym i przestrzennym¹⁷⁵.

Rotacja na stanowisku pracy pozwala na określenie zapotrzebowania na pracowników, rozwój kultury organizacyjnej oraz umiejętności personelu¹⁷⁶. Zapewnia załodze możliwość zdobycia odpowiednich kwalifikacji, a przez to świadczenia pożądaney jakości pracy. W procesach balansowania linii montażowej bardzo mało wspomina się o ergonomicznym rotowaniu z uwzględnieniem obciążenia poszczególnych partii mięśni. Równoważenie obciążenia mięśni z uwzględnieniem potrzeb określonego pracownika przyczyni się do humanizacji miejsca pracy.

¹⁷⁴ G. Drozdowski, *Kształtowanie zatrudnienia w organizacjach publicznych*, PWSZ IPiA Studia Lubuskie, Sulechów 2012, s. 201–223.

¹⁷⁵ A. Pochtowski, *Zarządzanie zasobami ludzkimi*, Warszawa 2003, s. 110.

¹⁷⁶ M. Kostera, *Zarządzanie personelem*, Warszawa 2010, s. 43.

Podsumowanie rozdziału pierwszego

W rozdziale pierwszym dysertacji przedstawiono rozważania dotyczące problematyki balansowania linii montażowej ze szczególnym uwzględnieniem branży samochodowej. Rozważania zawarte w tej części pracy można podsumować w następujących punktach:

1. W celu otrzymania najlepszego zbalansowania obciążenia fizycznego i posturalnego pomiędzy pracownikami różnych stacji należy tak dobrać operacje do stacji, aby całościowe obciążenia poszczególnych stacji były równe. Zmiany takie powinny nie tylko zmniejszyć ryzyko występowania urazów u pracowników związanych z pracą w nieergonomicznych warunkach, ale także pozytywnie wpłynąć na jakość i wydajność pracy.

2. Siła robocza jest kluczowym zasobem w przedsiębiorstwach produkcyjnych, dlatego przy potrzebie wysokiego tempa produkcji nie można zaniedbać ochrony pracowników. Na wydajność i produktywność wpływa wiele czynników związanych z jednej strony z wydajnością linii, a z drugiej ze zdrowiem pracowników.

3. Jedną z konsekwencji zwiększonej liczby wariantów na produkt jest efekt rozszerzania czasu. Efekt ten można zdefiniować w następujący sposób: efekt rozszerzenia czasowego jest wynikiem korelacji pomiędzy liczbą wariantów, tempem montażu wariantów i różnicą w czasie montażu wariantów w oparciu o produkt. Związany jest on z nieefektywnością strat, zmniejszoną produktywnością i problemami z jakością.

4. Metodę MTM UAS można uznać za podstawową metodę inżynierii przemysłowej w procesie rozwoju i wytwarzania produktu.

5. Rotacja na stanowiskach pracy i poprawa warunków wykonywania na nich zadań jest ważnym elementem zarządzania wiekiem w przedsiębiorstwach¹⁷⁷. Rotacja na stanowiskach pracy powinna zatem uwzględniać takie elementy, jak¹⁷⁸: zmniejszoną fizyczną i psychiczną wydolność organizmu pracownika, możliwości zmieniania pozycji ciała w ciągu dnia pracy, zastosowanie odpowiednich sprzętów i wyposażenia, w szczególności technologii wspomagających, zminimalizowanie konieczności podnoszenia ciężkich przedmiotów, częstego schylania się, wykonywania ciężkiej pracy fizycznej, dbałość o niezbędne szkolenia na stanowisku pracy.

¹⁷⁷ J. Liwiński, U. Sztanderska, *Zarządzanie wiekiem w przedsiębiorstwie*,

https://www.researchgate.net/publication/267773462_Zarządzanie_wiekim_w_przedsiębiorstwie, 1.01.2016.

¹⁷⁸ P. Kampkoetter, C. Harbring, D. Sliwka, *Job rotation and employee performance – evidence from a longitudinal study in the financial services industry*, „International Journal of Human Resource Management” 2018, nr 9–10, s. 1709–1735.

2. Wybrane aspekty do ergonomicznego balansowania linii montażowych

2.1. Rotacja na stanowiskach pracy w kontekście zmian demograficznych

Problemów i kwestii dotyczących stosownego podejścia do osób zatrudnionych, których dyspozycyjność ze względu na stan zdrowia jest ograniczona, będzie w najbliższej przyszłości coraz więcej. Stanowi to także problem z punktu widzenia rotacji takich pracowników. Dla tych osób bowiem często indywidualne rozwiązania dedykowane na liniach produkcyjnych, powodują, że rotacja może być utrudniona lub wręcz niemożliwa. W tym świetle przedsiębiorstwa stoją przed wyzwaniem, aby poradzić sobie z tą tendencją i zorganizować dla takich pracowników miejsca oraz warunki pracy, jak również zadania odpowiadające ich szczególnemu stanowi zdrowotnemu.

Wiek, stan zdrowia oraz kompetencje uznawane są za czynniki istotne w celu zdefiniowania wymagań oczekiwanych od zarządzania zasobami ludzkimi odpowiadającego na potrzeby osób niepełnosprawnych oraz współmiernego do ich predyspozycji. Dlatego należy zastanowić się nad możliwą funkcją wspierającą dla systemów zarządzania.

Zarówno w dyskursie naukowym, jak i gospodarczym brakuje jasnej i jednoznacznej definicji oraz rozgraniczenia tej grupy, aczkolwiek różne sposoby klasyfikacji sprawności w różnym wymiarze są deskryptywne jeżeli chodzi o zdolności ludzkie. Istnieje natomiast dla tej szczególnej grupy zatrudnionych szerokie spektrum pojęć, przez co w różnych artykułach, wywodach, tekstach czy raportach biznesowych natrafić można na określenia takie, jak np.: pracownicy o ograniczonej aktywności spowodowanej nieodwracalną chorobą, pracownicy z niepełnosprawnością ruchową, pracownicy o mniejszej wydajności. Można więc zauważyć, że sprawność i niepełnosprawność są pojęciami rozmytymi, tym bardziej wobec starzejących się społeczeństw¹⁷⁹.

Rotacja na stanowiskach pracy z uwzględnieniem wieku i niepełnosprawności pracowników ma na celu przedłużenie okresu ich aktywności zawodowej. Odpowiednie działania mogą być prowadzone na następujących płaszczyznach¹⁸⁰:

¹⁷⁹ M. Butlewski, *Projektowanie ergonomiczne wobec dynamiki deficytu zasobów ludzkich*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2018.

¹⁸⁰ E. Łastowiecka-Moras, Joanna Bugajska, *Problemy zawodowe pracowników starszych*, https://m.ciop.pl/CIOPortalWAR/appmanager/ciop/mobi?_nfpb=true&_pageLabel=P39200118761482245057910

- indywidualnej – działania wzmacniające kompetencje oraz możliwość wykonywania pracy, kształcenie ustawiczne, zdobywanie nowych kwalifikacji,
- przedsiębiorstwa – wprowadzenie elastycznych godzin pracy, dłuższych przerw, dostosowywanie kompetencji zatrudnionych do zadań, szkolenia.

Podnoszenie i doskonalenie kompetencji pozwala na zachęcanie pracowników do pogłębiania wiedzy, zdobywania nowych umiejętności i wykonywania zadań na innych stanowiskach pracy. Starszy pracownik może potrzebować innego tempa pracy, które musi być dostosowane do jego możliwości. W przypadku czynności, które wymagają znacznego wysiłku fizycznego lub psychicznego, czas pracy można skrócić lub przenieść daną osobę na inne stanowisko. Są one częstym rozwiązaniem w przypadku zaobserwowania pewnych problemów występujących po stronie pracownika, związanych ze spadającą wydajnością. Mogą one być elementem prewencji zapobiegającej problemom zdrowotnym¹⁸¹. Można założyć, że takie przesunięcie pracownika nie pogorszy jakości pracy.

Współczesne organizacje muszą dostosować swoje praktyki z zakresu zarządzania zasobami ludzkimi. Zwiększanie zadowolenia dojrzałego personelu oraz satysfakcji z pracy seniorów może być sposobem na pokonanie negatywnych zmian na rynku pracy. Pracownicy muszą pozostawać dłużej aktywnymi zawodowo, a często są to okresy znacznie przewyższające terminy wskazane w przepisach¹⁸². Wiele firm umożliwia swoim pracownikom na długą aktywność zawodową¹⁸³. W tym celu podejmowane są wysiłki mające na celu stworzenie warunków odpowiednich do ich potrzeb¹⁸⁴. Nie inaczej jest w zakresie polityki zatrudnieniowej, na której koncepcje szczupłości (*lean*) oraz zwinności (*egile*) odcisnęły swoje piętno¹⁸⁵. Na liniach

[&html_tresc_root_id=300005867&html_tresc_id=300005863&html_klucz=300004753&html_klucz_spis=](#), 9.11.2013, Przy opracowywaniu wytycznych wykorzystano wyniki badań przeprowadzonych w projekcie PCZ 21-21 pt. *Aktywność zawodowa w aspekcie starzejącego się społeczeństwa* oraz raportu WHO pt. *Aging and Working Capacity* (Report of a WHO Study Group. WHO, Geneva 1993).

¹⁸¹ J. Liwiński, U. Sztanderska, *Wstępne standardy zarządzania wiekiem w przedsiębiorstwach*, Warszawa 2010, s. 65–68.

¹⁸² A. Rakowska, S. Juana-Espinosa, I. Mendryk, *Well-being and job satisfaction of employees aged 50+, perceived organizational support for development and innovation*, „Argumenta Oeconomica”, 2020, No 1 (44), s. 143–172.

¹⁸³ K. Alfes, A. D. Shantz, C. Truss, E. Soane, 2013, *The link between perceived human resource management practices, engagement and employee behaviour: a moderated mediation model*, „The International Journal of Human Resource Management”, 2013, 24 (2), s. 330–351.

¹⁸⁴ S. A. Albrecht, A. Bakker, J. Gruman, W. Macey, A. Saks, *Employee engagement, human resource management practices and competitive advantage*, „Journal of Organizational Effectiveness: People and Performance”, 2015, 2 (1), s. 7–35.

¹⁸⁵ S. Trzcieliński, H. Włodarkiewicz-Klimek, K. Pawłowski, *Współczesne koncepcje zarządzania*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013.

montażowych zatrudnionych jest wielu pracowników z niepełnosprawnościami, ale przy wykorzystaniu posiadanej wiedzy można odpowiednio zaplanować ich udział w procesach montażowych wychodząc naprzeciw ich potrzebom.

Polityka HR w takim przypadku powinna skupiać się na zapobieganiu dyskryminacji ze względu na wiek oraz minimalizowaniu lęku, który jest związany ze starzeniem się¹⁸⁶. Pracownicy seniorzy mogą wymagać wsparcia organizacyjnego w miejscu pracy, by uniknąć pogarszania się stanu zdrowia i samopoczucia. Właściwe działania zarządzających mają zapewniać odpowiednie nastawienie do pozostania aktywnym zawodowo¹⁸⁷.

Konieczne jest szczególne zadbanie o poprawę bezpieczeństwa i warunków pracy. Wszelkie zmiany powinny być analizowane i wdrażane indywidualnie, ponieważ konieczne jest uwzględnienie stanu zdrowia pracownika, doświadczenie zawodowe i zdobyta dotychczas wiedza. Jeśli to konieczne, należy zapewnić mu możliwość np. wykonywania ćwiczeń rehabilitacyjnych i kontynuowania leczenia specjalistycznego¹⁸⁸.

Zachodzące zmiany demograficzne sprawiają, że konieczne staje się nastawienie na racjonalne wykorzystanie zasobów ludzkich. Dotyczy ono wielu obszarów, w ramach których zarządza się pracownikami przy nastawieniu na starzenie się społeczeństwa¹⁸⁹. Współczesne firmy realizują tzw. model zarządzania wiekiem, który uwzględnia w szczególności straszny personel. W jego ramach realizuje się wiele różnorodnych działań, które mają poprawić warunki pracy i komfort wykonywania zadań, głównie przez starsze osoby. Jest to element polityki personalnej, nastawiony na utrzymanie w zatrudnieniu pracowników po 45. roku życia. Ma ono na celu również zachowanie ich efektywności pracy¹⁹⁰.

Zwalczanie ewentualnych barier jest możliwe m.in. poprzez rotację na stanowiskach pracy. Odpowiednie działania to również¹⁹¹:

¹⁸⁶ J. L. Macdonald, S. R. Levy, *Ageism in the Workplace: The Role of Psychosocial Factors in Predicting Job Satisfaction, Commitment and Engagement*, „Journal of Social Issues”, 2016, 72 (1), s. 169–190.

¹⁸⁷ E. Kalokerinos, C. von Hippel, J. D. Henry, *Job attitudes are differentially associated with bridge employment and phased retirement among older Australian employees*, „Work, Aging and Retirement”, 2015, 1 (2), s. 190–201.

¹⁸⁸ Instytut Analiz Rynku Pracy Sp. z o.o., *Starzenie się społeczeństwa – wyzwanie dla rynku pracy, aktywizacja pracowników 50+*, https://www.parp.gov.pl/storage/publications/pdf/Starzenie_sie_spoleczenstw.pdf, 23.12.2020.

¹⁸⁹ M. Sidor-Rządkowska, *Intermentoring, jako forma dialogu międzypokoleniowego we współczesnych organizacjach*, „Edukacja Ekonomistów i Menedżerów”, 2017, 1 (43), s. 71-82.

¹⁹⁰ E. Evans, *Job rotation as training and development tool for enhancing employee's performance*, „A Study of united bank of Africa (UBA)”, Lagos 2021.

¹⁹¹ J. Liwiński, *Opis dobrych praktyk dotyczących zarządzania wiekiem w przedsiębiorstwach polskich oraz innych krajów UE*, PARP,

https://www.parp.gov.pl/storage/publications/pdf/2010_dobre_praktyki_zarzadzania_wiekami.pdf, 10.06.2010.

- tworzenie zespołów z pracowników w różnym wieku, a więc posiadających zróżnicowaną wiedzę i doświadczenie,
- szkolenia,
- odpowiednia polityka kończenia zatrudnienia,
- zmiana nastawienia do starszych pracowników.

Obserwowane zmiany demograficzne, w tym starzenie się populacji, mają wpływ na działanie przedsiębiorstw i gospodarek państwowych jako całości. Sytuacja ta sprawia, że konieczne jest zmierzenie się z tym, że coraz większe grono osób w społeczeństwie przekracza 65. rok życia. Wiąże się to z kurczeniem się zasobów siły roboczej, a więc z potrzebą lepszego integrowania różnych grup osób aktywnych zawodowo. Niezbędne jest wdrażanie skutecznych rozwiązań, które spowodują, że pracownicy nie będą chcieli odchodzić na emerytury, jeśli tylko ich stan zdrowia pozwoli na kontynuowanie zatrudnienia¹⁹².

Rozwiązaniem tego problemu są przemyślane działania z zakresu zarządzania wiekiem, a więc zarządzanie dojrzałymi pracownikami. Sprawdza się zwłaszcza rotacja na stanowisku pracy, która pozwala na zdobywanie nowych kwalifikacji oraz przenoszenie zatrudnionych do wykonywania nowych, często lżejszych zadań. Jest to również sposób na uczenie się młodszych pracowników, którzy czerpią wiedzę od bardziej doświadczonych. Tak zarządzana załoga umożliwi osiągnięcie strategicznych celów¹⁹³.

Wszystkie działania powinny być nastawione na dobrostan dojrzałych pracowników. Tylko w ten sposób można uzyskać wymierne korzyści i wykreować pożądane wartości. Warto nastawić się na ciągłe kształcenie się, wprowadzanie proaktywnych strategii i podnoszenie efektywności zarządzania pracownikami. *Job rotation* jest jednym ze sposobów na uzyskanie takich rezultatów.

2.2. Przegląd metod oceny ryzyka ergonomicznego możliwych do wykorzystania w zakresie balansowania linii produkcyjnej

Metody oceny ryzyka mają już ponad 20-letnią tradycję. Jednak ich wykorzystanie w zakresie wyrównywania obciążeń upowszechniło się dopiero od momentu wykorzystania ergonomii do

¹⁹² M. Majewska, S. Samol, *Rozwój elastycznego rynku pracy: uwarunkowania prawno-ekonomiczne*, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Seria Prawo, Poznań 2016.

¹⁹³ I. Kołodziejczyk-Olczak, *Wpływ zarządzania wiekiem na zatrudnialność dojrzałych pracowników*, „Edukacja ekonomistów i menedżerów”, 2015, 1 (35), s. 75–93.

zarządzania¹⁹⁴. Istota każdej z nich sprowadza się do następującej formuły oceny: w pierwszym kroku dokonuje się identyfikacji partii ciała podlegających obciążeniu w czasie wykonywania operacji produkcyjnych na stanowisku, w drugim, dokonuje się oceny zgodnie z kryteriami przyjętymi w metodzie. Ocenie podlegają:

- **obciążenie kończyn górnych**: przemieszczenia głowy, ramion, przedramienia, nadgarstka w porównaniu z położeniem naturalnym, usztywnienie nadgarstka, ruchy na wysokości ramienia, ruchy skręcające, rodzaje chwytów (np. płaski lub chwyt zamknięty), podnoszenia, ciągnięcie, pchanie obiektów lub narzędzi o masie większej niż 2 kg, sposób manipulacji, wysiłki statyczne, powtarzalność (więcej niż 4 razy na minutę) czynności angażujące stale te same grupy mięśniowe, kontakt z obiektami, narzędziami lub elementami stanowiska pracy z ostrą krawędzią prowadzącą do miejscowego uciskania itp.,
- **obciążenie tułowia** – określone częstością powtórzeń ruchów w ciągu godziny, z wymaganą siłą i częstością poruszeń tułowiem w różnych kierunkach (skręty, skłony, pochYLENIA).

Do najbardziej znanych metod oceny ergonomii (choć nie tylko) należą wymienione w Tabeli 2, a opisane poniżej metody:

Typy obciążeń	Normy		Metody		
	CEN	ISO			
Postawa ciała	1005-4	11226	OWAS	AAWS	IAD-BKB, EAWS
Siła	1005-3	11228-2	RULA		
Manipulowanie ciężarami	1005-2	11228-1	LMM		
Powtarzalne czynności z udziałem kończyn górnych	1005-5	11228-3	OCRA		

Tabela 2. Metody oceny (wraz z normami) w zależności od typów obciążeń ciała. Źródło: MTM – Deutsche Mtm-Vereinigung e.V., www.dmtm.com/produkte/software/ticon_modul_ergo.php, 13.11.2009.

¹⁹⁴ M. Sławińska, M. Butlewski, *Efficient control tool of work system resources in the macro-ergonomic context. Advances in social and organizational factors*, 2014, s. 226–234, https://www.researchgate.net/publication/365320126_Efficient_Control_Tool_of_Work_System_Resources_in_the_Macro-Ergonomic_Context, 1.01.2020.

EAWS – European Assembly Worksheet – powstał w współdziałaniu między IMD (Internationales MTM Direktorat) i Institut für Arbeitswissenschaft TU Darmstadt¹⁹⁵ dla przemysłu motoryzacyjnego, w którym to czynności montażowe są powtarzalną pracą.

EAWS pozwala na ergonomiczną ocenę miejsc pracy poprzez wskaźnik ryzyka już w fazie projektowania. Metoda (oparta na normie ISO 11228), mająca zastosowanie do ergonomicznej analizy miejsca pracy i rozkładu pracy, wymaga ilościowego pomiaru kilku parametrów ergonomicznych. W rzeczywistości metoda EAWS wymaga nakładów ilościowych, takich jak siły wywierane przez układ dłoń–palec i/lub przez układ ciało–ramię, postawy ciała itp. – aby mogła być prawidłowo zastosowana. Metodologia pomiaru i analizy parametrów ergonomicznych jest zatem ważną częścią koncepcji. Celem jest lepsza weryfikacja ergonomii istniejących miejsc pracy, ale także wykorzystanie tych danych do przeprowadzenia projektowania ręcznych procesów produkcyjnych.

Dzięki tej metodologii pomiaru możliwe jest poznanie interakcji między człowiekiem a narzędziami oraz dostosowanie funkcjonalności miejsca pracy do możliwości grupy pracowników¹⁹⁶. Ocena obciążenia mechanicznego wymaganego przez miejsce pracy (biorąc pod uwagę produkt i proces razem), odbywa się w strefie roboczej przez pomiar określonych parametrów fizycznych niezbędnych do wykonywania czynności roboczej. Zmierzone parametry są następnie skorelowane z antropometrią pracowników, a także z metodą pracy, jej treścią (pod względem rodzaju operacji wymaganych do osiągnięcia określonego wyniku) jak i złożonością (pod względem precyzji i oczekiwanej jakości). Poprzez szczegółowy pomiar kilku parametrów biomechanicznych możliwe jest również mapowanie wymaganego obciążenia pracą i jego rozkład między stacje robocze w typowej linii montażowej samochodowego systemu produkcyjnego.

Informacje, dane i wiedza na temat pomiarów są wykorzystywane do budowy pól bazy danych ergonomii, a także są tłumaczone w procedurze operacyjnej wspierającej projektowanie i rozwój zaawansowanych miejsc pracy.

Po kilku latach rozwoju i eksperymentów możliwe jest dziś dostosowanie biomechanicznego obciążenia pracy przypisanej do jej miejsca zgodnie z oczekiwanym „profilem

¹⁹⁵ R. Bruder, *Kooperationsprogramm zum normativen Management von Belastungen und Risiken bei körperlicher Arbeit*, Darmstadt Institut für Arbeitswissenschaft TU, Darmstadt 2007.

¹⁹⁶ M. Christmannson, A. C. Falck, J. Amprazis, M. Forsman, L. Rasmusson, R. Kadefors, *Modified method time measurements for ergonomic planning of production systems in the manufacturing industry*, „International Journal of Production Research”, 2000, 38, s. 4051–4059.

wydajności” w celu poprawy wydajności i elastyczności, ale także w celu zwiększenia bezpieczeństwa, ergonomii i dobrego samopoczucia w miejscu pracy¹⁹⁷.

Metoda ta uwzględnia przypadki, które mogą zagrażać zdrowiu pracownika związane z postawą ciała i obciążeniem. Metoda EAWS sygnalizuje przypadki charakteryzujące się dużą częstotliwością czynności, w których palce wykonują szybkie ruchy, podczas gdy mięśnie barku realizują w większości wysiłek statyczny. W pracach montażowych oprócz obciążenia fizycznego występuje także obciążenie psychiczne, według DIN uzależnione głównie od powtarzalności i złożoności operacji. Wysoki stopień powtarzalności może skutkować monotonią, natomiast duża złożoność operacji wymagająca ciągłej koncentracji prowadzi szybko do zmęczenia. W metodzie tej punkty zostają przyznawane dla:

- ergonomicznie niekorzystnych sytuacji,
- postawy i ruchu ciała z małymi zewnętrznymi ciężarami/małym wydatkiem siły,
- sił i dodatkowych obciążeń w postawach ciała,
- operowania ciężarami,
- postawy ciała,
- innych obciążeń ciała,
- krótkich często powtarzalnych obciążeń górnej partii ciała powodujących RSI (*Repetitive Strain Injury*).

Metoda EAWS jest uniwersalnym narzędziem przeznaczonym do oceny ergonomii. Uwzględnia ona głównie postawę, siłę oraz rytm pracy. Aby uzyskać ocenę, należy przeprowadzić obserwacje, wypełnić formularz i zsumować punkty przyznawane w poszczególnych kategoriach. Mimo przejrzystości i prostoty, zastosowanie tej metody jest czasochłonne, dlatego najlepiej korzystać z EAWS przy użyciu oprogramowania¹⁹⁸.

Metoda OWAS – pierwsza wersja metody została opracowana w latach 70. XX wieku przez zespół pracowników Fińskiego Instytutu Ochrony Pracy. Zarówno w metodzie oryginalnej, jak i jej licznych modyfikacjach (np. OWASCO, OWASAN, wersji elektronicznej Win-OWAS) główny nacisk położony jest na identyfikację i oszacowanie ryzyka dyskomfortu spowodowanego obciążeniem statycznym. Uwzględnia one cztery czynniki mające bezpośredni wpływ na wielkość

¹⁹⁷ Ibidem.

¹⁹⁸ B. Reifur, P. Król, *Narzędzia programowe w ergonomicznej ocenie stanowiska montażowego jako moduł systemu doradczego*, „Technologia i Automatyzacja Montażu”, vol. nr 3, 2012, s. 28–32.

obciążenia statycznego: położenie pleców, położenie ramion, pracę nóg, wielkość obciążenia zewnętrznego¹⁹⁹.

Procedura oceny przebiega następująco:

- należy określić czterocyfrowy kod pozycji przy pracy, jednoznacznie określający położenie pleców, ramion, pracę nóg oraz wielkość obciążenia zewnętrznego,
- należy wyznaczyć kategorię obciążenia statycznego,
- należy dokonać interpretacji wyznaczonej kategorii ze względu na pozycję ciała wymuszaną przez stanowisko w odniesieniu do czasu pracy w danej pozycji oraz w zależności od możliwości zmiany pozycji ciała przez pracownika,

Metoda RULA została opracowana w 1993 r. przez dr L. McAtamney i prof. E. Nigel Corlett, ergonomistów z Uniwersytetu w Nottingham w Anglii. Umożliwia oszacowanie ryzyka dolegliwości i schorzeń narządu ruchu wywołanych sposobem wykonywania pracy (MSDs), spowodowanych zajmowaną pozycją przy pracy, używaną siłą i dynamiką ruchów. Zalecana jest do badań ergonomicznych stanowisk pracy, na których występują nagłe symptomy MSDs kończyn górnych, np. stanowisk pracy z komputerem.

Procedura oceny składa się z 15 kroków i obejmuje²⁰⁰:

- ustalenie wskaźnika łącznej oceny obciążenia wymuszoną pozycją kończyny górnej,
- ustalenie wskaźnika oceny obciążenia wymuszoną pozycją szyi, tułowia i kończyn dolnych,
- ustalenie wskaźnika całkowitego obciążenia ciała przyjmowaną pozycją, używaną siłą i dynamiką ruchów na podstawie tabel 5 i 11,
- określenie kategorii ryzyka oraz niezbędne działania prewencyjne.

W podsumowaniu należy zaznaczyć, że wymienione metody są stale doskonalone, a na stronach internetowych można się zapoznać z ich aktualną wersją.

Metoda LMM wskaźników kluczowych – opracowana i upowszechniona przez niemiecki urząd ochrony pracy. Przeznaczona jest do oceny ręcznych prac transportowych, wykonywanych

¹⁹⁹ D. Roman-Liu, T. Tokarski, *Ocena obciążenia statycznego z zastosowaniem metody OWAS*, „Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka”, vol. nr 7/8, 2010, s. 28–31.

²⁰⁰ L. McAtamney, E. Nigel Corlett, *RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders*, „Appl. Ergon.”, Apr. 1993, vol. 24, no. 2, s. 91–99.

częściej niż 20 razy w ciągu roku.

Procedura oceny wymaga²⁰¹:

- wyznaczenia wskaźnika czasu pozostawania ciała pod obciążeniem (T),
- wyznaczenia wskaźnika obciążenia przez masę przedmiotu (M),
- wyznaczenia wskaźnika postawy ciała pod obciążeniem (P),
- wyznaczenia wskaźnika warunków wykonywania pracy (W),
- obliczenia poziomu ryzyka $R = T(M + P + W)$. (2.2.1)

Metoda NIOSH – opracowana w Narodowym Instytucie Bezpieczeństwa i Medycyny Pracy USA. Służy do projektowania i oceny stanowisk pracy wymagających ręcznego podnoszenia ciężarów. Jest oparta na normach serii ISO i EN dotyczących ergonomicznego wykonywania zadań roboczych związanych z ręcznym operowaniem przedmiotami. Podstawą oceny stanowisk pracy jest wyznaczenie dopuszczalnej masy podnoszonych przedmiotów (RWL), niepowodującej ryzyka przeciążenia zdrowych pracowników. Przede wszystkim oceniany jest stopień obciążenia odcinka lędźwiowego kręgosłupa.

Procedura oceny wymaga²⁰²:

- wyznaczenia dopuszczalnej masy podnoszonych przedmiotów jako iloczyn $RWL = LC \cdot HM \cdot VM \cdot DM \cdot AM \cdot FM \cdot CM$ (2.2.2)

gdzie LC – stała obciążenia, HM – wzrost obciążenia kręgosłupa ze wzrostem odległości poziomej między środkiem masy podnoszonego przedmiotu a kręgosłupem, VM – zmiana obciążenia w zależności od wysokości początkowej, z jakiej przedmiot jest podnoszony, DM – spadek maksymalnej masy podnoszonych przedmiotów akceptowanej przez populację pracowników ze wzrostem odległości pionowej podnoszenia, AM – asymetria podnoszenia, FM – wpływ częstotliwości podnoszenia na zalecaną dopuszczalną wartość masy podnoszonego przedmiotu, CM – uchwyty umożliwiające ręczne przemieszczanie przedmiotu,

- ustalenia współczynnika podnoszenia (U) jako miernika ryzyka przeciążenia odcinka

²⁰¹ K. Głowczyńska-Woelke, *Ryzyko związane z ręcznymi pracami transportowymi. Przewodnik po wybranych metodach oceny ryzyka: MAC i KIM*, „Inspektor Pracy”, 2008, nr 1, Departament Warunków Pracy GIP, Warszawa 2008.

²⁰² P. Meepradit i in., *The Application of NIOSH Lifting Equation to Prevent Musculoskeletal Disorder Risks*, „Journal of Biosciences and Medicines” 2015, vol. 03, no. 03, s. 39–44.

łędźwiowego kręgosłupa w zadaniach roboczych wymagających ręcznego podnoszenia.

Metoda REBA – opracowana w 2000 roku przez S. Hignett i L. McAtamney. Umożliwia oszacowanie ryzyka powstawania dolegliwości narządu ruchu wywołanych sposobem wykonywania pracy (MSDs), spowodowanych pozycją ciała, zakresem ruchu, używaną siłą, dynamiką ruchów oraz rodzajem chwytu. Polecana do stosowania na stanowiskach pracy charakteryzujących się dużą zmiennością pozycji ciała²⁰³.

Procedura oceny ryzyka obejmuje ustalenie:

- wskaźnika łącznej oceny obciążenia wymuszoną pozycją szyi, tułowia i kończyn dolnych z uwzględnieniem obciążenia stosowaną siłą, rodzajem wykonywanego ruchu i sposobem przemieszczania (szybki lub nagły),
- wskaźnika łącznej oceny obciążenia pozycją ramienia, przedramienia i nadgarstka z uwzględnieniem jakości chwytu,
- wskaźnika oceny obciążenia całego ciała pozycją, obciążeniem, stosowaną siłą i jakością uchwytu,
- wskaźnika całkowitej oceny obciążenia ciała pracą, kategorii ryzyka i określenie niezbędnych działań.

Wskaźnik JSI (*Job Strain Index*). Wskaźnik JSI umożliwia szybką ocenę obciążenia ukierunkowaną na wskazanie czynników ryzyka powstawania dolegliwości i schorzeń rąk, nadgarstków, przedramion i łokci. Wskaźnik można stosować zarówno do identyfikacji ergonomicznych czynników ryzyka, jak i do oceny skuteczności interwencji ergonomicznej na stanowisku pracy czy w projektowaniu ergonomicznym.

Wskaźnik JSI jest oparty na sześciu zmiennych. Są to²⁰⁴:

- intensywność wysiłku,
- czas trwania wysiłku,
- częstotliwość wysiłków,
- pozycja ręki–nadgarstka,

²⁰³ por. W. M. Horst, N. Horst, *Ergonomia z elementami bezpieczeństwa i ochrony zdrowia w pracy*. Wprowadzenie, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2011.

²⁰⁴ J. S. Moore, A. Garg, *The Strain Index: a proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders*, „American Industrial Hygiene Association Journal” 1995, vol. 56, no. 5, s. 443–58.

- szybkość wykonywania czynności,
- sumaryczny czas trwania czynności w ciągu dnia.

Dokonując oceny, należy stosować przyjęte do wyznaczania wskaźnika JSI następujące zasady:

- do opisu sposobu wykonywania czynności powinno się zastosować sześć zmiennych (przedstawionych powyżej),
- każda zmienna opisująca sposób wykonywania czynności jest oceniana i klasyfikowana w skali 5-stopniowej,
- każdemu stopniowi skali (1-5) jest przypisana ranga (mnożnik) określająca poziom obciążenia,
- całkowite obciążenie stanowi iloczyn wyznaczonych sześciu mnożników.

Przedstawione wyżej ergonomiczne metody analityczne stosuje się przede wszystkim wtedy, gdy występowanie czynników ryzyka na stanowisku pracy nie jest potwierdzone badaniami (występowanie ich podpowiada intuicja). Za ich pomocą można zidentyfikować zagrożenia oraz ocenić kategorię ryzyka powstawania dolegliwości i schorzeń narządu ruchu. Jeśli ergonomiczne czynniki ryzyka i ekspozycja na nie na konkretnym stanowisku pracy w odniesieniu do konkretnego pracownika są udokumentowane badaniami (np. listami kontrolnymi NIOSH), to ryzyko zawodowe można oszacować również jedną z metod uniwersalnych, np. **Risk Score** (wskaźnik ryzyka).

Ryzyko powstawania dolegliwości i schorzeń wywołanych sposobem wykonywania pracy w metodach uniwersalnych szacuje się z wykorzystaniem n-wymiarowej macierzy, w której każdemu wymiarowi (opisanemu 1-wymiarową macierzą) przypisuje się:

- konkretny, zadany ergonomiczny czynnik ryzyka,
- jego modyfikatory
- bariery.

Metoda Risk Score należy do najpopularniejszych metod szacowania ryzyka zawodowego powstawania strat. Pierwsza jej wersja została opracowana w USA w 1976 r. **Risk Score** należy do metod jakościowo-ilościowych. Podstawowym jej celem jest szacowanie ryzyka strat ludzkich i strat materialnych²⁰⁵.

²⁰⁵ por. G. F. Kinney, A. D. Wiruth, *Practical Risk Analysis for Safety Management*, US Naval Postgraduate School, Security Department China Lake, Kalifornia 1976.

Wartość wskaźnika *Risk Score* (R) oblicza się z wzoru:

$$R = S \cdot E \cdot P \quad (2.2.3)$$

gdzie:

R – ryzyko,

S – potencjalne skutki (straty) zagrożenia,

E – ekspozycja (czas przebywania w strefie narażenia) na zagrożenie,

P – prawdopodobieństwo wystąpienia skutków zagrożenia.

Iloczyn odczytanych z przytoczonych niżej tabel wartości parametrów S, E i P stanowi punktowe szacowanie ryzyka R (wskaźnika ryzyka WR) i pozwala na określenie na podstawie tabeli poziomu ryzyka i zalecanych działań.

Ważnym aspektem balansowania linii montażowej jest produktywna praca, ale nie może ona stanowić zagrożenia dla zdrowia pracowników, dlatego bardzo ważnym jest również uwzględnianie ryzyka ergonomicznego. Zawsze lepszym i tańszym rozwiązaniem będą zapobiegające rozwiązania ergonomiczne, które uwzględniają zasady ergonomiczne, niż wdrożenie środków naprawczych. Istnieje wiele metod do oceny ryzyka ergonomicznego. Branża samochodowa stosuje głównie metodę EAWS (a w przyszłości HWD), która jest kompatybilna ze wspomnianą wcześniej metodą MTM (Methods-Time Measurement) do planowania i wyceniania czasu manualnych czynności na montażu.

2.3. Ochrona pracownika przed nadmiernym obciążeniem i uciążliwością pracy

Wykonywanie obowiązków w miejscu pracy na ogół wiąże się z konkretnymi warunkami i organizacją²⁰⁶. O bezpieczeństwie pracowników przesądzają warunki, które występują w zakładzie pracy. Wszelkie zaniedbania w tej kwestii mogą doprowadzić do wypadków, chorób zawodowych, a nawet śmierci pracowników. Często zdarzają się uszkodzenia mienia i straty z tym związane²⁰⁷.

²⁰⁶ E. Janosik, E. Kułagowska, S. Marzec, K. Mazur-Kajta, *Wpływ fizycznych czynników środowiska pracy na obciążenia pracą monotypową*, „Zeszyty Naukowe Małopolskiej Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Tarnowie” 2018, t. 38, nr 2, s. 122–137.

²⁰⁷ M. Morka, *Czynniki wpływające na stan bezpieczeństwa pracy na placu budowy*, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska” 2011, 2, s. 605–609.

Zasady organizacji środowiska pracy regulują:

PN-EN ISO 12100-1:2005: Bezpieczeństwo maszyn. Pojęcia podstawowe, ogólne zasady projektowania. Część 1; Podstawowa terminologia, metodyka;

PN-Z-08052:1980: Ochrona pracy. Niebezpieczne i szkodliwe czynniki występujące w procesie pracy. Klasyfikacja;

PN-N-18004:2001: System zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Wytyczne;

PN-N-18002: 2000: System zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Ogólne wytyczne oceny ryzyka zawodowego;

PN-EN ISO 14121-1:2008: Bezpieczeństwo maszyn. Ocena ryzyka Część 1; Zasady (zastępuje PN-EN 1050:1999);

PN-N 18001:2004: System zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Wymagania. Kwestie prawne odnoszące się do organizacji ergonomicznego, a także bezpiecznego stanowiska pracy, regulowane są w Polsce normami: PN-EN ISO 9241-1:2001/A1:2002 i PN-EN ISO 9241-1:2001/A1:2005 (tzw. norma A1).

W środowisku pracy można spotkać wiele różnych czynników, które mają ważne oddziaływanie na organizm człowieka. Są to²⁰⁸:

- czynniki szkodliwe – prowadzą do schorzeń traktowanych jako choroby zawodowe,
- czynniki uciążliwe mogą powodować złe samopoczucie zatrudnionych, nadmierne zmęczenie, jednak nie wywołują trwałego pogorszenia stanu zdrowia,
- czynniki niebezpieczne mogą prowadzić do powstania urazów u pracujących.

Podział czynników występujących w miejscu pracy wyróżnia czynniki fizyczne, biologiczne, chemiczne, psychofizyczne (Tabela 3).

²⁰⁸ J. Chojnicki, G. Jarosiewicz, *ABC BHP Informator dla pracodawców*, Państwowa Inspekcja Pracy, Warszawa 2019, s. 58–70.

<p>Czynniki fizyczne –szkodliwe i niebezpieczne w miejscu pracy</p>	<ul style="list-style-type: none"> • oświetlenie, • temperatura powietrza, • wilgotność powietrza, • ruch powietrza, • jonizacja powietrza, • hałas, wibracje • pyły przemysłowe, aerozole stałe i ciekłe, • promieniowanie jonizujące, • promieniowanie laserowe, • promieniowanie nadfioletowe, • promieniowanie podczerwone, • ciśnienie,
<p>Czynniki chemiczne</p>	<ul style="list-style-type: none"> • toksyczne, • drażniące, • uczulające, • rakotwórcze, • mutagenne, • działające szkodliwie na funkcje rozrodcze i płodność,
<p>Czynniki biologiczne</p>	<ul style="list-style-type: none"> • drobnoustroje komórkowe, w tym zmodyfikowane genetycznie, • jednostki bezkomórkowe zdolne do replikacji lub przenoszenia materiału genetycznego, w tym zmodyfikowane genetycznie, • pasożyty wewnętrzne człowieka, • hodowle komórkowe,
<p>Czynniki psychofizyczne</p>	<ul style="list-style-type: none"> • obciążenie fizyczne - statyczne, dynamiczne, • obciążenie psychiczne - obciążenie umysłu, niedociążenie i przeciążenie percepcyjne, obciążenie emocjonalne.

Tabela 3. Czynniki w miejscu pracy. Źródło: Czynniki szkodliwe. Badania i pomiary, <https://www.pip.gov.pl/pl/f/v/228182/czynniki%20szkodliwe%20badania%20i%20pomiary.pdf>, 10.10.2018.

Powyższe obciążenia mogą nieść ze sobą wiele znacznych skutków dla zdrowia pracownika. Są czynnikami wpływającymi na emocje i umysł zatrudnionej osoby, a w efekcie na jakość pracy i efektywność. Mogą mieć duży wpływ na zdrowie człowieka, skutkować stresem, wypaleniem zawodowym, frustracją itp.

Wśród czynników szkodliwych, które są szczególnie uciążliwe w wielu miejscach pracy, warto wymienić hałas. To niepożądane, nieprzyjemne i dokuczliwe drgania mechaniczne, które oddziałują na organ słuchu²⁰⁹.

Wśród źródeł hałasu warto wymienić przede wszystkim²¹⁰:

– mechaniczne – efekt pracy maszyn i urządzeń o napędzie mechanicznym, elektrycznym oraz pneumatycznym,

– aerodynamiczne,

– hydrauliczne,

– technologiczne.

Z uwagi na ochronę słuchu, wartość hałasu w środowisku pracy wynosi²¹¹:

– 85 dB w odniesieniu do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy,

– 115 dB – maksymalny poziom dźwięku oznaczany A,

– 35 dB – szczytowy poziom dźwięku, oznaczany C.

Hałas to ważny czynnik zakłócający, choć w miejscu pracy często bagatelizowany. Warto jednak pamiętać, że słuch jest ważnym zmysłem, a jego uszkodzenie może być bezpowrotne. Poziom tego czynnika powinien być niższy niż 55 decybeli. Tylko wówczas nie wpływa negatywnie na organizm²¹².

Innym ważnym czynnikiem są wibracje. Są to wstrząsy i drgania przekazywane do organizmu przez części ciała, które mają bezpośredni kontakt ze źródłem drgań. Czynnikiem szkodliwym są:

– drgania miejscowe: drgania mechaniczne przenoszone przez kończyny górne. Ich źródłem są np. ręczne narzędzia udarowe. Dopuszczalne wartości progów działania dla tego typu drgań wynoszą 2,5 m/s²,

²⁰⁹ J. Sadowski, *Kształtowanie klimatu akustycznego środowiska i jego ochrona przed hałasem i drganiami*, „Prace Instytutu Techniki Budowlanej”, 28.2-3 (1999), s. 50–61.

²¹⁰ G. Ślęzek, *Hałas w środowisku pracy. Badania, pomiary, szkolenia bhp*, <http://bhpspec.com/2015/06/hałas-w-środowisku-pracy-badania-pomiary-szkolenia-bhp/>, 8.06.2015.

²¹¹ Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z 6 czerwca 2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz. U. z 2018 r. poz. 1286); Ustawa z 25 lutego 2011 r. o substancjach chemicznych i ich mieszaninach (Dz. U. z 2018 r. poz. 143, z późn. zm.).

²¹² Hoffmann Group, *Ergonomiczne miejsce pracy – w trosce o zdrowie Twoich pracowników*, <https://www.hoffmann-group.com/PL/pl/perp/wiedza-techniczna/przewodniki-online/przewodnik-po-wyposazeniu-warsztatow/ergonomia-miejsca-pracy/e/61057/>, 1.06.2021.

– drgania ogólne: mają ogólne działanie na organizm człowieka. Ich źródłem są np. siedziska oraz podłogi środków transportu. Dopuszczalne wartości progów działania dla tego typu drgań wynoszą $0,5 \text{ m/s}^2$.

W zakładach przemysłowych często występują szkodliwe pyły. To jeden z zasadniczych szkodliwych czynników, który może być przyczyną wielu chorób, np. nowotworów czy pylicy płuc²¹³. Pyły mogą oddziaływać na organizm człowieka drażniąco, zwłókniająco, kancerogennie a także alergizująco. Wnikają przez drogi oddechowe i mogą się w nich osadzać.

Współcześnie duże znaczenie mają czynniki rakotwórcze oraz mutagenne. Są to różnorodne substancje chemiczne, ich mieszaniny, czynniki i procesy technologiczne. Warto pamiętać, że zmiany o charakterze nowotworowym mogą ujawnić się u pracownika po upływie wielu lat od momentu pierwszego narażenia na takie substancje²¹⁴.

Dla ergonomii stanowiska pracy duże znaczenie ma odpowiednie oświetlenie. Właściwie zorganizowane wspiera efektywną produkcję i ma wpływ na wydajność pracy. Stanowiska montażowe wymagają szczególnych rozwiązań dopasowanych do indywidualnych potrzeb pracowników. Oświetlenie powinno być dostosowane do zadań realizowanych w danym miejscu i spełniać wymogi właściwych norm²¹⁵.

Jeżeli dane stanowisko pracy obejmuje wiele obszarów o różnych zadaniach wzrokowych, konieczne jest zastosowanie elastycznego systemu oświetlenia. Musi ono spełniać wymagania techniczne i umożliwić regulowanie natężenia, pozycji i obszaru oświetlenia²¹⁶. Bez względu na obecność na stanowiskach pracy oświetlenia dziennego, konieczne jest założenie oświetlenia elektrycznego, którego parametry muszą odpowiadać obowiązującej w Polsce normie PN-EN 124646-1:2012. Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach. Norma ta wyznacza konieczne minimalne natężenie oświetlenia elektrycznego dla określonego rodzaju stanowiska pracy, a także dla typu czynności wykonywanych w konkretnym

²¹³ Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy,

²¹⁴ Główny Inspektorat Sanitarny, *Czynniki rakotwórcze występujące w miejscu pracy*, <https://www.gov.pl/web/gis/czynniki-rakotworce-wystepujace-w-miejscu-pracy>, 24.07.2012.

²¹⁵ M. Mager, *Optymalne oświetlenie wspiera efektywną produkcję*, <https://automatykaonline.pl/Artykuly/Inne/Optymalne-oswietlenie-wspiera-efektywna-produkcje>, 23.06.2017.

²¹⁶ Ibidem.

pomieszczeniu. Właściwie dobrane oświetlenie pozwala zapobiegać utracie zdrowia, opóźnia pojawienie się problemów ze wzrokiem.

Wśród ważnych czynników w środowisku pracy znajdują się czynniki chemiczne. Są one szczególnie niebezpieczne w budownictwie, stolarniach, przedsiębiorstwach zajmujących się profesjonalnym sprzętaniem, szpitalach, laboratoriach, lakierniach. Znajdujące się w powietrzu substancje chemiczne mogą być wchłaniane, a przez to prowadzić do wystąpienia wielu problemów zdrowotnych. Lekceważenie pojawiających się tu zagrożeń może mieć wiele poważnych konsekwencji. Różne obciążenia emocjonalne oraz umysłowe mają wpływ na efektywność pracy i zdrowie pracowników. Wśród zasadniczych form obciążeń z tej grupy wymienia się²¹⁷: stres, frustracje, wypalenie zawodowe. Każdy z wymienionych czynników wiąże się z odczuwaniem dyskomfortu, a także konsekwencjami w postaci pogorszenia stanu zdrowia.

Podsumowując, należy wskazać, że czynniki psychofizyczne powinny zostać uwzględnione w ergonomicznym balansowaniu linii montażowej, ponieważ wpływają na zdrowie i bezpieczeństwo oraz pozytywne samopoczucie pracowników.

2.4. Zastosowanie egzoszkieleatów i robotów w celu odciążenia układu mięśniowo-szkieleтового

Egzoszkieleaty oraz roboty współpracujące z ludźmi stają się coraz bardziej ważne dla przemysłu motoryzacyjnego, aby wspierać w sposób ergonomiczny pracowników i dodatkowo zwiększać możliwości w systemie produkcyjnym. Fizyczne wymagania związane z pracą mogą prowadzić do kosztownych i wyniszczających urazów pracownika. Zmęczenie mięśniowe powstaje na skutek procesów zmieniających możliwości mięśnia do utrzymania określonego poziomu siły lub statycznej pozycji ciała i jest definiowane jako spadek możliwości generowania siły w wyniku wzrastającego odczuwania wysiłku.

Nadmierny wysiłek jest główną przyczyną bólu, niepełnosprawności fizycznej, nieobecności w pracy, utraty produktywności i wydatków medycznych. Ból pleców znajduje się na szczycie listy najczęstszych problemów zdrowotnych związanych z pracą. Innym rodzajem obrażeń w miejscu pracy są skumulowane urazy oraz długotrwałe uszkodzenia układu mięśniowo-

²¹⁷ *Negatywny wpływ miejsca pracy na zdrowie*, <https://zdrowiewpracy.pl/prawo/negatywne-zjawiska-w-miejscu-pracy/>, 27.11.2019.

szkieletowego spowodowane powtarzającymi się czynnościami związanymi z pracą. Najczęstsze zagrożenia zawodowe, na jakie narażeni są pracownicy, to kontuzje spowodowane nadwyrężeniami i upadkami. **Egzoszkielety** lub **lekkie roboty przemysłowe** mogą zmniejszyć liczbę i związane z nimi koszty urazów układu mięśniowo-szkieletowego.

Dziś najtrudniejszym wyzwaniem jest wykrywać i oceniać wszystkie efekty egzoszkieletu. Zwłaszcza ocena ergonomiczna jest jednym z głównych priorytetów związanych z integracją zewnętrznych szkieletów w przemyśle w celu oceny wszystkich istotnych wpływów.

Jednym z egzoszkieleatów na kończyny dolne jest Chairless Chair firmy Noonee. Jest to rodzaj zewnętrznego szkieletu zakładanego na tylną stronę nóg. Nowoczesna konstrukcja z karbonu pozwala pracować w pozycji siedzącej, choć nie jest klasycznym krzesłem. Jednocześnie zapewnia lepszą postawę ciała i redukuje obciążenie nóg. Pracownik mocuje go pasami do bioder, kolan i kostek. Dwie wyścielane powierzchnie podpierają pośladki i uda, a dwa pręty z tworzywa wzmocnionego włóknem węglowym dopasowują się do konturu nóg. Połączenia i miejsce zgięcia znajdują się pod kolanem. Chairless Chair można dopasować do wzrostu człowieka i do pożądanej pozycji²¹⁸. Na Rysunku 8 pokazano operatora z założonym urządzeniem w pozycji siedzącej.



Rysunek 8. Operator w pozycji siedzącej w urządzeniu Chairless Chair. Źródło: <http://www.noonee.com>, 5.01.2019.

Nowoczesna konstrukcja wykonana z karbonu waży 2,4 kg. Głównie zadanie tego urządzenia to poprawa pozycji ciała w sytuacji, gdy pracownik musi się pochylać. Szkielet redukuje również obciążenie nóg. Chairless Chair przeznaczony jest do pracy na stanowiskach podmontażu oraz na taśmach montażowych. Ważne, aby zakres czynności znajdował się w obszarze od wysokości

²¹⁸ <http://www.noonee.com>, 5.01.2019.

kolan do obszaru klatki piersiowej. Urządzenia nie stosuje się na stanowiskach, gdy czynności wykonywane są nad głową albo w miejscach, gdzie znajdują się stopnie, podesty lub drogi powyżej 15 metrów. Istotny jest fakt, że podczas mikroprzerw lub postoju pracownik może na chwilę usiąść i odpocząć. Samo zakładanie i zdejmowanie jest bardzo proste – pracownik samodzielnie mocuje szkielet, zakładając w pierwszej kolejności specjalną kamizelkę, następnie przytwierdza szkielet do butów, po czym zapina pasy do bioder i ud.

Roboty HCR (ang. *Human Robot Collaboration*) są coraz bardziej popularne w różnych dziedzinach życia. To doskonałe rozwiązanie w wielu zakładach pracy, mogą bowiem wykonywać wiele ciężkich i precyzyjnych prac. Modele inteligentne, np. roboty mobilne, są w pełni integrowalne z linią produkcyjną, dzięki czemu mogą w sprawny sposób współpracować z człowiekiem²¹⁹. Ich wdrożenie do procesu produkcji wymaga jednak zadbania o bezpieczeństwo pracowników. Konieczne jest zastosowanie odpowiednich czujników, kamer itp., by użytkowana maszyna niejako poznała swoje nowe środowisko pracy. Roboty potrafią skanować swoje najbliższe otoczenie, dzięki czemu omijają przeszkody, jeśli muszą się przemieszczać. Wyposażono je w nowoczesne oprogramowanie, które pozwala im na wykonywanie konkretnych działań w każdym z możliwych scenariuszy. Inteligentne roboty wykonują złożone interakcje, podejmują decyzje i są przy tym niezwykle efektywne. Mogą planować operacje z wyprzedzeniem, informować o błędach i przeszkodach w wykonywaniu zadań. Wykorzystanie robotów do realizacji powtarzalnych, ciężkich, a często również niebezpiecznych zadań pozwala pracownikom na wykonywanie bardziej wartościowych oraz ciekawszych zadań. Dzięki temu można uniknąć monotonii i wypalenia zawodowego, a także wyższą efektywność produkcji.

Wykorzystanie robotów współpracujących z człowiekiem jest coraz popularniejszym rozwiązaniem. Jedną z branż, w których się ono sprawdza, jest przemysł motoryzacyjny. W fabrykach tych funkcjonują głównie maszyny, które dźwigają ciężkie elementy oraz transportują gotowe już samochody. Większą optymalizację pracy zapewnią roboty podłączone do chmury, które będą niejako uczyć się wykonywania kolejnych zadań. Roboty kooperujące i mobilne powoli stają się standardowym wyposażeniem. W wielu przypadkach są to proste w obsłudze urządzenia, łatwe do zaprogramowania²²⁰. Roboty te współpracują z pracownikami, dostarczają im ciężkie

²¹⁹ B. Adam, *Efektywna współpraca z robotami*, <https://automatykab2b.pl/technika/50512-efektywna-wspolpraca-z-robotami>, 21.01.2019.

²²⁰ autoEXPERT, *Coraz więcej inteligentnych robotów w fabrykach samochodów*, <https://autoexpert.pl/artykuly/coraz-wiecej-inteligentnych-robotow-w-fabrykach-samochodow>, 14.10.2019.

elementy i transportują gotowe pojazdy do miejsca magazynowania. Są niezwykle czułe, dlatego z ich udziałem możliwe jest wykonywanie niezwykle precyzyjnych prac. Podobne rozwiązania, przedstawione na Rysunku 9, stosuje się m.in. w zakładzie Volkswagena w Salzgitter. Roboty Universal Robots zintegrowano z realizowanym tam procesem produkcji. Wysokiej jakości maszyny wspomagają monterów w instalowaniu głowic cylindrów przy świecach żarowych. Urządzenia te mogą funkcjonować bez ogrodzeń ochronnych i przejmują monotonne zadania od personelu²²¹.



Rysunek 9. Robot współpracujący z człowiekiem w fabryce Volkswagena. Źródło: <https://polskiprzemysl.com.pl/zarzadzanie/czwarta-rewolucja-przemyslowa/>, 8.09.2014.

Dzięki tak innowacyjnemu rozwiązaniu pracownik może wykonywać zadania w wygodnej pozycji, na bieżąco monitorować proces montażu i szybko reagować, jeśli to konieczne. Warto pamiętać, że stosowanie takich robotów to konieczność zapewnienia wspólnej przestrzeni roboczej dla człowieka i maszyny. Ważne zatem jest obliczenie odpowiednich odległości i dystansu, by uniknąć potencjalnych wypadków przy pracy²²². Współczesne rozwiązania to bezpieczne maszyny, które nie wymagają specjalnych osłon i grodzień jako elementów ochronnych. Te zostały zredukowane do minimum, a nawet całkiem je wyeliminowano. Systemy takie są klasyfikowane jako maszyny zespolone. Przemysł motoryzacyjny (podobnie jak większość produkcji) wykorzystuje roboty do spawania punktowego, wybierania, malowania i paletyzacji. To nudne, ale niebezpieczne prace. Podobnie w przypadku skomplikowanych prac na linii montażowej, takich jak mocowanie zderzaków i błotników. Roboty mogą również wykonywać zadania, które są zbyt

²²¹ J. S. Thimsen, *Czwarta rewolucja przemysłowa*, <https://polskiprzemysl.com.pl/zarzadzanie/czwarta-rewolucja-przemyslowa/>, 8.09.2014.

²²² T. M. Anandan, *Współpraca robotów i ludzi*, <https://www.controlengineering.pl/wspolpraca-%E2%80%A8robotow-i-ludzi/>, 29.01.2018.

uciążliwe dla ludzi, takie jak sortowanie przedmiotów. Ponadto mogą monitorować i analizować dane w czasie rzeczywistym, umożliwiając pracownikom podejmowanie bardziej świadomych decyzji. Sam robot jest natomiast swoistym asystentem, który radzi sobie z zaprogramowanymi zadaniami²²³.

Roboty muszą zatem być zgodne ze wskazaniem art. 12 Dyrektywy Maszynowej 2006/42/WE²²⁴. Mogą być dopuszczone do użytkowania, jeśli spełniają Normę Roboty i urządzenia dla robotyki²²⁵. Należy się spodziewać, że będzie rosła liczba robotów współpracujących i ich znaczenie. Zakłady produkcyjne i przemysłowe są w dużym stopniu nastawione na automatyzację, obniżanie kosztów oraz szybkie realizowanie procesów. Największy wymiar zawsze będzie miało bezpieczeństwo, a także skuteczne kontrolowanie otoczenia miejsca pracy. Roboty współpracujące są w stanie zwolnić, a nawet wstrzymać wykonywanie zadań, gdyby miało dojść do niekontrolowanego zdarzenia z człowiekiem. System czujników i zabezpieczeń sprawia, że bezpośredni kontakt z pracownikiem będzie dla tego drugiego bezpieczny. To szczególnie ważne, gdyż maszyny te mogą działać niemal jednocześnie z człowiekiem w tym samym miejscu pracy. Obecnie można bowiem wyróżnić cztery poziomy takiej współpracy²²⁶:

1. Człowiek współpracuje z robotem w zautomatyzowanym stanowisku pracy.
2. Strefa współdziałania człowieka i robota zazębia się.
3. Człowiek i robot działają na tym samym detalu w różnym czasie.
4. Człowiek i robot działają na tym samym detalu jednocześnie.

Zastosowanie egzoszkieleatów i robotów współpracujących pomaga skutecznie odciążać pracowników na nieergonomicznych stanowiskach pracy i może być dobrym rozwiązaniem w celu rozszerzenia rotacji pracowników, którzy ze względu na niepełnosprawności nie mogą pracować na każdym stanowisku pracy. Zaletami egzoszkieleatów są zwiększona dźwignia ruchów mięśni oraz osłona ochronna na mięśnie i narządy wewnętrzne. Robot współpracujący bezpiecznie i szybko wykonuje zadania, które są uciążliwe dla człowieka oraz które wymagają większej koncentracji przez dłuższy czas.

²²³ Grupa Volkswagen wybrała robota Universal Robots do zwiększenia ergonomii pracy, <https://www.automatyka.pl/artykuly/grupa-volkswagen-wybrała-robota-universal-robots-do-zwiekszenia-ergonomii-pracy-71726-6>, 29.08.2013.

²²⁴ Bezpieczeństwo systemów z robotami współpracującymi, cz. 1, <https://fugai.pl/bezpieczenstwo-systemow-z-robotami-wspolpracujacymi-cz-1/>, 2.01.2019.

²²⁵ PN-EN ISO 10218-1:2011.

²²⁶ ABB, Roboty współpracujące, <https://automatykab2b.pl/technika/52085-roboty-wspolpracujace>, 13.12.2019.

Podsumowanie rozdziału drugiego

W rozdziale 2 dysertacji przedstawiono rozważania dotyczące wybranych aspektów ergonomicznego balansowania linii montażowej. Najważniejsze wnioski z przeprowadzonych analiz literatury można podsumować w następujących punktach:

1. Rotacja na stanowisku pracy w przypadku pracowników starszych oraz z niepełnosprawnością może wymagać pewnego dostosowania organizacji pracy w tym również odpowiednią rotację pracowników pomiędzy stanowiskami pracy.

1. Do oceny ryzyka ergonomicznego w branży motoryzacyjnej najczęściej stosowana jest metoda EAWS (ang. *Ergonomic Assessment Work Sheet*, pol. arkusz oceny ergonomii biomechanicznej). Ocenie podlegają obciążenia całego ciała oraz kończyn górnych.

2. Czynniki uciążliwe w środowisku pracy mogą skutkować spadkiem sprawności psychicznej i fizycznej pracownika. To przede wszystkim²²⁷:

– obciążenie fizyczne (statyczne i dynamiczne) wynikające z nieprawidłowej pozycji ciała podczas pracy, zbyt ciężkich przedmiotów, które pracownik przenosi, złej organizacji pracy, nieprzestrzeganie przepisów BHP,

– obciążenie psychiczne (takie jak: obciążenie umysłu, niedociążenie i przeciążenie percepcyjne, obciążenie emocjonalne). Ich nasilenie zależy przede wszystkim od złożoności, powtarzalności, zmienności, ważności oraz dokładności wykonywanych czynności.

3. Robot współpracujący bezpośrednio z człowiekiem może wykonywać bardzo precyzyjne zadania, również w warunkach słabej widoczności i braku miejsca (np. na swobodne manewrowanie dłońmi). Odpowiednia integracja i dbałość o bezpieczeństwo sprawiają, że roboty przemysłowe mogą pracować wraz z ludźmi.

4. Pomimo dużego zainteresowania egzoszkieletemi o przeznaczeniu przemysłowym, ich wdrożenie na dużą skalę w przemyśle jest wciąż znikome. Każdy egzoszkielec musi być indywidualnie dopasowywany do użytkownika. W efekcie wdrożenia robotów i egzoszkieleców można stworzyć niezwykle ergonomiczne stanowiska pracy, na których pracownicy nie ulegają nadmiernemu obciążeniu i zmęczeniu.

²²⁷ R. Majer, D. Lesner, *Pracodawca musi analizować wszystkie szkodliwe czynniki środowiska pracy*, <https://www.prawo.pl/kadry/czynniki-niebezpieczne-w-srodowisku-pracy,188913.html>, 28.11.2022.

3. Badania własne

3.1. Metodyka badań

Punktem wyjścia dla doboru metod badawczych był postawiony w dysertacji cel: **opracowanie modelu ergonomicznego balansowania linii produkcyjnej przy uwzględnieniu obciążenia i uciążliwości pracy.**

Istotnym aspektem doboru metody naukowej była potrzeba zestawienia dostępnego dorobku naukowego dotyczącego balansowania linii montażowej z rozwiązaniem problemu badawczego. Podjęto decyzję o pogłębieniu studiów literaturowych, rozszerzając wywód rozprawy o następujące metody badawcze:

- **obserwacje** – metoda zastosowana w badaniu dotyczącym rozrzutu czasu (rozdział 3.2).
- **badania ankietowe i wywiady z ekspertami** zastosowano w badaniu dotyczącym ważności czynników podczas ergonomicznego balansowania linii montażowej, rotacji pracowników na linii montażowej oraz przy opinii dotyczącej pracy z egzoszkieletem (rozdziały 3.3, 3.4, 3.5 oraz 3.6).
- **eksperyment** polegający na badaniu możliwości wdrożenia egzoszkieletu (rozdział 3.6).
- **studium przypadku** – metoda zastosowana w badaniu dotyczącym ergonomicznej rotacji pracowników (rozdział 3.7).

W dalszej części pracy zostało opisanych siedem badań, dzięki którym odpowiedziano na wszystkie pytania badawcze i które miały na celu opracowanie podstaw dla modelu ergonomicznego balansowania linii. Przeprowadzonymi badaniami były:

Badanie 1: Badanie dotyczące rozrzutu czasu.

Metoda: obserwacja uczestnicząca, jawna.

Celem badania było stworzenie rankingu, środków zaradczych oraz określenie, które z nich są szczególnie korzystne w celu redukcji rozrzutu czasu, a które powinny być stosowane rzadziej lub wcale.

Miejsce przeprowadzenia badania: obserwacje przeprowadzono w 2 zakładach produkujących samochody użytkowe na 5 liniach montażowych oraz w 2 zakładach produkujących samochody

osobowe na 3 liniach montażowych, głównie podczas warsztatów optymalizujących linie montażowe. Okres wykonywania obserwacji obejmował lata 2019–2022.

Wynikiem przeprowadzonych badań było opracowanie rankingu środków zaradczych w celu minimalizacji rozrzutu czasu.

Badanie 2: Badanie dotyczące ważności czynników podczas ergonomicznego balansowania linii.

Metoda: w ramach metody ankietowej przeprowadzono wywiady z ekspertami od planowania i balansowania linii produkcyjnej. Opracowany kwestionariusz zawierał 30 pytań i ocenę w skali od 1 do 5, gdzie 1 – bardzo mała ważność, 2 – mała ważność, 3 – średnia ważność, 4 – duża ważność, 5 – bardzo duża ważność. Przekazanie kwestionariusza ekspertom odbyło się za pomocą poczty elektronicznej (e-mail). Po przeprowadzeniu badania zostało zorganizowane spotkanie online, gdzie przedstawiono uzyskane wyniki.

Cel badania: ustalenie hierarchii ważności kryteriów (związanych z planowaniem produkcji, ergonomią miejsca pracy oraz produktywnością procesów) ważnych w ergonomicznym balansowaniu linii montażowej.

Miejsce przeprowadzenia badania: badanie zostało przeprowadzone w dużych przedsiębiorstwach (powyżej 9.000 zatrudnionych) produkujących samochody osobowe i użytkowe na terenie Polski, Niemiec i Czech.

Uczestnicy badania: w badaniu ankietowym wzięli udział respondenci reprezentujący duże przedsiębiorstwa z branży automotive. Większość ankiet (82%) pochodziła z firmy Volkswagen Group Services GmbH. W badaniu mogli wziąć udział eksperci posiadający minimum 3-letnie doświadczenie w planowaniu procesów produkcyjnych.

Wynikiem przeprowadzonych badań było uzyskanie listy z hierarchią ważności czynników wpływających na zbalansowanie ergonomiczne linii montażowej.

Badanie 3 i 4: Badanie dotyczące rotacji pracowników na linii montażowej.

Metoda: ze względu na wspólny cel badanie 3 i 4 zostało opisane i podsumowane w punkcie 4.4. W ramach metody pomiaru pośredniego przeprowadzono ankietę z ekspertami od planowania rotacji pracowników. W drugim badaniu przeprowadzono wywiady na podstawie specjalnie przygotowanego kwestionariusza.

Ankieta: opracowany kwestionariusz składał się z dwóch części. Pierwsza składała się z 13 pytań. Należało w niej określić ważność czynników podczas planowania/wyznaczania rotacji pracowników. Wprowadzono skalę od 1 do 5, gdzie 1 – bardzo mała ważność, 2 – mała ważność, 3 – średnia ważność, 4 – duża ważność, 5 – bardzo duża ważność. Druga część dotyczyła subiektywnej opinii, które partie ciała są narażone najbardziej na obciążenia podczas wykonywania zadań w zespole. Skala oceny ważności czynnika: 1 – bardzo niskie obciążenie; 2 – niskie obciążenie, 3 – średnie obciążenie, 4 – duże obciążenie, 5 – bardzo duże obciążenie.

Wywiad kwestionariuszowy: opracowany kwestionariusz zawierał 25 pytań i dotyczył 4 zagadnień. Pytania były zarówno otwarte, jak i zamknięte. Pierwsza część wywiadu składała się z pytań ogólnych dotyczących pracowników zatrudnionych w danym zespole produkcyjnym. Druga dotyczyła sposobu przydzielania i organizacji rotacji pracowników w danym zespole produkcyjnym. Z kolei trzecia część wywiadu dotyczyła stanu zdrowia pracowników, a czwarta korzystania przez pracowników z urządzeń technicznych.

Cel badania: przeprowadzenie badania miało na celu rozpoznanie czynników oraz ich wpływów i znaczenie podczas planowania rotacji pracowników.

Miejsce przeprowadzenia badania: badanie zostało przeprowadzone w firmie Volkswagen Group Services w Niemczech oraz w dużej firmie powyżej 9.000 zatrudnionych produkującej samochody użytkowe na terenie Polski.

Uczestnicy badania: w badaniu wzięli udział respondenci reprezentujący duże przedsiębiorstwa z branży automotive. W ankiecie wzięło udział 27 pracowników, a w wywiadzie 23, byli to brygadziści (95%) oraz mistrzowie linii (5% badanych).

Wynikiem przeprowadzonych badań było opracowanie zasad i ograniczeń dla algorytmu matematycznego do planowania rotacji pracowników.

Badanie 5: Badanie dotyczące zastosowania egzoszkieleτών.

Metoda: pierwszą wykorzystaną metodą badawczą był eksperyment, który polegał na pracy z egzoszkielem na kończyny dolne. W tym celu lekarz medycyny pracy przebadał pracowników, którzy zgodzili się na wzięcie udziału w eksperymencie. Wytypowano dwa stanowiska, na których pracowano z urządzeniem Chairless Chair. W ramach metody ankietowej przeprowadzono codziennie wywiady z pracownikami linii montażowej, którzy oceniali użyteczność egzoszkieletu. Pracownicy mogli ocenić każde pytanie (opisane w rozdziale 3.5.1) w skali od 1 do 5, gdzie 1

oznacza, że pracownik całkowicie zgadza się z twierdzeniem, 5 – że pracownik zupełnie nie podziela tego zdania.

Cel badania: sprawdzenie przydatności urządzeń Chairless Chair w celu odciążenia kończyn dolnych oraz kręgosłupa podczas pracy w komorze silnika oraz uzyskanie informacji na temat komfortu pracy udzielonej przez ich użytkowników.

Miejsce przeprowadzenia badania: badanie zostało przeprowadzone w dużej firmie (powyżej 9.000 zatrudnionych) produkującej samochody użytkowe na terenie Polski.

Uczestnicy badania: w eksperymencie i badaniu ankietowym wzięło udział 16 pracowników z 4 linii montażowych.

Wynikiem przeprowadzonych badań było uzyskanie informacji na temat stopnia odciążenia układu mięśniowo-szkieletowego oraz komfortu pracy podczas pracy z egzoskieletem.

Badanie 6: Wywiady z ekspertami do spraw zdrowia.

Metoda: w ramach wywiadu swobodnego przeprowadzono rozmowy z 2 lekarzami medycyny pracy, 3 fizjoterapeutami oraz 4 ergonomistami. Wywiad polegał na wymianie pytań i odpowiedzi w formie nieustrukturyzowanej, natomiast jego cel był z góry określony. W miarę potrzeb poszczególne wątki były rozwijane poprzez zadawanie pytań pogłębiających lub doprecyzowujących.

Cel badania: analiza uzyskanych wyników z badań ankietowych oraz omówienie kwestii związanych z ograniczeniami ergonomicznymi podczas planowania rotacji pracowników.

Miejsce przeprowadzenia badania: wywiady odbywały się na planowanych wcześniej spotkaniach, które miały miejsce na terenie zakładu produkcyjnego (w biurze i przy linii montażowej). Część wywiadów odbywała się przy użyciu komunikatorów internetowych.

Uczestnicy badania: w wywiadzie wzięli udział respondenci reprezentujący duże przedsiębiorstwa z branży automotive (lekarz medycyny pracy, ergonomiści i pracownicy działu bhp) oraz pracownicy placówek medycznych: lekarz i dwóch fizjoterapeutów, którzy mają pod opieką pacjentów pracujących na liniach montażowych zakładów automotive.

Wynikiem przeprowadzonych badań było opracowanie „Karty pracownika” oraz „Karty stanowiska”.

Badanie 7: Badanie dotyczące zastosowania algorytmu rotacji pracowników.

Metoda: Kolejną z wykorzystanych metod w dysertacji są badania jakościowe. Jest to studium przypadku (*case study*). W odniesieniu do nauk o zarządzaniu studium przypadku to szczegółowy opis, zazwyczaj rzeczywistego zjawiska gospodarczego, np. organizacji planowania rotacji pracowników w celu sformułowania wniosków o przyczynach i rezultatach jego przebiegu. Przeprowadzenie badań za pomocą metody wielokrotnego studium przypadków zalecane jest, gdy celem badań jest testowanie istniejącej teorii lub jej poprawa²²⁸.

Cel badania: opracowanie i testowanie narzędzia do wyznaczenia optymalnej rotacji pracowników z uwzględnieniem obciążenia poszczególnych partii mięśni i części ciała.

Miejsce przeprowadzenia badania: w celu przeprowadzenia pierwszych badań i weryfikacji nad ergonomiczną rotacją pracowników autor stworzył symulację linii montażowej składającej się z 9 taktów, na której montowany był 1 model samochodu, ale w wielu wariantach zabudowy. Czas taktu wynosił 2 minuty, pracownicy rotowali kolejno na stanowiska, zmieniając je co 2 godziny.

Uczestnicy badania: dla scenariuszy symulacyjnych opracowano dane o stanie zdrowia dla 15 pracowników. W zależności od prowadzonych scenariuszy dane o stanie zdrowia były zmieniane ze względu na potrzebę sprawdzenia poprawnego działania narzędzia. Dla badania przedstawionego w punkcie 4.7 zaplanowano następujące ograniczenia: 4 pracowników miało stwierdzone przez lekarza medycyny pracy duże problemy z kolanami, kolejnych 4 pracowników umiarkowane problemy ze stawami kolanowymi. Pozostali pracownicy byli zdrowi,

Wynikiem przeprowadzonych badań było uzyskanie planu ergonomicznej rotacji pracowników wraz z podziałem punktów ergonomicznych na każdy dzień pracy oraz wizualizacja obciążenia poszczególnych partii mięśni i części ciała.

3.2. Badanie dotyczące rozrzutu czasu

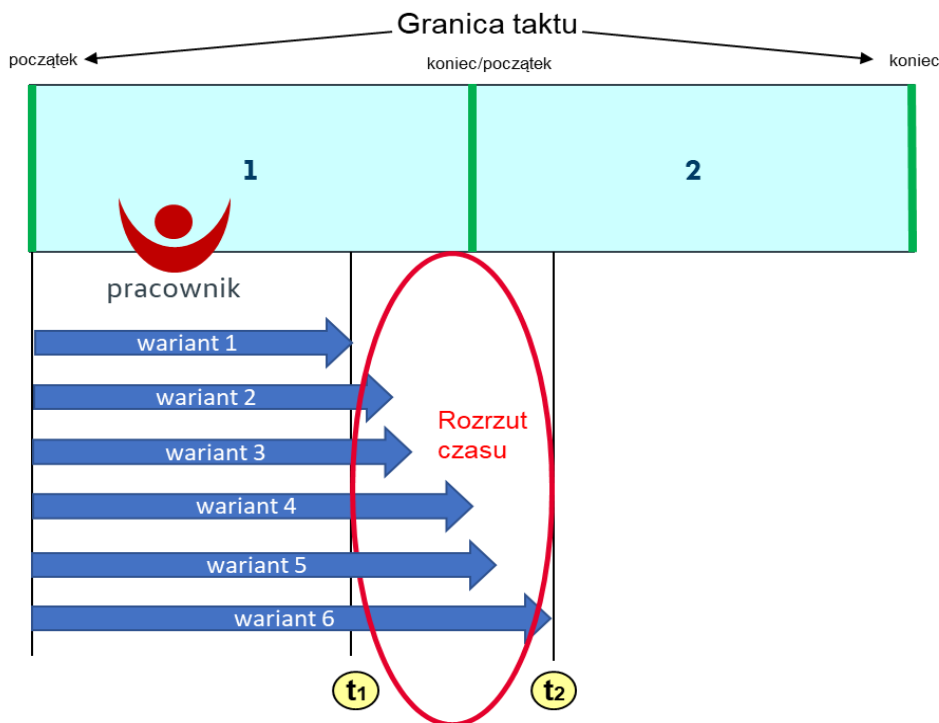
3.2.1. Opis i wyniki badań

Szczególnie w produkcji pojazdów użytkowych można zaobserwować, że zróżnicowanie produkowanego asortymentu jest bardzo wysokie.auta występują zarówno w wersji dostawczej, jak i osobowej. Ze względu na pandemię, a – co za tym idzie – wzmożoną ilość zakupów przez

²²⁸ szerzej: P. Wójcik, *Znaczenie studium przypadku jako metody badawczej w naukach o zarządzaniu*, „E-mentor”, 2013, nr 1(48), www.e-mentor.edu.pl/artykul/index/numer/48/id/983, 4.03.2015.

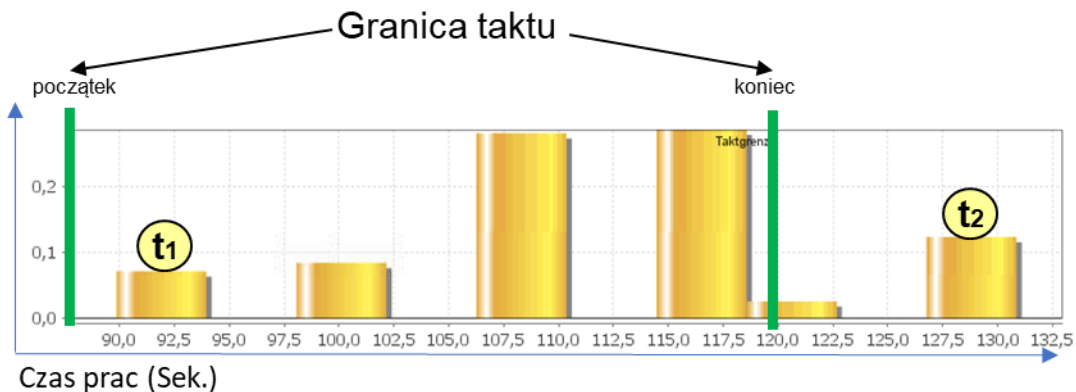
internet, samochody użytkowe stały się bardzo ważne w łańcuchu dostaw produktów do klientów. Ponieważ chodzi o pojazdy użytkowe, to warto wiedzieć, że ponad 70% produkcji fabryki stanowią samochody ze specjalną zabudową (informacja z fabryki samochodów użytkowych we Wrześni), realizowaną na zamówienie pod konkretne potrzeby odbiorców. Konkurencja w segmencie samochodów dostawczych jest duża, pomimo że wiele modeli różni się od siebie nieznacznie. Zazwyczaj są w nich zastosowane podobne rozwiązania. Może się więc wydawać, że różnice pojawiają się jedynie w rodzaju znaczka umieszczonego na masce. Nic bardziej błędnego. Samochody dostawcze muszą być niezawodne i dawać możliwość indywidualnego dopasowania do biznesu. Pojazdy w analizowanym badaniu proponowane są z dwoma rozstawami osi w kilku długościach nadwozia. Wybierając samochód, można skorzystać z szeregu konfiguracji drzwi tylnych i bocznych. Wysoka paleta oferowanych produktów wpływa na procesy produkcyjne i na powstawanie tzw. rozrzutu czasu, który należy równoważyć pomiędzy stanowiskami w celu balansowania linii.

Rysunek nr 10 przedstawia dwa takty produkcyjne i pracownika montażowego na takcie pierwszym. Grafika pokazuje sytuację, w której powstaje rozrzut czasu ze względu na produkcję sześciu różnych wariantów zabudowy. Każdy z nich ma inny czas wykonania zadań.



Rysunek 10. Rozrzut czasu. Źródło: opracowanie własne.

Dla powyższego przykładu przedstawiony jest poniżej diagram słupkowy na Rysunku 11 z granicami taktu, który pokazuje rozrzut czasu podczas 2-minutowego czasu taktu. Zaplanowane zadania dla wariantu 1, 2, 3 i 4 pracownik jest w stanie wykonać w wyznaczonym takcie, natomiast w dwóch ostatnich wariantach pracownik przekroczy czas dla zaplanowanego czasu taktu.

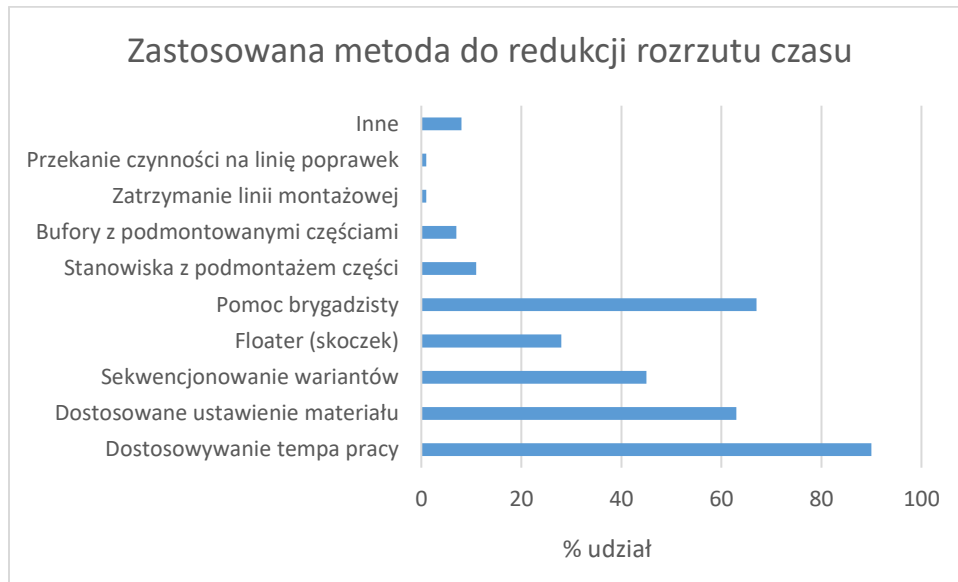


Rysunek 11. Rozrzut czasu. Źródło: opracowanie własne.

Na osi współrzędnych x przedstawionych jest 6 bloków zadań w zależności od produkowanego wariantu samochodu. Każdy z wariantów został wyceniony czasowo na podstawie metody MTM UAS (w sekundach). Oś y przedstawia procentowy udział danego wariantu na opisanym stanowisku pracy.

3.2.2. Wnioski z badań

Z przeprowadzonych obserwacji wynika, że najskuteczniejszą metodą walki z rozrzutem czasu jest wprowadzanie **sekwencjonowania wariantów**, które polega na wyznaczeniu tzw. restrykcji lub ograniczeń. Można wprowadzić tzw. twarde i miękkie restrykcje. Twardych restrykcji należy bezwzględnie przestrzegać, aby produkcja była płynna i nie dochodziło do zatrzymywania linii, natomiast miękkie pomagają w lepszym równoważeniu obciążenia linii montażowej. Na Wykresie 1 pokazane są wyniki przeprowadzonych obserwacji na kilku liniach montażowych i procentowy udział zastosowanej metody do redukcji rozrzutu czasu.



Wykres 1. Zastosowanie metody do redukcji rozrzutu czasu. Źródło: opracowanie własne.

Na Rysunku 12 przedstawiono kilka typów karoserii pojazdów użytkowych:



Rysunek 12. Rodzaje karoserii. Źródło: <https://www.vwdostawcze.pl/pl/modele.html>, 20.11.2022.

Samochody użytkowe produkowane są w wersji cargo (transport materiałów) lub jako multivany (transport pasażerów). Wielofunkcyjność wymusza zabudowę części na danym takcie,

która może się w 100% różnić dla pojazdów caro i multiwan. W przypadku występowania dużych rozrzutów czasu wprowadzenie restrykcji pozwala skutecznie zbalansować obciążenia pracą na linii montażowej.

Przykłady wprowadzania ograniczeń restrykcji twardych:

Pod pojęciem restrykcji twardych rozumie się takie założenia planu produkcyjnego (ustalona kolejność zabudowy poszczególnych karoserii), które należy bezwzględnie przestrzegać w celu zminimalizowania rozrzutu czasu. Do rozrzutu czasu dochodzi często nawet w produkcji aut tego samego modelu na jednej linii montażowej. Przykładem są stanowiska pracy w komorze silnika, gdzie zabudowywane są elementy dla aut z silnikami spalinowymi, hybrydowymi i elektrycznymi. Zabudowa części do samochodów elektrycznych może w znaczny sposób obciążać jedno stanowiska na linii montażowej, natomiast zabudowa części do silników spalinowych obciąża inne stanowiska bądź linie. Ze względu na obszar zabudowy (silnik – kontakt ze smarami) nie zawsze można wyznaczyć inne alternatywne zadania, np. w środku karoserii (tapicerki, siedzenia, dach – wymagane czyste rękawice). W takim przypadku, aby równoważyć obciążenie stanowisk pracy, można wprowadzić restrykcje, które niwelują powstałe odchylenia. W przypadku, kiedy program produkcyjny dla silników spalinowych i elektrycznych jest taki sam (50% na 50%), należałoby wprowadzić restrykcję, aby co drugi samochód do zabudowy był z silnikiem elektrycznym, aby wyrównać obciążenie pracą w danym obszarze linii montażowej. Ważne jest, aby restrykcje sprawdzały się na długości całego montażu, na wszystkich liniach produkcyjnych.

W przypadku zabudowy części z niskim procentem zabudowy, a z długim czasem wykonania zadania roboczego (danego wariantu), warto wprowadzić restrykcje twardą, aby taki pojazd pojawiał się na linii z zaplanowaną częstotliwością. Dodatkowo należy przyporządkować do stacji roboczej czynności, które wzajemnie się wykluczają, dzięki czemu można zredukować czas oczekiwania.

Przykłady wprowadzania restrykcji miękkich: miękkie restrykcje pomagają w balansowaniu obciążenia linii montażowej, ale w szczególnych przypadkach mogą być nieuwzględniane w programie produkcyjnym. Jeżeli niemożliwe byłoby ustawienie takiego programu produkcyjnego, aby uwzględnić również restrykcje miękkie, to można z nich zrezygnować, aby umożliwić przestrzeganie restrykcji twardych. W przypadku jeśli dana partia zostanie zablokowana w lakierni, to po rozwiązaniu problemu partia takich samochodów może

zostać wpuszczona od razu na linię bez konieczności przestrzegania restrykcji (jeśli są one miękkie).

Poniżej zostały opisane możliwości minimalizacji rozrzutu czasu zaobserwowane na linii montażowej:

Bardzo prostym sposobem na zrekompensowanie różnicy w czasie montażu jest **dostosowanie tempa pracy** przez pracownika do konkretnego wariantu samochodu. Planowane wykorzystanie tego środka nie jest jednak pożądane. Można to wytłumaczyć faktem, że szybsza praca powoduje wzrost prawdopodobieństwa, że ucierpi na tym jakość oraz wystąpią błędy. Zazwyczaj nie ma również akceptacji tego rozwiązania wśród pracowników i przedstawicielei związków zawodowych.

Dostosowywanie środków techniki: innym sposobem na zmniejszenie różnicy w czasie montażu dla wariantów jest instalacja wkrętarek lub innych urządzeń techniki, które są szybsze i pozwalają na np. skrócenie czasu przykręcania lub nitowania części. Rozwiązanie wymaga inwestycji w nowe urządzenia.

Z obserwacji wynika, że często stosowanym rozwiązaniem jest planowanie pracownika określanego w literaturze jako *floater*, który nie jest przypisywany do danego stanowiska, a do całej linii montażowej (potocznie nazywany skoczkiem). *Floater* to dodatkowa siła robocza, która pomaga na przeciążonych stanowiskach pracy związanych z danym wariantem produktu.

Podobnym rozwiązaniem i najczęściej stosowanym jest **pomoc brygadzysty** (lidera grupy) w wariantach o wysokim nakładzie pracy. Brygadzista nie ma przypisanych stałych czynności montażowych i powinno się unikać tego typu rozwiązania. Akceptacja takiej inicjatywy nie jest oceniana pozytywnie.

Istotne znaczenie w redukcji rozrzutu czasu ma odpowiednie **rozmieszczenie pojemników i regałów z częściami** do zabudowy. W zależności od rozmieszczenia pojemników z częściami na linii montażowej zwiększa się lub zmniejsza droga, jaką pracownik musi przebyć, aby pobrać i dostarczyć część do miejsca realizacji zabudowy.

W przypadku, gdy istnieje możliwość wcześniejszego połączenia części ze sobą, można takie procesy zaplanować na **stanowiskach podmontażu**. Stanowiska te powinny być zlokalizowane jak najbliżej linii głównej, aby ograniczyć proces transportu (dostarczanie podzespołów do zabudowy). W przypadku niedotaktowanego stanowiska montażowego rozrzut

czasowy jest kompensowany przez dodatkowe czynności, które pracownik wykonuje również na linii montażowej.

Rozwiązaniem stosowanym na stanowiskach podmontażu jest **tworzenie buforów**. W takim przypadku produkowane są części na zapas. W ten sposób pracownik ma możliwość samodzielnego określenia swojego rytmu pracy pomimo określonego czasu cyklu. Jednak instalacja buforów przy liniach montażowych może prowadzić do znacznego wzrostu zapasów. Wzrost ten jest związany z wymaganą dodatkową przestrzenią dla magazynów buforowych.

Wśród zaobserwowanych metod redukcji czasów pojawiły się również takie rozwiązania, które nie są pożądane. Należą do nich:

– **zatrzymanie linii montażowej**: nie jest planowanym środkiem zaradczym, a jedynie skutkiem błędnego planowania procesów produkcyjnych. Zatrzymanie linii montażowej może nastąpić, jeżeli pracownik w dostępnym czasie taktu nie zdąży z wykonaniem zaplanowanych czynności. Jest to sytuacja niepożądana i bardzo kosztowna dla zakładu ze względu na spadek produktywności (pracownicy na pozostałych taktach nie mogą produkować i powstaje marnotrawstwo w postaci oczekiwania).

– **przekazanie niedokończonych zadań na tzw. linie poprawek**, gdzie zadania zostaną dokończone w późniejszym czasie. Przekazanie samochodu na linie poprawek powoduje wyższe koszty produkcji i może mieć również wpływ na pogorszoną jakość produktu końcowego.

Podsumowanie obserwacji:

Z punktu widzenia pracownika rozrzut czasowy jest również negatywny, ponieważ może prowadzić do stresu i błędów z powodu nierównomiernego obciążenia pracą i powstającej uciążliwości. Dzięki przeprowadzonym badaniom udało się odpowiedzieć na pierwsze pytanie badawcze: W jaki sposób równoważyć obciążenie pracą przy występującym rozrzucie czasu?

Najlepszym sposobem na minimalizację rozrzutu czasowego byłoby uwzględnianie tego aspektu podczas projektowania produktu (nie uwzględniono w rankingu, tabela poniżej). Takie rozwiązanie powinno być zastosowane dla projektowanych nowych produktów.

Najlepszym sposobem walki z redukcją rozrzutu czasu i tym samym równoważenia obciążenia pracą na istniejących już stanowiskach pracy jest **wprowadzanie sekwencji**, którą definiuje się poprzez ustalanie restrykcji (twardych i miękkich). Nieprzestrzeganie tych ustaleń prowadzi do wielu błędów i problemów na liniach montażowych.

W Tabeli 4, w kolumnie „Ranking” zaznaczono na zielono najlepsze praktyki. Na żółto podkreślono środki, które mają zalety, ale również i wady. Na czerwono wyodrębniono te, których należy bezwzględnie unikać.

W Tabeli 4 przedstawiono podsumowanie przeprowadzonych obserwacji.

Ranking	Zastosowana metoda redukcji czasu	Koszt zastosowania rozwiązania		Akceptacja przez pracowników		Wpływ na zmniejszenie rozrzutu		Stopień trudności wdrożenia	
		wysoki	niski	tak	nie	wysoki	niski	łatwe	trudne
Środki zaradcze planowane									
3.	Dostosowywanie tempa pracy		x		x		x		x
2.	Odpowiednie ustawienie materiału		x	x		x			x
1.	Sekwencjonowanie wariantów		x	x		x		x	
2.	Floater (skoczek)		x	x			x	x	
3.	Pomoc brygadzysty		x		x		x		x
2.	Stanowiska z podmontażem części	x		x		x		x	
2.	Bufony z podmontowanymi częściami	x		x		x		x	
Środki zaradcze nieplanowane									
4.	Zatrzymanie linii montażowej	x			x		x		x
4.	Przekazanie czynności na linię poprawek	x			x		x		x
	Inne	x			x		x		x

Tabela 4. Ranking środków zaradczych w celu redukcji rozrzutu czasu. Źródło: opracowanie własne.

3.3. Badanie dotyczące ważności czynników podczas ergonomicznego balansowania linii

3.3.1. Opis i wyniki badań

W ramach realizacji niniejszej dysertacji przeprowadzono badania ankietowe wśród pracowników planowania i przygotowania procesów produkcyjnych realizujących obowiązki zawodowe w dużych przedsiębiorstwach produkcyjnych z branży motoryzacyjnej. Badano opinię ekspertów w celu ustalenia hierarchii ważności czynników podczas ergonomicznego balansowania linii montażowej.

Pierwsza część ankiety (pytania 1–10) dotyczyła pytań ogólnych związanych z balansowaniem linii montażowej. W toku badania ustalono, że eksperci w większości wskazywali, iż w ergonomicznym balansowaniu linii montażowej największą wagę można

przypisać **brakom postojów na stacjach roboczych** oraz **wyznaczanie najbardziej korzystnego przydziału operacji do stanowisk w trakcie montażu w celu minimalizacji rozrzutów czasu**.

Druą część ankiety (pytania 11–25) dotyczyła pytań związanych z działaniami ergonomicznymi. Uczestnicy badania wskazywali czynniki decydujące o ergonomii stanowisk pracy. Ankietowani podawali tutaj, że ich zdaniem najważniejsze jest **zapewnienie minimalizacji narażenia pracownika na urazy wynikające z wykonywania zadań**. Poza tym podkreślano wagę zapewnienia **prawidłowych czynników fizycznych** na stanowisku roboczym oraz potrzebę wyznaczenia rotacji na stanowiskach, która zbalansuje obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego.

Trzecia część ankiety (pytania 26–30) dotyczyła pytań związanych z miernikami produktywności. Ustalono, że najwięcej wagi przykładano do **zapewnienia kompromisów między celami ekonomicznymi i ergonomicznymi**, a także **ustalenia możliwych do monitorowania kryteriów i wskaźników oceny** działalności komórek ds. procesów produkcyjnych i ergonomii.

Badanie zostały przeprowadzone w formie wywiadu nieformalnego na podstawie opracowanego scenariusza. Poniżej badana lista 30 czynników:

1. Wyznaczenie metody i sposobu pracy (np. zdefiniowanie pozycji chwytania).
2. Wyznaczenie najbardziej korzystnego przydziału operacji do stanowisk w trakcie montażu w celu minimalizacji rozrzutów czasu.
3. Zapewnienie braków postojów na stacjach roboczych.
4. Wyznaczenie i tworzenie stanowisk dla pracowników z niepełnosprawnością ruchową, pracowników o mniejszej wydajności.
5. Wspomaganie pracownika środkami techniki (manipulatory).
6. Wyznaczenie harmonogramu realizacji przedsięwzięcia w celu skrócenia czasu wykonywania poszczególnych czynności.
7. Wyznaczenie/planowanie budżetu przedsięwzięcia (skrócenie czasu wykonywania czynności montażowych).
8. Powołanie kompetentnego zespołu realizującego przedsięwzięcie (skrócenie czasu wykonywania czynności montażowych).
9. Dobór kompetentnych członków zespołu ds. optymalizacji procesów.

10. Zapewnienie pełnego wsparcia najwyższego kierownictwa w działalność komórki ds. optymalizacji procesów.
11. Zapewnienie minimalizacji narażenia pracownika na urazy wynikające z wykonywania zadań.
12. Mapowanie stanowisk o najwyższym stopniu zagrożeń biomechanicznych.
13. Wyznaczenie rotacji na stanowiskach, która zbalansuje obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego.
14. Określenie całościowego wyniku obciążenia na układ mięśniowo-szkieletowego dla danego pracownika.
15. Określenie całościowego wyniku obciążenia na układ mięśniowo-szkieletowego dla danego stanowiska pracy.
16. Zapewnienie prawidłowych czynników fizycznych (oświetlenie, hałas) w miejscu pracy.
17. Skorelowanie stanowisk z antropometrią pracowników.
18. Dostosowanie biomechanicznego obciążenia pracy do konkretnego pracownika.
19. Wyznaczenie harmonogramu realizacji przedsięwzięcia w celu poprawy warunków pracy.
20. Wyznaczenie/planowanie budżetu przedsięwzięcia (poprawa warunków ergonomicznych).
21. Powołanie kompetentnego zespołu realizującego przedsięwzięcie (poprawa warunków ergonomicznych).
22. Dobór kompetentnych członków zespołu ds. ergonomii.
23. Zapewnienie pełnego wsparcia najwyższego kierownictwa w działalność komórki ds. ergonomii.
24. Zapewnienie możliwości skorzystania przez dział planowania procesów z doradztwa działu zdrowia, bhp lub z zewnętrznego doradztwa przy projektowaniu stanowisk pracy.
25. Priorytetowe traktowanie bezpieczeństwa pracowników w przedsiębiorstwie.
26. Mapowanie wartości dodanej i marnotrawstw.
27. Wprowadzenie pracy zmianowej.
28. Dążenia do bezinwestycyjnej racjonalizacji, czyli do polepszania warunków systemów pracy przy stosunkowo małych nakładach inwestycyjnych.
29. Zapewnienie kompromisów między celami ekonomicznymi i ergonomicznymi.
30. Ustalenie możliwych do monitorowania kryteriów i wskaźników oceny działalności komórek ds. procesów produkcyjnych i ergonomii.

Uzyskane wyniki przedstawiono w Tabeli 5.

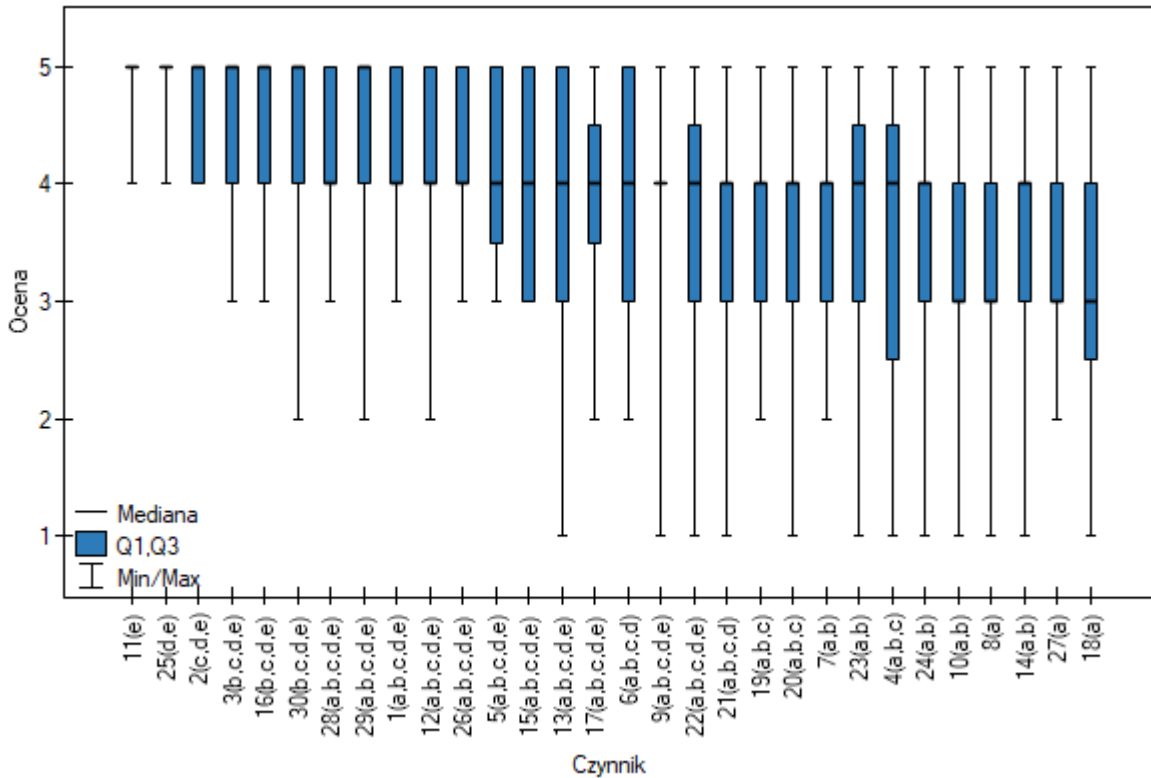
Czynnik	Średnia arytmetyczna	Odchylenie standardowe	Minimum	Dolny kwartył	Mediana	Górny kwartył	Maksimum	Test post-hoc Dunna z poprawką Bonferroniego					
								Jednorodne grupy	A	B	C	D	E
11	4,91	0,29	4	5	5	5	5	(e)					*
25	4,83	0,39	4	5	5	5	5	(d,e)				*	*
2	4,65	0,49	4	4	5	5	5	(c,d,e)			*	*	*
3	4,61	0,58	3	4	5	5	5	(b,c,d,e)		*	*	*	*
16	4,52	0,73	3	4	5	5	5	(b,c,d,e)		*	*	*	*
30	4,48	0,85	2	4	5	5	5	(b,c,d,e)		*	*	*	*
28	4,39	0,66	3	4	4	5	5	(a,b,c,d,e)	*	*	*	*	*
29	4,30	1,02	2	4	5	5	5	(a,b,c,d,e)	*	*	*	*	*
1	4,13	0,69	3	4	4	5	5	(a,b,c,d,e)	*	*	*	*	*
12	4,09	0,79	2	4	4	5	5	(a,b,c,d,e)	*	*	*	*	*
26	4,09	0,73	3	4	4	5	5	(a,b,c,d,e)	*	*	*	*	*
5	4,04	0,77	3	3,5	4	5	5	(a,b,c,d,e)	*	*	*	*	*
15	4,04	0,82	3	3	4	5	5	(a,b,c,d,e)	*	*	*	*	*
13	3,96	1,15	1	3	4	5	5	(a,b,c,d,e)	*	*	*	*	*
17	3,96	0,82	2	3,5	4	4,5	5	(a,b,c,d,e)	*	*	*	*	*
6	3,91	0,90	2	3	4	5	5	(a,b,c,d)	*	*	*	*	
9	3,91	0,90	1	4	4	4	5	(a,b,c,d,e)	*	*	*	*	*
22	3,87	0,97	1	3	4	4,5	5	(a,b,c,d,e)	*	*	*	*	*
21	3,78	0,95	1	3	4	4	5	(a,b,c,d)	*	*	*	*	
19	3,65	0,93	2	3	4	4	5	(a,b,c)	*	*	*		
20	3,65	1,07	1	3	4	4	5	(a,b,c)	*	*	*		
7	3,61	0,78	2	3	4	4	5	(a,b)	*	*			
23	3,52	1,20	1	3	4	4,5	5	(a,b)	*	*			
4	3,48	1,38	1	2,5	4	4,5	5	(a,b,c)	*	*	*		
24	3,48	1,08	1	3	4	4	5	(a,b)	*	*			
10	3,43	1,16	1	3	3	4	5	(a,b)	*	*			
8	3,39	1,08	1	3	3	4	5	(a)	*				
14	3,39	1,31	1	3	4	4	5	(a,b)	*	*			
27	3,39	0,99	2	3	3	4	5	(a)	*				
18	3,30	1,18	1	2,5	3	4	5	(a)	*				
Test Friedmana T=176,09, df=29, p<0,0001													

Tabela 5. Wyniki czynników - ergonomiczne balansowanie (sortowanie według średniej)
Źródło: opracowanie własne.

Jeżeli przy dwóch porównywanych czynnikach występuje chociaż jedna taka sama (wspólna) litera, to te dwa czynniki nie różnią się istotnie od siebie ($p > 0,05$). Przykładowo czynnik

1 ma litery (a, b, c, d, e), a czynnik 2 ma litery (c, d, e), czyli czynnik 1 i 2 mają wspólne litery (c, d, e), zatem nie różnią się od siebie. Czynnik 10 ma litery (a, b) i czynnik 11 posiada literę (e). Wynika z tego, że czynnik 10 i 11 nie ma wspólnej litery, czyli różnią się od siebie istotnie ($p < 0,05$).

Dane zostały przedstawione również na Wykresie 2:



Wykres 2. Wyniki czynników – ergonomiczne balansowanie (sortowanie według średniej).
Źródło: opracowanie własne.

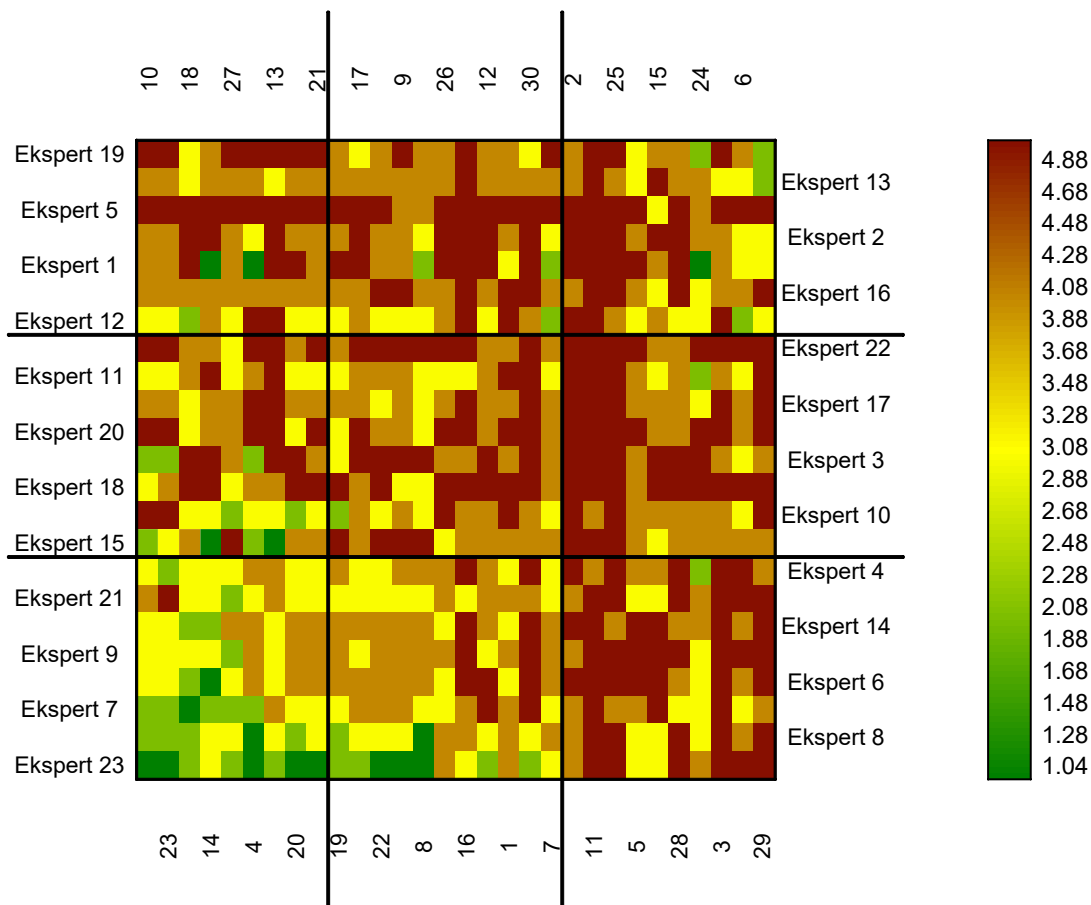
Metoda użyta do analizy danych:

Analizy statystyczne przeprowadzono za pomocą pakietu statystycznego PQStat w wersji 1.8.4.152. Wyniki analizowanych skal porównywano testem Friedmana oraz post-hoc testem Dunna z poprawką Bonferroniego. Za istotne przyjęto prawdopodobieństwo testowe na poziomie $p < 0,05$, a za wysoce istotne przyjęto prawdopodobieństwo testowe na poziomie $p < 0,01$.

Wyniki:

Stwierdzono wysoce istotne ($p < 0,01$) różnice między czynnikami. Najwyższe oceny stwierdzono w przypadku czynnika 11, 25, oraz 2 i 3, a najniższe dla 8, 14, 27 i 18. Współczynnik zgodności Kendalla wynosił 0,2640, a średni współczynnik korelacji Spearmana wynosił 0,2305, czyli zgodność ocen wystawianych przez sędziów była niska.

Wykres 3 przedstawia analizę gradacyjną wraz podziałem na skupienia:



Wykres 3. Analiza gradacyjna wraz z analizą skupień. Źródło: opracowanie własne.

Czynniki 10, 23, 18, 14, 27, 4, 13, 20 i 21 tworzą pierwsze skupienie, które część ekspertów ocenia wysoko, ale równie często są one nisko ocenione przez inną grupę ekspertów. Jednocześnie grupa ekspertów 4, 21, 14, 9, 6, 7, 8, 23 nisko oceniła powyższe skupienia, ale wysoko ocenia trzecie skupienie, w skład którego wchodzi czynniki 1, 11, 25, 5, 15, 28, 24, 3, 6 i 29.

3.3.2. Wnioski z badań

Analiza uzyskanych wyników badań eksperckich wskazuje, że występuje kilka kluczowych elementów w badanych obszarach, które wpływają na ergonomiczne balansowania linii. Ustalono, że największa wartość została przypisana przez ekspertów dwóm elementom i były to: wyznaczenie najbardziej korzystnego przydziału operacji do stanowisk w trakcie montażu w celu minimalizacji rozrzutów czasu (107 punktów) oraz zapewnienie braków postojów na stacjach roboczych (106 punktów). Duże znaczenie przypisywano także:

- wyznaczeniu metody i sposoby pracy (95 punktów),
- wspomaganie pracownika środkami techniki (93 punktów).

W obszarze działań ergonomicznych eksperci uczestniczący w badaniu wskazali, że istotne jest zapewnienie minimalizacji narażenia pracownika na urazy wynikające z wykonywania zadań (113 punktów), ale także priorytetowe traktowanie bezpieczeństwa pracowników w przedsiębiorstwie (111 punktów). Mając na względzie, że ergonomia w pracy jest niezwykle istotnym elementem planowania produkcji i balansowania linii, stwierdzono, że zasadnym jest wskazanie na pozostałe elementy, które eksperci wymieniali jako ważne. I tak zwrócono uwagę tu na:

- zapewnienie prawidłowych czynników fizycznych (oświetlenie, hałas) w miejscu pracy (104 punkty),
- mapowanie stanowisk o najwyższym stopniu zagrożeń biomechanicznych (94 punkty),
- określenie całościowego wyniku obciążenia na układ mięśniowo-szkieletowego dla danego stanowiska pracy (93 punkty).

Ostatnim badanym obszarem była produktywność. W tym obszarze liderzy wskazali, że najważniejszymi jej elementami są: ustalenie możliwych do monitorowania kryteriów i wskaźników oceny działalności komórek ds. procesów produkcyjnych i ergonomii (103 punkty) oraz zapewnienie kompromisów między celami ekonomicznymi i ergonomicznymi oraz dążenie do bezinwestycyjnej racjonalizacji, czyli do polepszania warunków systemów pracy przy stosunkowo małych nakładach inwestycyjnych (101 punktów). Do innych ważnych elementów w tym zakresie zaliczono również:

- zapewnienie kompromisów między celami ekonomicznymi i ergonomicznymi (99 punktów),
- mapowanie wartości dodanej i marnotrawstw (94 punkty).

W badaniu odpowiadano na drugie pytanie badawcze: Jakie są najważniejsze czynniki decydujące o ergonomicznym zbalansowaniu linii montażowej?

Wybór najważniejszych czynników ergonomicznego balansowania linii

W celu podjęcia decyzji o wyborze najważniejszych czynników opisanych w powyższym badaniu wyznaczono skalę z punktacją, na podstawie której dokonano wyboru najważniejszych czynników. Posłużą one do opracowania modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej (rozdział 4). Do dalszej analizy postanowiono przyjąć grupy czynników, w których:

- średnie arytmetyczne przyjmowały wartość powyżej 4,0 (Tabela 7),
- suma punktów od wszystkich ekspertów przyjmowała wartość powyżej 92 punktów (Tabela 6).

➤ Punktacja (Max =115)		
115	93	czynniki bardzo ważne
92	70	czynniki ważne
69	47	czynniki średnio ważne
46	24	czynniki mało ważne
23	0	czynniki nie ważne

Tabela 6. Skala z punktacją. Źródło: opracowanie własne.

W Tabeli 7 przedstawiono hierarchię ważności czynników na podstawie sumy punktów od wszystkich ekspertów. Kolor zielony świadczy o zakwalifikowaniu czynnika, a żółty o odrzuceniu.

Punkty	Czynniki	
	Nr.	
91	1	Wyznaczenie metody i sposoby pracy (np. zdefiniowanie pozycji chwytania).
103	2	Wyznaczenie najbardziej korzystnego przydziału operacji do stanowisk w trakcie montażu w celu minimalizacji rozrzutów czasu.
101	3	Zapewnienie braków postojów na stacjach roboczych.
79	4	Wyznaczenie i tworzenie stanowisk dla pracowników z niepełnosprawnością ruchową, pracowników o mniejszej wydajności.
90	5	Wspomaganie pracownika środkami techniki (manipulatory).
85	6	Wyznaczenie harmonogramu realizacji przedsięwzięcia w celu skrócenia czasu wykonywania poszczególnych czynności.
80	7	Wyznaczenie/planowanie budżetu przedsięwzięcia (skrócenie czasu wykonywania czynności montażowych).
77	8	Powołanie kompetentnego zespołu realizującego przedsięwzięcie (skrócenie czasu wykonywania czynności montażowych).
89	9	Dobór kompetentnych członków zespołu ds. optymalizacji procesów.
78	10	Zapewnienie pełnego wsparcia najwyższego kierownictwa w działalności komórki ds. optymalizacji procesów.
108	11	Zapewnienie minimalizacji narażenia pracownika na urazy wynikające z wykonywania zadań.
92	12	Mapowanie stanowisk o najwyższym stopniu zagrożeń biomechanicznych.
89	13	Wyznaczenie rotacji na stanowiskach, która zbalansuje obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego.
75	14	Określenie całościowego wyniku obciążenia na układ mięśniowo-szkieletowego dla danego pracownika.
90	15	Określenie całościowego wyniku obciążenia na układ mięśniowo-szkieletowego dla danego stanowiska pracy.
101	16	Zapewnienie prawidłowych czynników fizycznych (oświetlenie, hałas) na miejscu pracy.
89	17	Skorelowanie stanowisk z antropometrią pracowników.
74	18	Dostosowanie biomechanicznego obciążenia pracy do konkretnego pracownika.
82	19	Wyznaczenie harmonogramu realizacji przedsięwzięcia w celu poprawy warunków pracy.
83	20	Wyznaczenie/planowanie budżetu przedsięwzięcia (poprawa warunków ergonomicznych).
86	21	Powołanie kompetentnego zespołu realizującego przedsięwzięcie (poprawa warunków ergonomicznych).
88	22	Dobór kompetentnych członków zespołu ds. ergonomii.
80	23	Zapewnienie pełnego wsparcia najwyższego kierownictwa w działalności komórki ds. ergonomii.
79	24	Możliwość skorzystania przez dział planowania procesów z doradztwa działu zdrowia, bhp lub z zewnętrznego doradztwa przy proj. stanowisk pracy.
109	25	Priorytetowe traktowanie bezpieczeństwa pracowników w przedsiębiorstwie.
90	26	Mapowanie wartości dodanej i marnotrawstw.
76	27	Wprowadzenie pracy zmianowej.
96	28	Dążenia do bezinwestycyjnej racjonalizacji, czyli do polepszenia warunków systemów pracy przy stosunkowo małych nakładach inwestycyjnych.
94	29	Zapewnienie kompromisów między celami ekonomicznymi i ergonomicznymi.
101	30	Ustalenie możliwych do monitorowania kryteriów i wskaźników oceny działalności komórki ds. procesów produkcyjnych i ergonomii.

Tabela 7. Zestawienie sumy punktów i określenie hierarchii ważności czynników. Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie uzyskanych wyników wybrano 13 najważniejszych czynników. Najwyżej oceniane były: 1, 2, 3, 5, 11, 12, 15, 16, 25, 26, 28, 29, 30. Analizując literaturę przedmiotu i uzyskane wyniki, dokonano podziału wytypowanych czynników i podzielono je na grupy czynników związanych z tematyką ergonomicznego balansowania linii montażowej:

- wyrównana i ustabilizowana produkcja (czynnik: 1, 2, 3),
- ergonomiczna rotacja pracowników (czynniki: 11, 25),
- optymalizacja procesów (czynniki: 12, 26),
- ocena ryzyka ergonomicznego (czynnik 15),
- zapewnienie czynników fizycznych (czynnik 16),
- wspomaganie pracownika środkami techniki (czynniki: 5, 28, 29),
- ocena ergonomicznego zbalansowania (czynnik 30).

W kolejnym kroku określono mierzalne kryteria dla wytypowanych czynników ergonomicznego balansowania linii, które będą brane pod uwagę w celu sprawdzenia efektywności zbalansowania linii montażowej i opisane w rozdziale 4.

Czynnik 1: Wyznaczenie metody i sposobu pracy (np. zdefiniowanie pozycji chwytania).

Metoda pracy opisuje, co ma zostać zrobione i w jaki sposób. Te określenia pokazują, że czas potrzebny dla wykonania określonych zadań na linii montażowej zależy od stosowanej metody. Określając metodę i sposób pracy, jest się w stanie określić średnie obciążenie czasowe (w przypadku występowania wariantów zabudowy) dla danego stanowiska. Możliwe do określenia jest kryterium: **średnie obciążenie stanowiska pracy**.

Czynnik 2: Wyznaczenie najbardziej korzystnego przydziału operacji do stanowisk w trakcie montażu w celu minimalizacji rozrzutów czasu.

Termin „rozrzut czasu” odnosi się do efektu spowodowanego różnymi czasami montażu i różnymi procesami montażu wariantów, które mają być produkowane na jednym stanowisku pracy na linii montażowej. Możliwe do określenia jest kryterium: **rozrzut czasu na stanowisku pracy**.

Czynnik 3: Zapewnienie braków postojów na stacjach roboczych.

Celem dobrego balansowania linii jest osiągnięcie równomiernego wykorzystania linii montażowej i unikanie postojów na stacjach roboczych. Aby osiągnąć zamierzony cel, zlecenia, które następują po sobie, powinny być tak dobierane, aby równoważyły się pod względem czasu. Na liniach montażowych o wysokiej wariantowości jest to możliwe dzięki wprowadzaniu restrykcji montażowych (badanie 1). Kryteria do oceny: **przestrzeganie twardych i miękkich ograniczeń (restrykcji) produkcyjnych**.

Czynnik 4: Wspomaganie pracownika środkami techniki (np. manipulatory).

Środki techniczne gwarantują skuteczne odciążenie układu mięśniowo-szkieletowego i chronią pracownika przed utratą zdrowia. Ważnym aspektem w procesie planowania wyposażenia linii montażowej jest uwzględnianie urządzeń (manipulatorów, egzoszkieleatów, podnośników), które chronią przed nadmiernym obciążeniem i uciążliwością pracy. Kryterium do oceny: **przebadana możliwość zastosowania usprawnień technicznych**.

Czynnik 5: Zapewnienie minimalizacji narażenia pracownika na urazy wynikające z wykonywania zadań oraz czynnik 6: priorytetowe traktowanie bezpieczeństwa pracowników

w przedsiębiorstwie. Zarówno minimalizację narażenia pracownika na urazy, jaki i priorytetowe traktowanie bezpieczeństwa pracy, można zrealizować za pomocą ergonomicznej rotacji pracowników, czyli systematycznej zmiany miejsc pracy. Wynikająca z tego ciągła zmiana obciążenia pracą pozwala uniknąć długotrwałego i jednostronnego obciążenia, co z kolei zapobiega chorobom i zaburzeniom układu mięśniowo-szkieletowego. Kryterium do oceny: **ergonomiczna rotacja pracowników.**

Czynnik 7: Mapowanie stanowisk o najwyższym stopniu zagrożeń biomechanicznych.

Brak ergonomiczności w zakresie stanowisk pracy uznaje się za marnotrawstwo, ponieważ może powodować wśród pracowników negatywne konsekwencje zdrowotne, zaś pracodawców narażać na zbędne koszty. Dodatkowo problem ten występuje przy monotonii pracy. Mapowanie stanowisk o najwyższym stopniu zagrożenia biomechanicznym pozwala na lepsze opracowanie środków zaradczych i eskalowanie problemu w ramach danego przedsiębiorstwa. Kryterium do oceny: **wskazanie nieergonomicznych stanowisk pracy.**

Czynnik 8: Określenie całościowego wyniku obciążenia na układ mięśniowo-szkieletowego dla danego stanowiska pracy.

Do obiektywnej oceny ryzyka ergonomicznego stosowana jest najczęściej metoda EAWS. Procedura opracowana została przez Instytut Ergonomii Uniwersytetu Technicznego w Darmstadt (IAD) i jest wykorzystywana w branży motoryzacyjnej do oceny fizycznych aspektów pracy. Uwzględnia ona postawę ciała, siły działania, ciężar przenoszonego ładunku. Kryterium: **liczba punktów ergo (EAWS) uzyskana w wyniku oceny ryzyka ergonomicznego danego stanowiska.**

Czynnik 9: Zapewnienie prawidłowych czynników fizycznych (oświetlenie, hałas) w miejscu pracy.

Brak zapewnienia odpowiednich czynników fizycznych niesie ze sobą wiele znacznych negatywnych skutków dla zdrowia pracownika. Czynniki fizyczne wpływają na emocje i umysł zatrudnionej osoby, a w efekcie na jakość pracy i jej efektywność. Mogą mieć duży wpływ na zdrowie człowieka, skutkować stresem a nawet wypaleniem zawodowym. Kryterium: **czynniki fizyczne: oświetlenie, temperatura powietrza, wilgotność powietrza, ruch powietrza,**

jonizacja powietrza, hałas, wibracje, pyły przemysłowe, areozole stałe i ciekłe, promieniowanie, ciśnienie.

Czynnik 10: Mapowanie wartości dodanej i marnotrawstw.

Każda organizacja zarządzana zgodnie z zasadami Lean Management nie tylko rozumie znaczenie wartości, ale pojmuje też istotę kategorii marnotrawstwa. LM ma bowiem na celu zmodyfikowanie procesu wytwarzania po to, by jakość pracy oscylowała na zadowalającym poziomie, a jednocześnie ponoszone koszty podlegały redukcji. Fundamentalnym dążeniem w LM jest stworzenie wzorca wartości z uwzględnieniem punktu widzenia odbiorcy (klienta) oraz procesów wytwórczych (wyeliminowanie marnotrawstwa). Kryteria do oceny: **marnotrawstwa: nadprodukcja, czas oczekiwania, transport, zapasy, zbędny ruch, błędy, poprawki, zbędne procesy, nieergonomiczne stanowiska pracy, niewystarczająca komunikacja.**

Czynnik 11: Dążenia do bezinwestycyjnej racjonalizacji, czyli do polepszania warunków systemów pracy przy stosunkowo małych nakładach inwestycyjnych oraz czynnik 12: zapewnienie kompromisów między celami ekonomicznymi i ergonomicznymi.

Charakterystyczną cechą zastosowania metod MTM w przedsiębiorstwach jest wzrost dążenia do bezinwestycyjnej racjonalizacji, czyli do polepszania warunków systemów pracy przy stosunkowo małych nakładach inwestycyjnych przez zastosowanie urządzeń, narzędzi i innych środków pracy, które mają doprowadzić do zmniejszenia obciążenia pracownika²²⁹.

Wykonanie operacji montażowych wymaga różnych wysokości linii transportowej, które nie zawsze stwarzają ergonomiczne warunki pracy dla operatora pracującego często z rękoma podniesionymi nad linią barków lub głowy. Ze względu na gabaryty samochodów użytkowych nie jest możliwe zastosowanie zawieszek obrotowych, jak często dzieje się to w przypadku produkcji samochodów osobowych. Ta sytuacja wymusza prace na różnych wysokościach, często w trakcie jednego taktu montażowego. Podczas przeprowadzania badania numer 1 autor zauważył, że istniejąca infrastruktura do zmiany wysokości linii transportowych często jest niewykorzystana. W ramach powyższej analizy postanowiono uwzględnić następujące kryteria: **dostosowana wysokość linii transportowej oraz przebadana możliwość usprawnień technicznych.**

²²⁹ MTM – Metoda podstawowa, Deutsche MTM-Vereinigung e.V., Hamburg 2004.

Czynnik 13: Ustalenie możliwych do monitorowania kryteriów i wskaźników oceny działalności komórek ds. procesów produkcyjnych i ergonomii.

Model ergonomicznego balansowania linii montażowej powinien umożliwić ocenę poziomu zbalansowania linii produkcyjnej. Aby dokonać takiej oceny, autor proponuje uwzględnienie wyżej opisanych kryteriów ze względu na możliwość określenia oceny lub poziomu spełnienia.

Kryterium: wynik ergonomicznego zbalansowania linii montażowej.

Podsumowanie hierarchii czynników oraz przydzielenie ich do odpowiednich grup i kryteriów przedstawiono w Tabeli 8.

Czynniki		Kryterium		
Lp.	czynnik	grupa czynników	skrót	nazwa
1.	Wyznaczenie metody i sposoby pracy (np. z	Wyrównana i ustabilizowana produkcja	D1	Średnie obciążenie stanowiska pracy
2.	Wyznaczenie najbardziej korzystnego przyd	Wyrównana i ustabilizowana produkcja	D2	Rozrzut czasu na stanowisku pracy
3.	Zapewnienie braków postojów na stacjach	Wyrównana i ustabilizowana produkcja	R1, R2	Przestrzeganie ograniczeń produkcyjnych
4.	Wyznaczenie i tworzenie stanowisk dla prac			
5	Wspomaganie pracownika środkami technic	Wspomaganie pracownika środkami techniki	T1	Przebadana możliwość usprawnień tech.
6.	Wyznaczenie harmonogramu realizacji prze			
7.	Wyznaczenie/planowanie budżetu przedsię			
8.	Powołanie kompetentnego zespołu realizuj			
9.	Dobór kompetentnych członków zespołu ds			
10.	Zapewnienie pełnego wsparcia najwyższego			
11.	Zapewnienie minimalizacji narażenia pracow	Ergonomiczna rotacja pracowników	V2	Przestrzeganie ograniczeń ergonomicznych
12.	Mapowanie stanowisk o najwyższym stopni	Optymalizacja procesów	M1-9	9 rodzajów marnotrawstwa
13.	Wyznaczenie rotacji na stanowiskach, która			
14.	Określenie całościowego wyniku obciążenia			
15.	Określenie całościowego wyniku obciążenia	Ocena ryzyka ergonomicznego	E1	Punkty EAWS
16.	Zapewnienie prawidłowych czynników fizyc	Zapewnienie zynników fizycznych	F1-10	Oświetlenie, hałas....
17.	Skorelowanie stanowisk z antropometrią pr			
18.	Dostosowanie biomechanicznego obciążen			
19.	Wyznaczenie harmonogramu realizacji prze			
20.	Wyznaczenie/planowanie budżetu przedsię			
21.	Powołanie kompetentnego zespołu realizuj			
22.	Dobór kompetentnych członków zespołu ds			
23.	Zapewnienie pełnego wsparcia najwyższego			
24.	Możliwości skorzystania przez dział planow			
25.	Priorytetowe traktowanie bezpieczeństwa	Priorytetowe traktowanie pracowników	V2	Indywidualna ocena każdego pracownik
26.	Mapowanie wartości dodanej i marnotraw	Optymalizacja procesów	M1-9	9 rodzajów marnotrawstwa
27.	Wprowadzenie pracy zmianowej.			
28.	Dążenia do bezinwestycyjnej racjonalizacji,	Wspomaganie pracownika środkami techniki	T2	Dostosowana wysokość linii transportowej
29.	Zapewnienie kompromisów między celami	Wspomaganie pracownika środkami techniki	T1, T2	Kompromis
30.	Ustalenie możliwych do monitorowania kry	Ocena ergonomicznego zbalansowania	P-ERG	wzór na erg. zbalansowanie

Tabela 8. Hierarchia czynników i kryteria uwzględnione w modelu ergonomicznego balansowania linii. Źródło: opracowanie własne.

3.4. Badanie dotyczące rotacji pracowników na linii montażowej

3.4.1. Opis i wyniki badań

Badanie dotyczące rotacji pracowników składa się z trzech etapów. Pierwsze dwa zostały sprawdzone w ramach metody pomiaru pośredniego poprzez przeprowadzone ankiety, trzecia część odbyła się w ramach wywiadów z wcześniej przygotowanym scenariuszem z pytaniami.

Etap 1 (badanie ankietowe):

W ankiecie zadano pytania: Jaką ważność powinien mieć poniższy czynnik związany z organizacją rotacji pracowników?

1. Uwzględnianie ryzyka ergonomicznego za pomocą metody EAWS (punkty ergo).
2. Uwzględnianie ryzyka ergonomicznego za pomocą subiektywnej oceny (przez ergonomistę).
3. Uwzględnianie stanu zdrowia pracownika przez lekarza medycyny pracy.
4. Uwzględnianie zmiany stanowiska pracy kilka razy w ciągu dnia roboczego.
5. Uwzględnianie obciążenia poszczególnych partii mięśni podczas rotacji.
6. Monitorowanie rotacji pracownika w ciągu tygodnia.
7. Monitorowanie rotacji pracownika w ciągu miesiąca.
8. Wiek pracownika.
9. Płeć pracownika.
10. Zdrowi pracownicy nie powinni pracować zmiana po zmianie na ciężkim stanowisku (stanowisko krytyczne).
11. Pracownik mający problemy z daną grupą mięśni nie powinien pracować na stanowisku obciążającym tę partię ciała.
12. Pracownicy powinni znać wszystkie stanowiska w teamie.
13. Nieergonomiczne stanowiska powinny być omawiane i optymalizowane podczas warsztatów optymalizujących produkcję.

W Tabeli 9 i na Wykresie 4 przedstawiono wyniki ankiety dotyczącej oceny najważniejszych czynników podczas organizacji rotacji pracowników.

Czynnik	Średnia arytmetyczna	Odchylenie standardowe	Minimum	Dolny kwartył	Mediana	Górny kwartył	Maksimum	Test post-hoc Dunna z poprawką Bonferroniego				
								Jednorodne grupy	A	B	C	D
11	5	0	5	5	5	5	5	11(d)				*
3	4,96	0,19	4	5	5	5	5	3(d)				*
4	4,85	0,36	4	5	5	5	5	4(d)				*
13	4,81	0,4	4	5	5	5	5	13(c,d)			*	*
5	4,78	0,42	4	5	5	5	5	5(c,d)			*	*
10	4,67	0,62	3	4,5	5	5	5	10(c,d)			*	*
12	4,48	0,89	2	4	5	5	5	12(b,c,d)		*	*	*
2	4,26	0,81	2	4	4	5	5	2(a,b,c,d)	*	*	*	*
6	4,19	0,96	1	4	4	5	5	6(a,b,c,d)	*	*	*	*
1	3,89	0,85	2	3	4	4,5	5	1(a,b,c)	*	*	*	
9	3,81	1,14	2	3	4	5	5	9(a,b,c)	*	*	*	
7	3,33	1,04	1	3	3	4	5	7(a)	*			
8	3,33	1,24	1	2	3	4,5	5	8(a,b)	*	*		

Test Friedmana T=128,34, df=12, p<0,0001

Tabela 9. Wyniki czynników - organizacja rotacji pracowników (sortowanie według średniej).

Źródło: opracowanie własne.

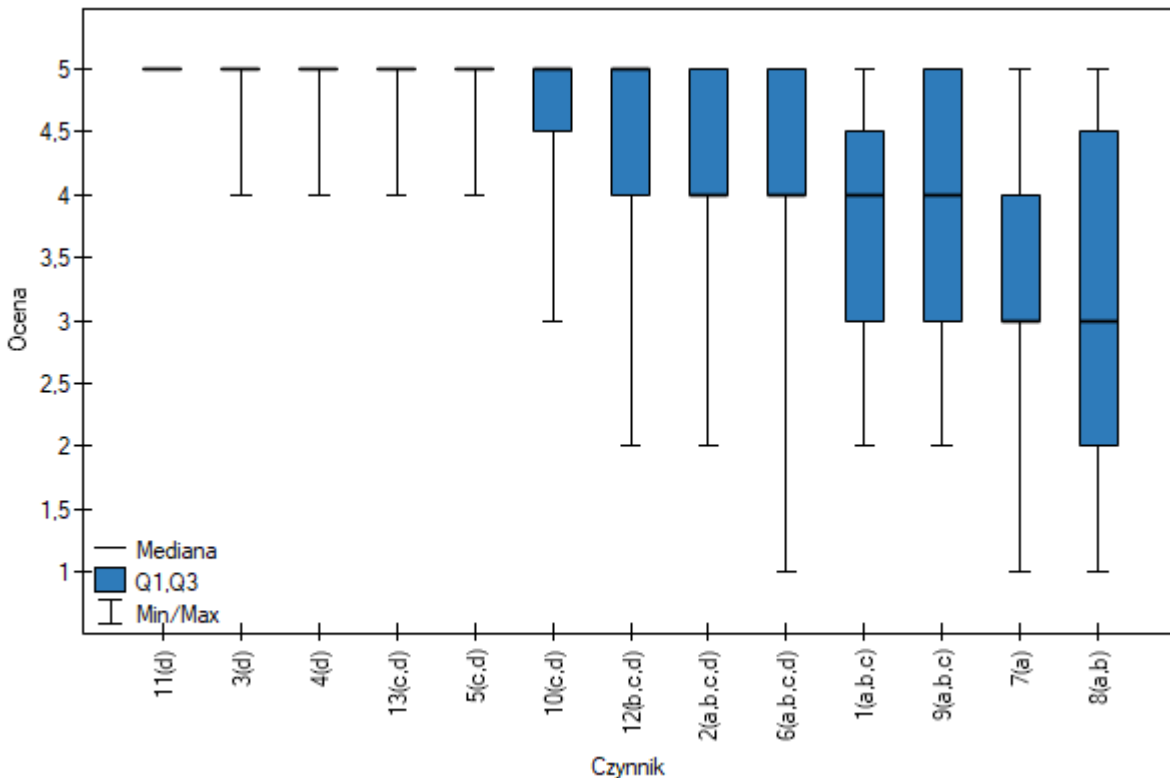
Metoda użyta do analizy danych:

Analizy statystyczne przeprowadzono za pomocą pakietu statystycznego PQStat w wersji 1.8.4.152.

Wyniki analizowanych skal porównywano testem Friedmana oraz post-hoc testem Dunna z poprawką Bonferroniego. Za istotne przyjęto prawdopodobieństwo testowe na poziomie $p < 0,05$, a za wysoce istotne przyjęto prawdopodobieństwo testowe na poziomie $p < 0,01$.

Wyniki:

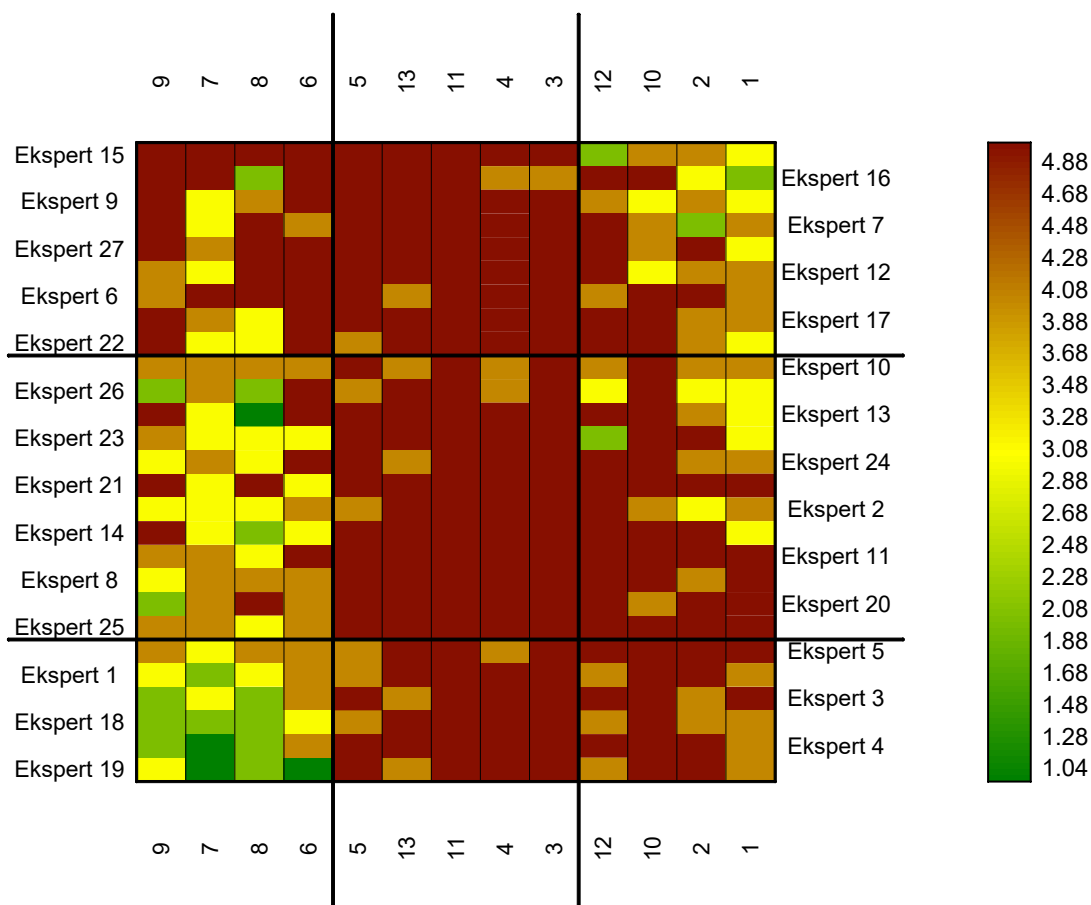
Stwierdzono wysoce istotne ($p < 0,01$) różnice między czynnikami. Najwyższe oceny stwierdzono w przypadku czynnika 11, 3, 4 i 13, a najniższe dla 1, 9, 7 i 8. Współczynnik zgodności Kendalla wyniósł 0,3961, a średni współczynnik korelacji Spearmana 0,3729, czyli zgodność ocen wystawianych przez sędziów była przeciętna.



Wykres 4. Wyniki czynników – organizacja rotacji pracowników (sortowanie według średniej).
Źródło: opracowanie własne.

Respondenci najwyżej ocenili ważność czynnika 11, który wskazuje na fakt, że pracownicy mający problemy z daną grupą mięśni nie powinni pracować na stanowisku obciążającym tę partię ciała. Pytania 3, 4, 13, 5 zostały również ocenione jako bardzo ważne. Wiek, płeć pracowników oraz monitorowanie rotacji pracowników uznano za mniej istotne, ale byli też respondenci, którzy ocenili te punkty bardzo wysoko. Należy wziąć pod uwagę, że każdy pracownik ma inne postrzeżenie obciążenia i uciążliwości pracy, które zależą od indywidualnych cech, wydajności i zdrowia. Przemysł motoryzacyjny preferuje metodę EAWS do oceny ryzyka ergonomicznego stanowiska pracy. Wynikiem tej metody jest podana liczba punktów ergo, która określa czy dane stanowisko jest krytyczne lub potencjalnie krytyczne. Pracownicy są sceptycznie nastawieni na wyniki tej metody, zwłaszcza w produkcji o wysokim stopniu wariantowości, które często nie pokazują trudnych stanowisk ze względu na częstotliwość występowania danej czynności.

Wykres 5 to analiza gradacyjna ukazująca, którzy eksperci mają podobne opinie oraz które czynniki są podobnie oceniane.



Wykres 5. Analiza gradacyjna wraz z analizą skupień. Źródło: opracowanie własne.

Cztery czynniki, tj. 6, 7, 8 i 9, tworzą pierwsze skupienie, które jest wysoko oceniane przez część ekspertów, podczas gdy inna grupa ekspertów ocenia te czynniki znacznie niżej.

Czynniki 3, 4, 5, 11 i 13 tworzące drugie skupienie zostały wysoko ocenione przez wszystkich ekspertów.

Cztery czynniki, czyli 1, 2, 10 i 12, tworzą trzecie skupienie, które jest wysoko oceniane przez część ekspertów, podczas gdy inna grupa ekspertów ocenia te czynniki niżej.

Ta część ekspertów, która wysoko ocenia czynniki pierwszego skupienia, niżej ocenia czynniki z trzeciego. Natomiast ta grupa ekspertów, która nisko ocenia czynniki pierwszego skupienia, wysoko ocenia czynniki skupienia trzeciego.

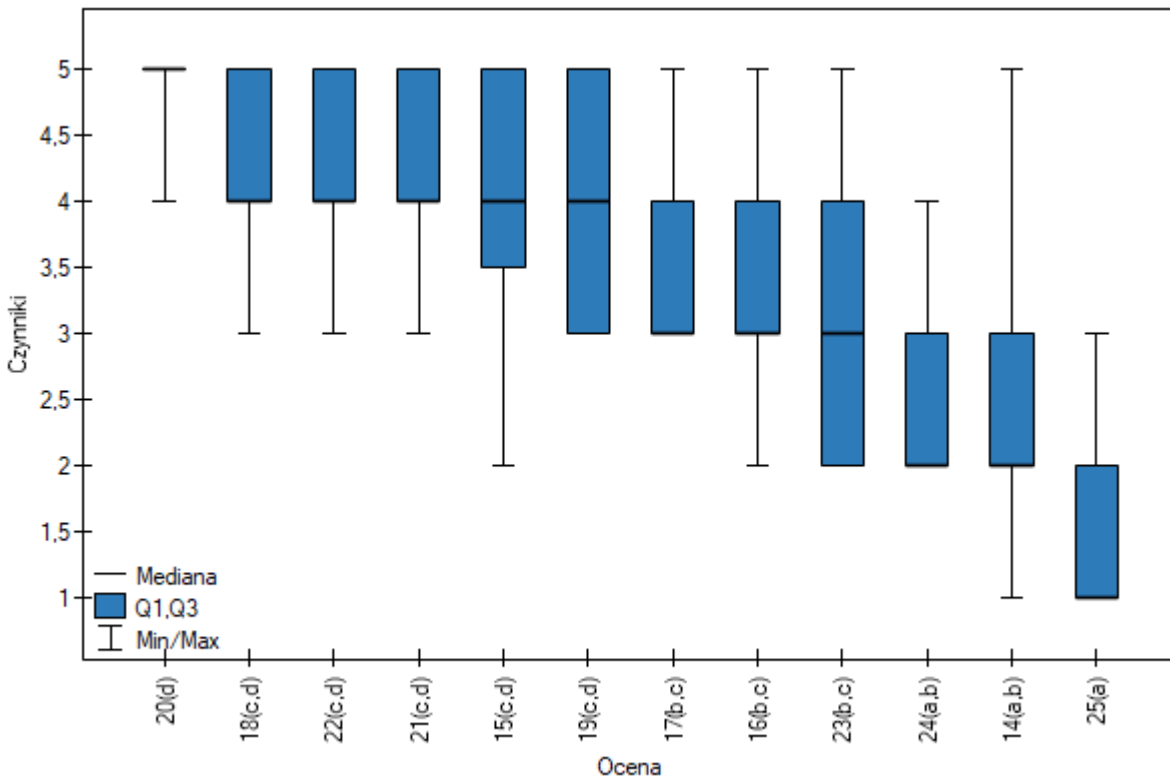
Etap 2 (badanie ankietowe): w kolejnym etapie badania sprawdzano subiektywne postrzeganie obciążenia poszczególnych części ciała. W ankiecie (pozycje w ankiecie od 14 do 25) zadano pytania: Które partie ciała są narażone najbardziej na obciążenia podczas wykonywania zadań w twoim zespole?

- | | |
|----------------------|-----------------------------------|
| 14. głowa/szyja, | 20. nadgarstek, |
| 15. staw barkowy, | 21. kciuk, |
| 16. biceps, | 22. palec wskazujący, |
| 17. przedramię, | 23. tułów (przy skręcie bocznym), |
| 18. plecy/kręgosłup, | 24. kolano, |
| 19. staw łokciowy, | 25. stopa. |

W Tabeli 10 i na Wykresie 6 przedstawiono wyniki ankiety dotyczącej subiektywnej oceny obciążenia poszczególnych partii ciała i mięśni:

Czynnik	Średnia arytmetyczna	Odchylenie standardowe	Minimum	Dolny kwartył	Mediana	Górny kwartył	Maksimum	Test post-hoc Dunna z poprawką Bonferroniego				
								Jednorodne grupy	A	B	C	D
20	4,78	0,42	4	5	5	5	5	20(d)				*
18	4,33	0,62	3	4	4	5	5	18(c, d)			*	*
22	4,3	0,54	3	4	4	5	5	22(c, d)			*	*
21	4,22	0,58	3	4	4	5	5	21(c, d)			*	*
15	4	0,92	2	3,5	4	5	5	15(c, d)			*	*
19	3,93	0,87	3	3	4	5	5	19(c, d)			*	*
17	3,44	0,64	3	3	3	4	5	17(b, c)		*	*	
16	3,33	0,68	2	3	3	4	5	16(b, c)		*	*	
23	3,22	1,05	2	2	3	4	5	23(b, c)		*	*	
24	2,56	0,8	2	2	2	3	4	24(a, b)	*	*		
14	2,44	1,22	1	2	2	3	5	14(a, b)	*	*		
25	1,52	0,64	1	1	1	2	3	25(a)	*			
Test Friedmana T=166,94, df=11, p<0,0001												

Tabela 10. Wyniki czynników – partie ciała narażone na obciążenia (sortowanie według średniej). Źródło: opracowanie własne.



Wykres 6. Wyniki czynników – partie ciała narażone na obciążenia (sortowanie według średniej).
Źródło: opracowanie własne.

Metoda użyta do analizy danych:

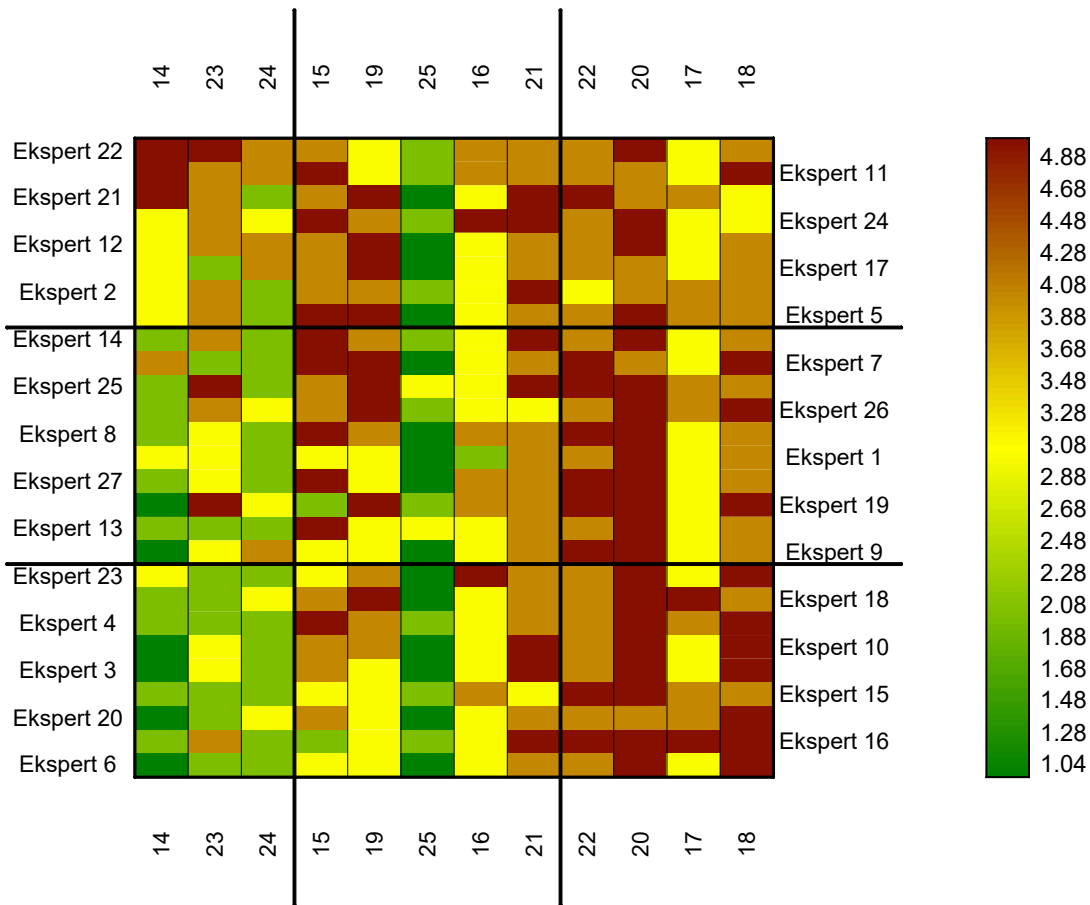
Analizy statystyczne przeprowadzono za pomocą pakietu statystycznego PQStat w wersji 1.8.4.152.

Wyniki analizowanych skal porównywano testem Friedmana oraz post-hoc testem Dunna z poprawką Bonferroniego. Za istotne przyjęto prawdopodobieństwo testowe na poziomie $p < 0,05$, a za wysoce istotne przyjęto prawdopodobieństwo testowe na poziomie $p < 0,01$.

Wyniki:

Stwierdzono wysoce istotne ($p < 0,01$) różnice między czynnikami. Najwyższe oceny stwierdzono w przypadku czynnika 20, 18, 22 i 21, a najniższe stwierdzono dla czynników 23, 24, 14 i 25. Współczynnik zgodności Kendalla wyniósł 0,5621, a średni współczynnik korelacji Spearmana 0,5452, czyli zgodność ocen wystawianych przez sędziów była przeciętna.

Poniższy wykres przedstawia analizę gradacyjną wraz podziałem na skupienia.



Wykres 7. Analiza gradacyjna wraz z analizą skupień. Źródło: opracowanie własne.

Trzy czynniki, tj. 14, 24 i 23, tworzą pierwsze skupienie, które jest wysoko oceniane przez część ekspertów, podczas gdy inna grupa ekspertów ocenia te czynniki znacznie niżej.

Pięć czynników, tj. 15, 16, 19, 21 i 25, tworzą drugie skupienie, w którym czynnik 25 (stopa) jest nisko oceniany przez wszystkich ekspertów.

Cztery czynniki, tj. 17, 18, 20 i 22, tworzą trzecie skupienie, które jest wysoko oceniane przez większość ekspertów.

Etap 3 (wywiady):

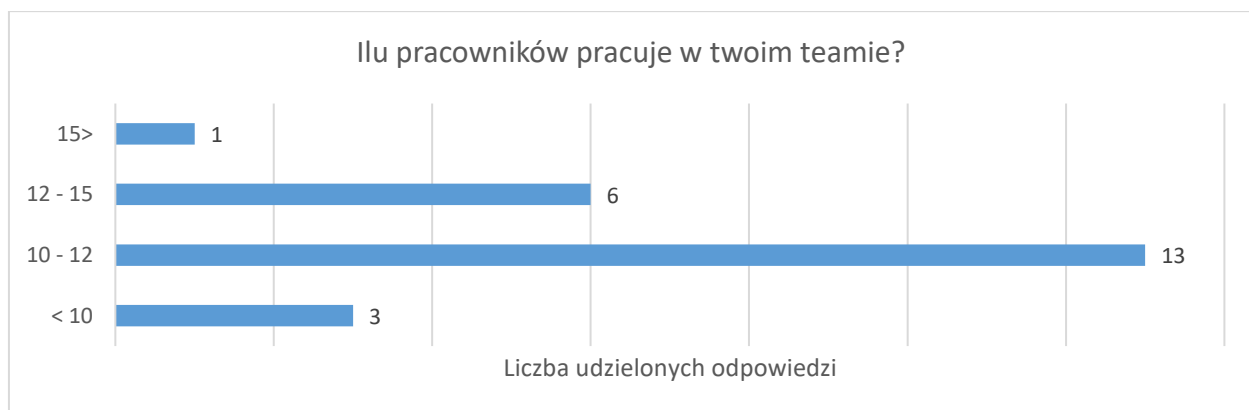
Ze względu na różne zadania montażowe do wykonania w zespole oraz skład pracowników pod względem ich kwalifikacji i umiejętności pracownicy montażowi przeprowadzają rotację na różne sposoby. Część pracowników może nigdy się nie rotować. Inni pracownicy rotują po każdej przerwie. Wpływ podejmowanych decyzji na sposób rotacji został zbadany za pomocą wywiadu i wcześniej przygotowanego kwestionariusza. Zadano następujące pytania (wywiady z brygadzistami i pracownikami linii produkcyjnej):

Część I. Pytania ogólne:

Pytanie 1: Ilu pracowników pracuje w twoim teamie?

- a) Liczba pracowników netto (bez lidera)...

Wyniki dotyczące pytania 1

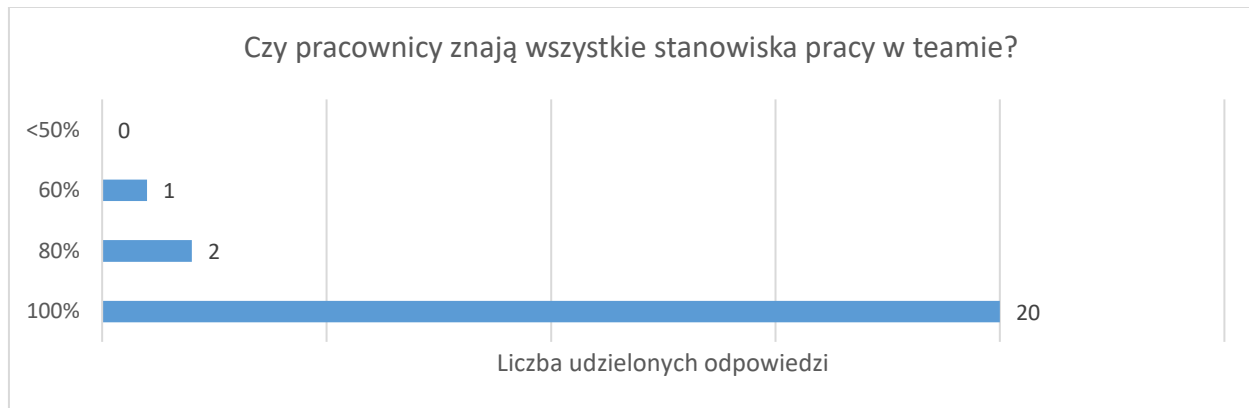


Wykres 8. Rotacja pracowników, pytanie 1. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 2: Czy pracownicy znają wszystkie stanowiska pracy w teamie?

- a) pracownicy znają wszystkie stanowiska
b) 80% zespołu zna wszystkie stanowiska
c) 60% zespołu zna wszystkie stanowiska
d) mniej niż 50% osób zna wszystkie stanowiska pracy

Wyniki dotyczące pytania 2:

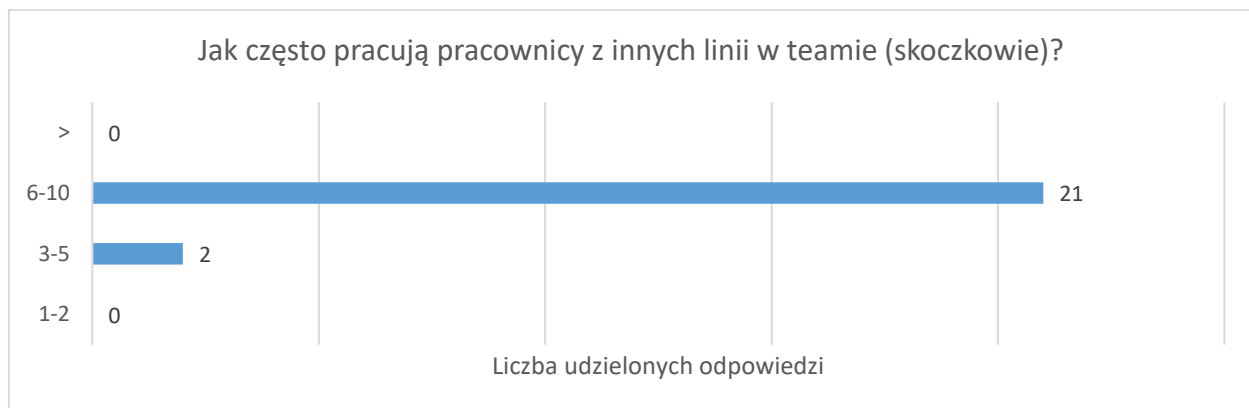


Wykres 9. Rotacja pracowników, pytanie 2. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 3: Jak często pracują pracownicy z innych linii w teamie (skoczki)?

- a) 1–2 dni w miesiącu lub wcale
- b) 3–5 dni w miesiącu
- c) 6–10 dni w miesiącu
- d) więcej, ile...

Wyniki dotyczące pytania 3:

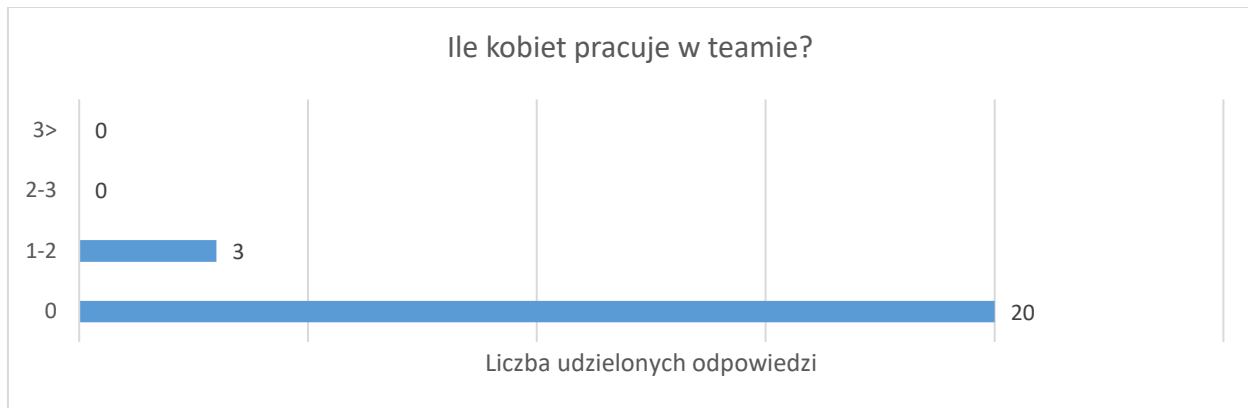


Wykres 10. Rotacja pracowników, pytanie 3. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 4: Ile kobiet pracuje w teamie?

- a) Proszę podać liczbę kobiet, które pracują w twoim teamie:...

Wyniki dotyczące pytania 4:

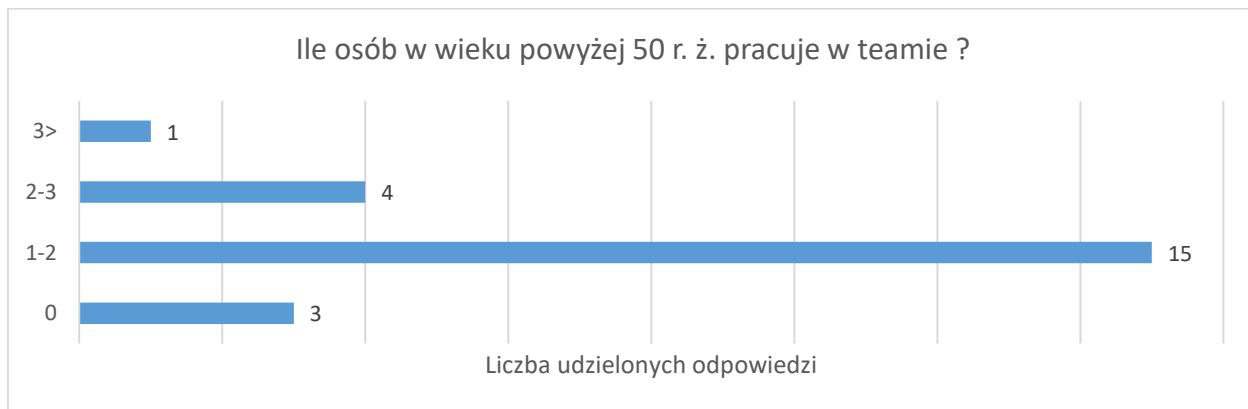


Wykres 11. Rotacja pracowników, pytanie 4. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 5: Ile osób w wieku powyżej 50 r. ż. pracuje w teamie?

a) Proszę podać liczbę osób w tym wieku, które pracują w twoim teamie:...

Wyniki dotyczące pytania 5:



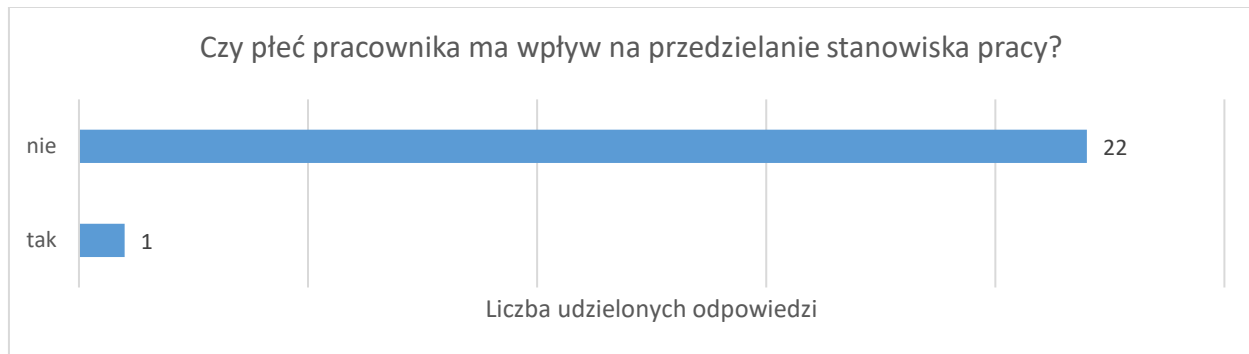
Wykres 12. Rotacja pracowników, pytanie 5. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 6: Czy płeć pracownika ma wpływ na przedzielanie stanowiska pracy?

a) tak

b) nie

Wyniki dotyczące pytania 6:

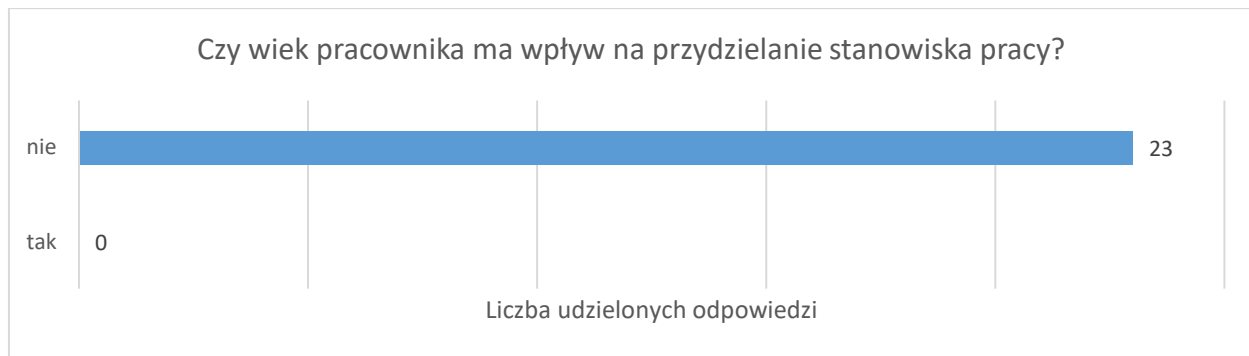


Wykres 13. Rotacja pracowników, pytanie 6. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 7: Czy wiek pracownika ma wpływ na przydzielanie stanowiska pracy?

- a) tak
- b) nie

Wyniki dotyczące pytania 7:



Wykres 14. Rotacja pracowników, pytanie 7. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 8: Jeżeli tak, to jaki wiek pracownika wpływa na tę decyzję?

- a) nie dotyczy
- b) proszę podać wiek...

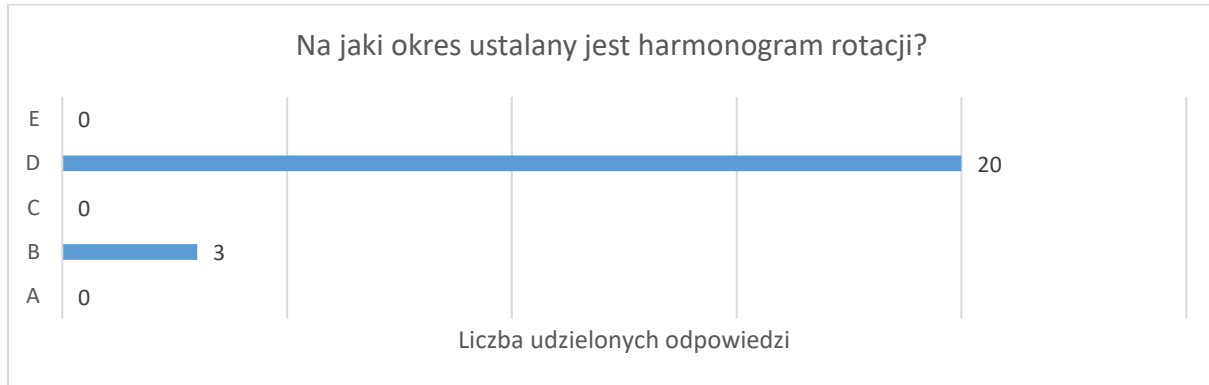
Wyniki dotyczące pytania 8: nie wskazano wieku.

Pytanie 9: Na jaki okres ustalany jest harmonogram rotacji?

- a) dla konkretnej zmiany
- b) dla danego dnia

- c) dla danego tygodnia
- d) pracownicy rotują ze stacji na stację bez konkretnego planu rotacji
- e) inna forma

Wyniki dotyczące pytania 9:

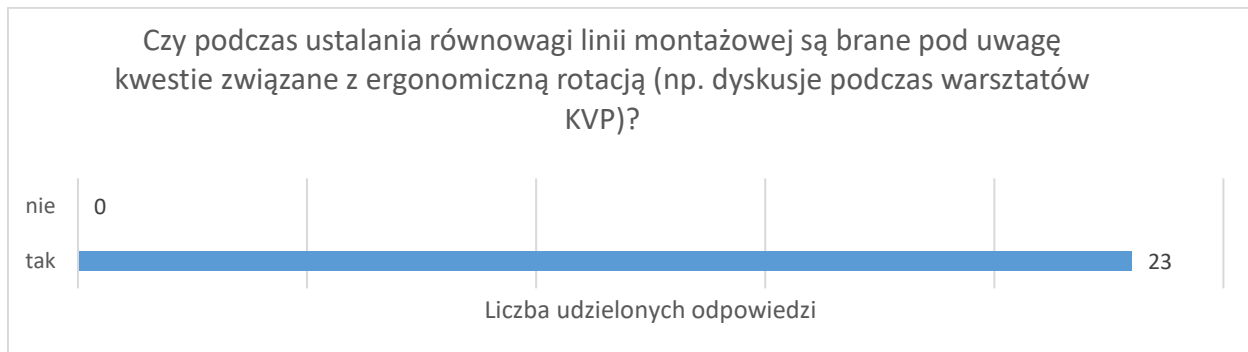


Wykres 15. Rotacja pracowników, pytanie 9. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 10: Czy podczas ustalania równowagi linii montażowej są brane pod uwagę kwestie związane z ergonomiczną rotacją (np. dyskusje podczas warsztatów KVP)?

- a) tak
- b) nie

Wyniki dotyczące pytania 10:

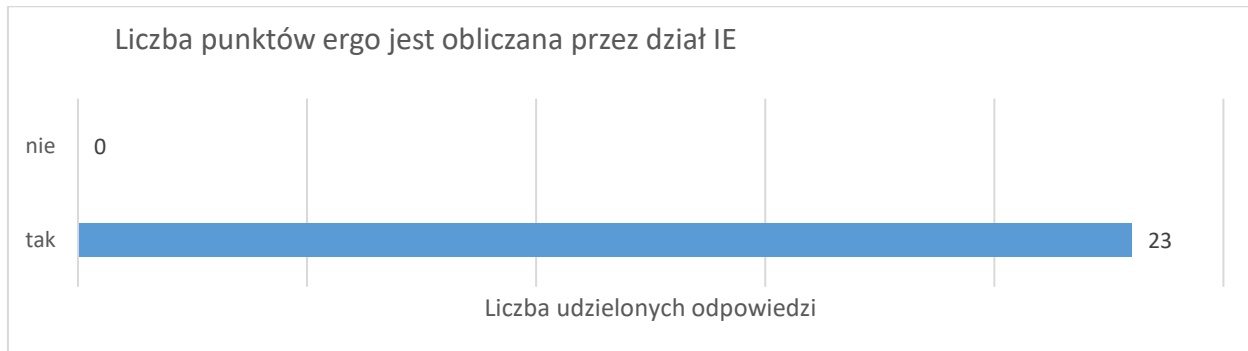


Wykres 16. Rotacja pracowników, pytanie 10. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 11: Liczba punktów ergo jest obliczana przez dział IE. Czy ergonomia stanowisk pracy jest dodatkowo oceniana przez ergonomistę (np. ocena subiektywna) lub dział bezpieczeństwa pracy?

- a) tak
- b) nie

Wyniki dotyczące pytania 11:

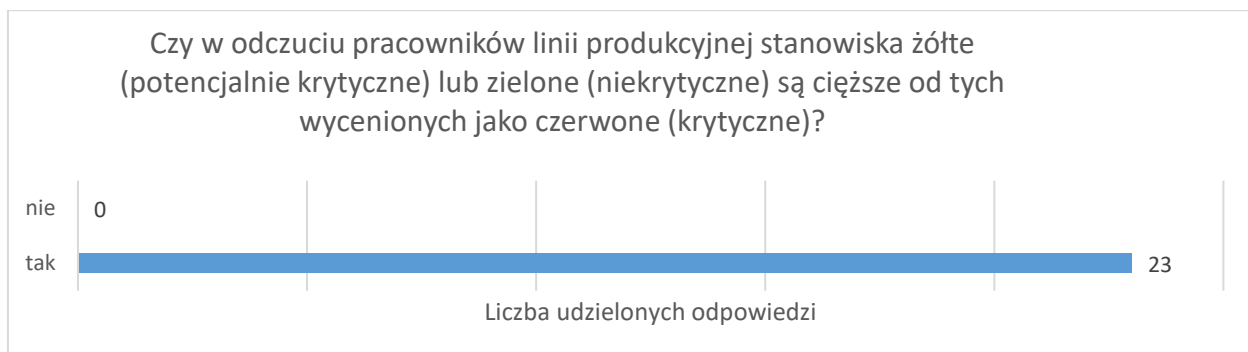


Wykres 17. Rotacja pracowników, pytanie 11. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 12: Czy w odczuciu pracowników linii produkcyjnej stanowiska żółte (potencjalnie krytyczne) lub zielone (niekrytyczne) są cięższe od tych wycenionych jako czerwone (krytyczne)?

- a) tak
- b) nie

Wyniki dotyczące pytania 12:



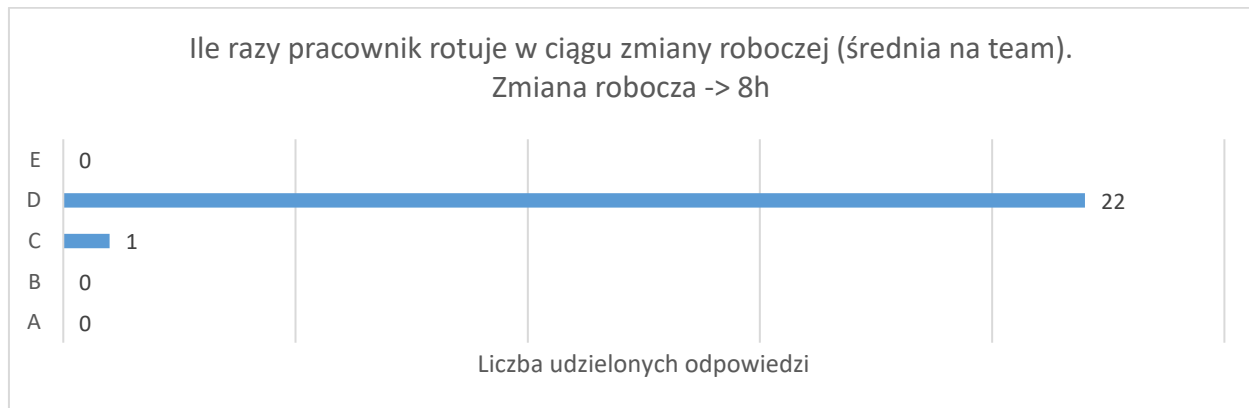
Wykres 18. Rotacja pracowników, pytanie 12. Źródło: opracowanie własne.

Część II. Pytania o rotację:

Pytanie 13: Ile razy pracownik rotuje w ciągu zmiany roboczej (średnia na team). Zmiana robocza → 8h.

- a) pracownicy nie rotują w ciągu dnia
- b) rotacja na 2 stanowiskach w ciągu zmiany roboczej
- c) rotacja na 3 stanowiskach w ciągu zmiany roboczej
- d) rotacja na 4 stanowiskach w ciągu zmiany roboczej
- e) jeżeli częściej, to ile razy...

Wyniki dotyczące pytania 13:

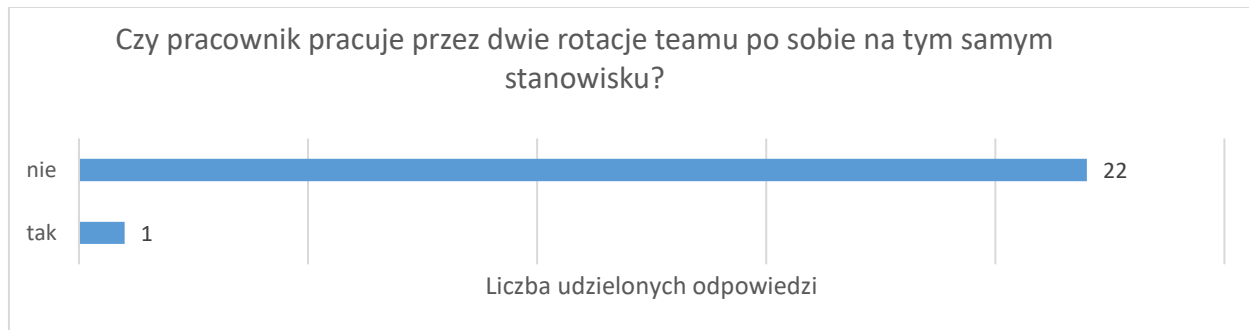


Wykres 19. Rotacja pracowników, pytanie 13. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 14: Czy pracownik pracuje przez dwie rotacje teamu po sobie na tym samym stanowisku?

- a) tak
- b) nie

Wyniki dotyczące pytania 14:



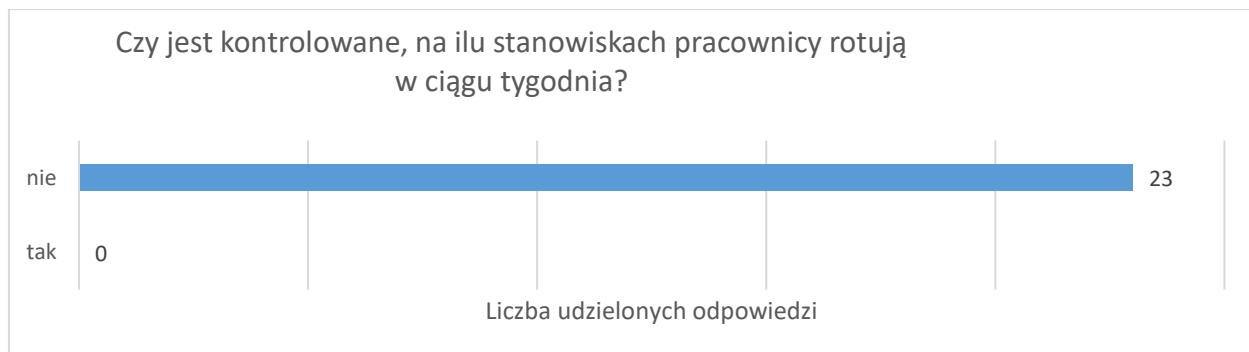
Wykres 20. Rotacja pracowników, pytanie 14. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 15: Czy jest kontrolowane, na ilu stanowiskach pracownicy rotują w ciągu tygodnia?

a) tak

b) nie

Wyniki dotyczące pytania 15:



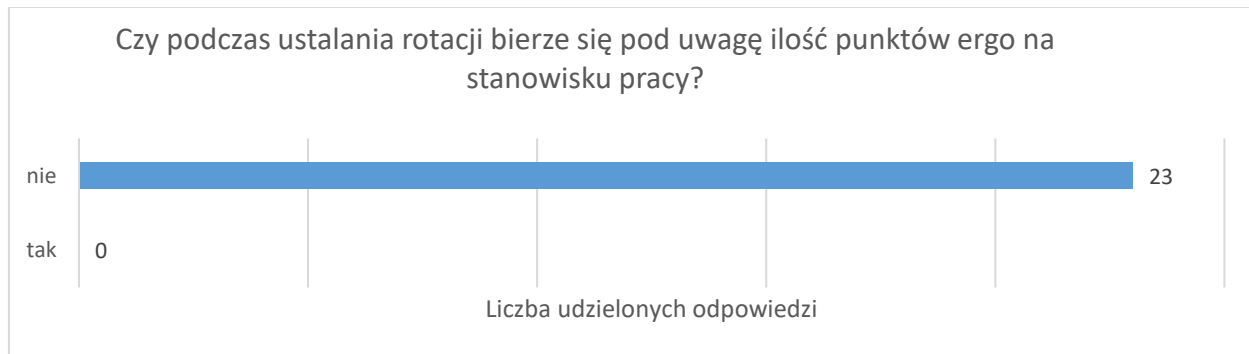
Wykres 21. Rotacja pracowników, pytanie 15. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 16: Czy podczas ustalania rotacji bierze się pod uwagę ilość punktów ergo na stanowisku pracy?

a) tak

b) nie

Wyniki dotyczące pytania 16:

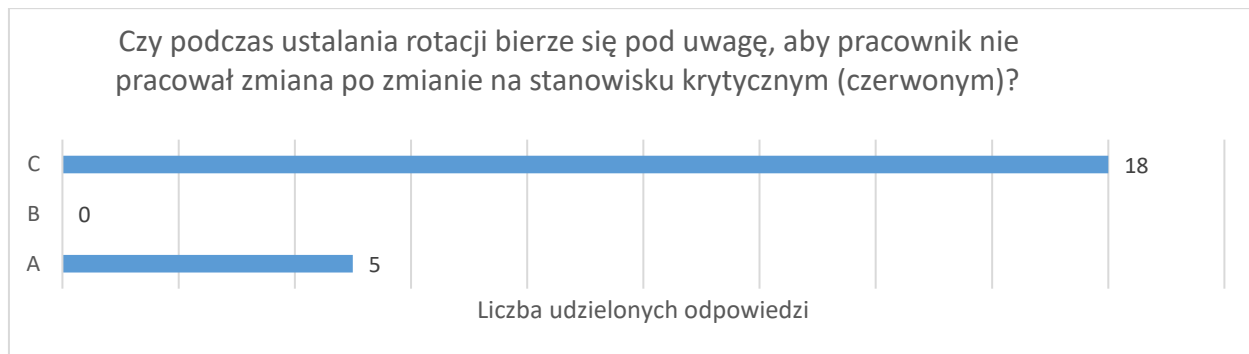


Wykres 22. Rotacja pracowników, pytanie 16. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 17: Czy podczas ustalania rotacji bierze się pod uwagę, aby pracownik nie pracował zmiana po zmianie na stanowisku krytycznym (czerwonym)?

- a) tak
- b) nie
- c) w moim teamie nie ma stanowisk krytycznych

Wyniki dotyczące pytania 17:

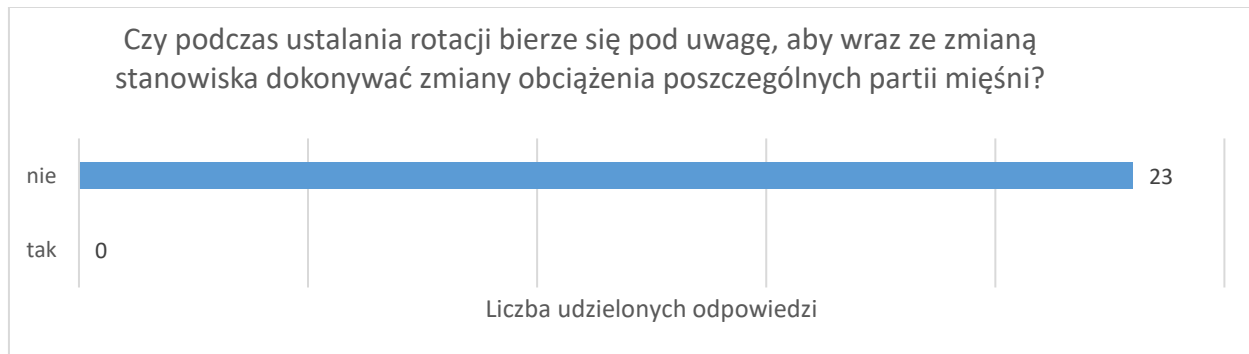


Wykres 23. Rotacja pracowników, pytanie 17. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 18: Czy podczas ustalania rotacji bierze się pod uwagę, aby wraz ze zmianą stanowiska dokonywać zmiany obciążenia poszczególnych partii mięśni?

- a) tak
- b) nie

Wyniki dotyczące pytania 18:



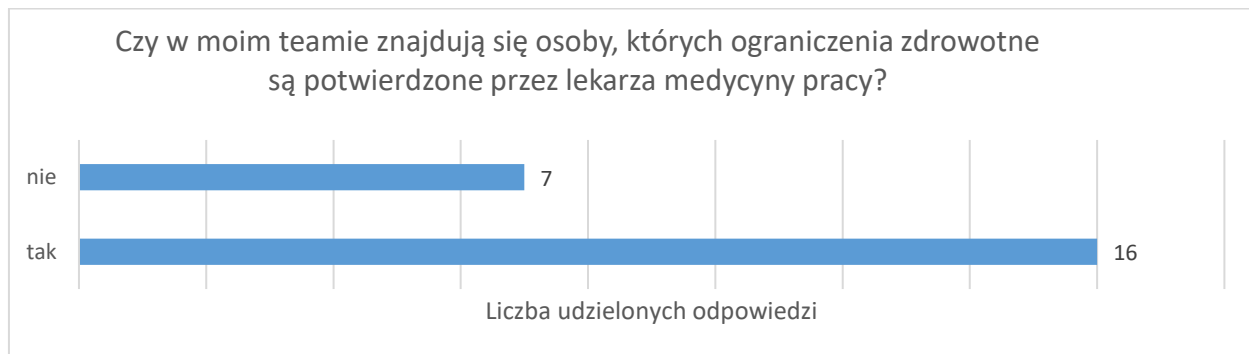
Wykres 24. Rotacja pracowników, pytanie 18. Źródło: opracowanie własne.

Część III. Zdrowie pracowników

Pytanie 19: Czy w moim teamie znajdują się osoby, których ograniczenia zdrowotne są potwierdzone przez lekarza medycyny pracy?

- a) tak
- b) nie

Wyniki dotyczące pytania 19:



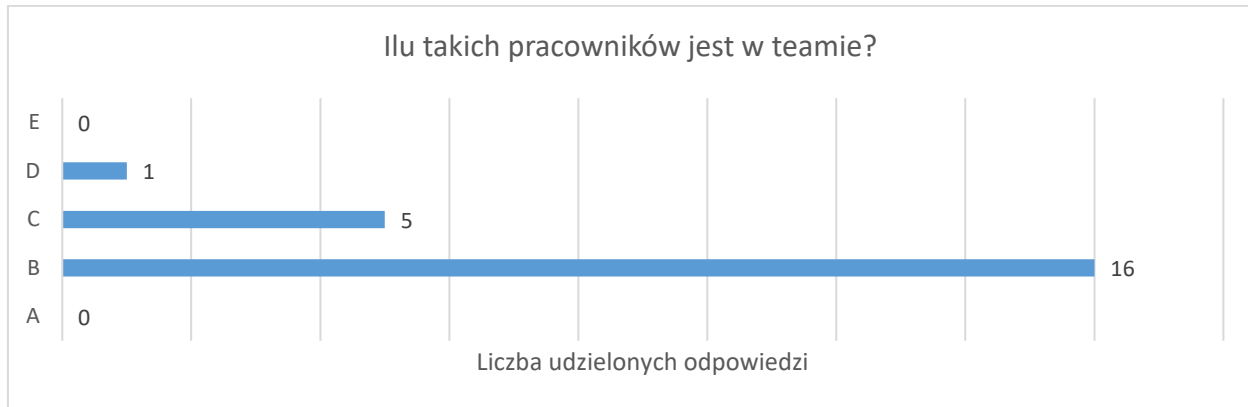
Wykres 25. Rotacja pracowników, pytanie 19. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 20: Ilu takich pracowników jest w teamie?

- a) nie dotyczy
- b) jeden
- c) dwóch
- d) trzech

e) więcej, ile...

Wyniki dotyczące pytania 20:

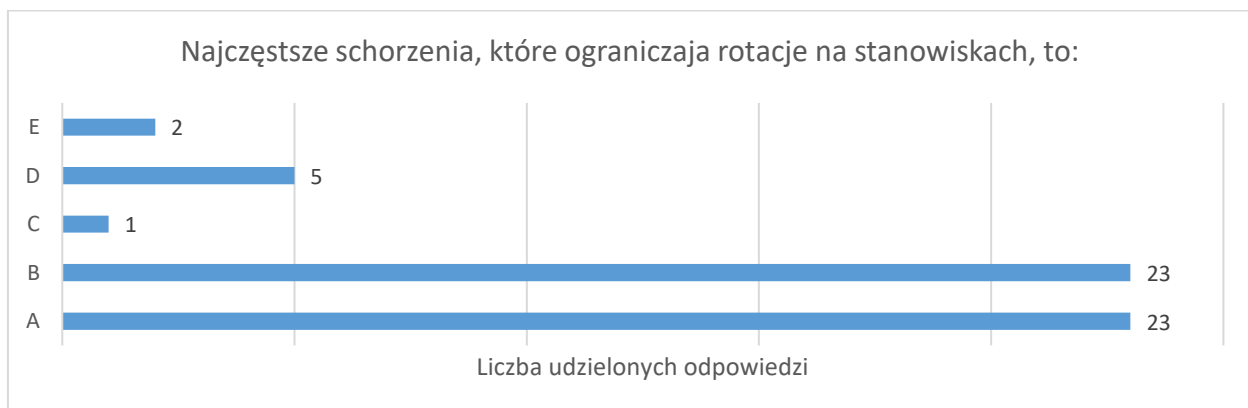


Wykres 26. Rotacja pracowników, pytanie 20. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 21: Najczęstsze schorzenia, które ograniczają rotacje na stanowiskach, to:

- a) ból kręgosłupa
- b) ból stawów
- c) problemy z kończynami dolnymi
- d) problemy z kończynami górnymi
- e) inne...

Wyniki dotyczące pytania 21:

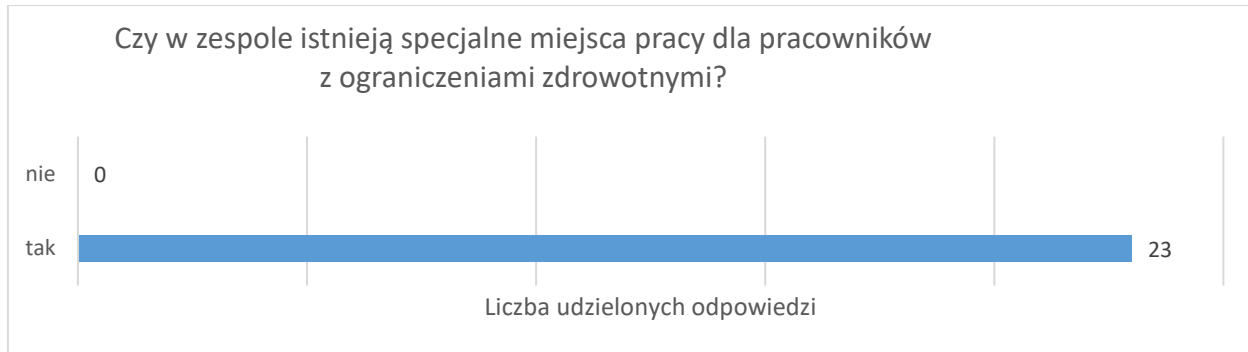


Wykres 27. Rotacja pracowników, pytanie 21. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 22: Czy w zespole istnieją specjalne miejsca pracy dla pracowników z ograniczeniami zdrowotnymi?

- a) tak
- b) nie

Wyniki dotyczące pytania 22:



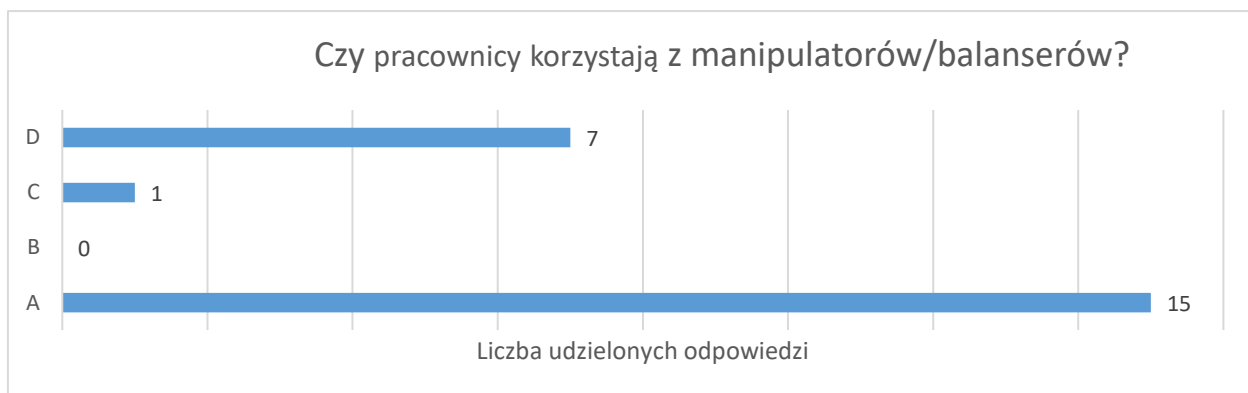
Wykres 28. Rotacja pracowników, pytanie 22. Źródło: opracowanie własne.

Część IV. Urządzenia techniczne

Pytanie 23: Czy pracownicy korzystają z manipulatorów/balanserów?

- a) tak
- b) nie
- c) nie zawsze
- d) w moim teamie nie ma manipulatora/balansera.

Wyniki dotyczące pytania 23:

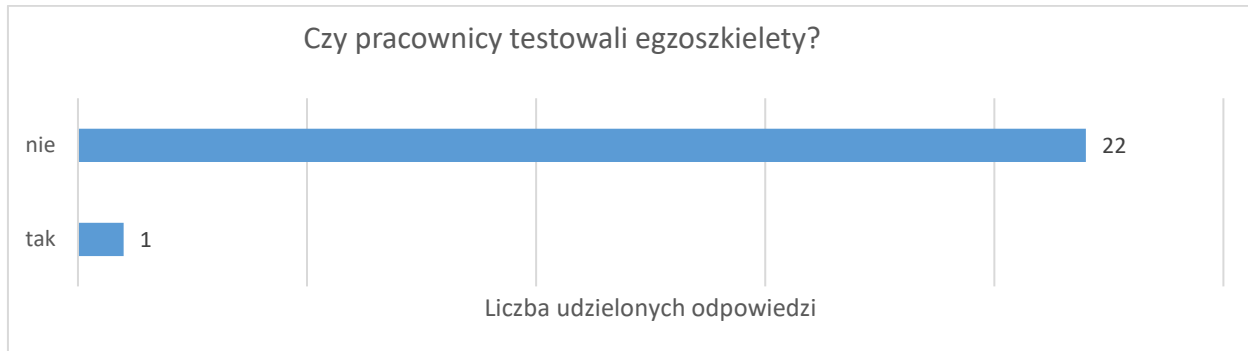


Wykres 29. Rotacja pracowników, pytanie 23. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 24: Czy pracownicy testowali egzoszkielety?

- a) tak
- b) nie

Wyniki dotyczące pytania 24:

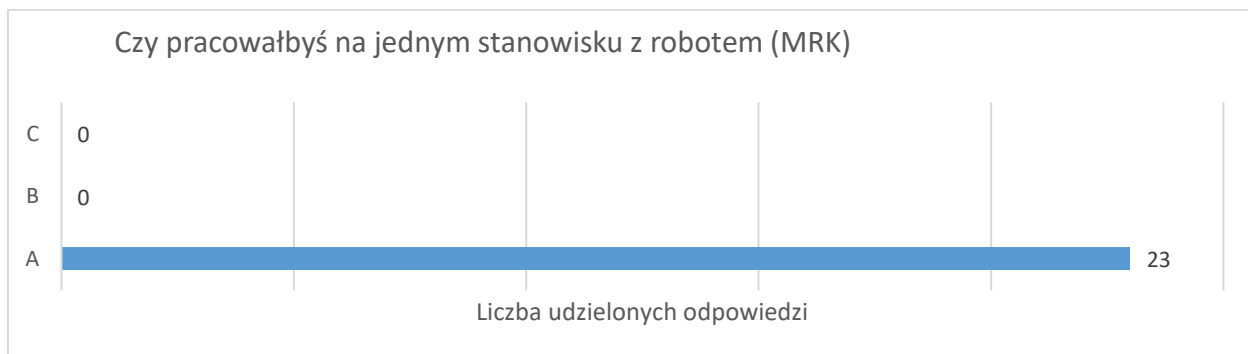


Wykres 30. Rotacja pracowników, pytanie 24. Źródło: opracowanie własne.

Pytanie 25: Czy pracowałeś na jednym stanowisku z robotem (MRK)?

- a) tak
- b) nie, obawiam się o swoje bezpieczeństwo
- c) nie wiem

Wyniki dotyczące pytania 25:



Wykres 31. Rotacja pracowników, pytanie 25. Źródło: opracowanie własne.

3.4.2. Wnioski z badań

Przeprowadzone badanie nad rotacją pracowników dało obraz, które czynniki są ważne i są uwzględniane przez liderów podczas planowania rotacji. Po rozmowach przeprowadzonych z ekspertami od spraw zdrowia uwzględniono te czynniki przy projektowaniu algorytmu, który został zaprojektowany, aby uwzględniać proergonomiczną rotację pracowników.

Poniżej przedstawiono najważniejsze punkty z ankiety, na którą odpowiadali eksperci planowania rotacji:

- Liderzy wskazali, że najczęstsza liczba osób w grupie roboczej to około 10–12 pracowników.
- 86,9% pracowników zna wszystkie stanowiska w swojej grupie roboczej.
- W toku badania ustalono, że około 6–10 razy w miesiącu pracownicy rotują na inne linie.
- Większość zatrudnionych osób stanowili mężczyźni. Występowały zespoły, w których pracowały maksymalnie dwie kobiety.
- Płeć pracowników nie miała znaczenia przy przydzielaniu stanowisk pracy.
- Prawie w każdym zespole były zatrudnione osoby powyżej 50. roku życia.
- Wiek pracowników nie miał wpływu na przydzielanie stanowisk pracy.
- Pracownicy rotowali ze stacji na stację bez konkretnego planu rotacji.
- Podczas warsztatów KVP zawsze omawiano kwestie związane z ergonomią miejsca pracy.
- Liczba punktów ergo nie miała żadnego wpływu na planowanie rotacji pracowników.
- W odczuciu pracowników bywało tak, że stanowiska żółte (potencjalnie krytyczne) lub zielone (niekrytyczne) są cięższe od tych wycenionych jako czerwone (krytyczne).
- Ustalono, że pracownicy linii montażowych zmieniali stanowiska pracy w zdecydowanej większości na 4 stanowiskach w ciągu zmiany roboczej (8 h).
- Pracownicy nie pracowali przez dwie rotacje po sobie na tym samym stanowisku.
- Badani wskazali, iż kontroli nie podlega na ilu stanowiskach pracownicy rotują w ciągu tygodnia. Podobnie wszyscy wskazali, że podczas ustalania rotacji nie bierze się pod uwagę ilości punktów ergo na stanowisku pracy.
- Liderzy wskazali, że jest możliwość, by zastosować taką organizację pracy, aby rotować na stanowiska lżejsze (21,7%). Pozostali nie mieli takiej możliwości w swoich zespołach (brak stanowisk krytycznych).

- Podczas ustalania rotacji nie brano pod uwagę, aby wraz ze zmianą stanowiska dokonywać zmiany obciążenia poszczególnych partii mięśni.
- U 70% ankietowanych są osoby z ograniczeniami zdrowotnymi stwierdzonymi przez lekarza medycyny pracy. Pozostałe 30% badanych nie miało u siebie w zespole takich pracowników.
- Najczęstsze schorzenia, które ograniczają rotację na stanowiskach, to bóle kręgosłupa i stawów.
- Ankietowani wskazali, że w ich zespołach nie istnieją specjalne stanowiska pracy dla starszych pracowników lub pracowników z ograniczeniami zdrowotnymi.
- Badanie wykazało, że prawie we wszystkich przypadkach pracownicy korzystają z manipulatorów lub balanserów (jeśli są dostępne).
- Egzoszkielety nie były testowane na liniach i nie są w powszechny użytku.
- Liderzy uczestniczący w badaniu wskazali, że chcieliby pracować z robotem na jednym stanowisku.

Badanie ankietowe, wywiady oraz wcześniejsze obserwacje na linii montażowej wykazały, że w obserwowanych brygadach rotacja pracy jest przeprowadzana bez uwzględniania czynników ergonomicznych. W obserwowanych zespołach rotację stosuje się po każdej przerwie (co dwie godziny), co potwierdziły również badania ankietowe i wywiady. Należy wziąć pod uwagę, że w wybranej produkcji pojazdów użytkowych występują trzy przerwy, a zmianę roboczą można podzielić na cztery tury.

Problemy pojawiają się, gdy pracownicy nie są w stanie wykonywać zadań, na przykład z powodu ograniczeń zawodowych. Rotacja pracy nie jest zawsze możliwa dla całego zespołu, jeśli jeden (lub więcej pracowników) musi zostać przeszkolony do nowych zadań.

Rozmiar ciała lub osobiste cechy dotyczące wydajności pracy mogą również utrudniać rotację. Wielu starszych pracowników wyrażało negatywne opinie na temat rotacji (byli niezadowoleni z przydzielanych im stanowisk pracy lub woleli nie rotować). Z kolei młodszy pracownicy byli entuzjastycznie nastawieni do możliwości wykonywania kilku zadań podczas jednego dnia pracy.

Dzięki wywiadam zdobyto doświadczenie w zakresie działań i projektowania rotacji w zespołach, które zostało wykorzystane do zaprojektowania algorytmu rotacji pracowników.

3.5. Badanie dotyczące zastosowania egzoszkieleatów

3.5.1. Opis i wyniki badań

W celu sprawdzenia możliwości odciążenia układu mięśniowo-szkieletowego przeprowadzono eksperymenty z użyciem egzoszkieleatów na kończyny dolne. Eksperyment trwał 8 tygodni i był przeprowadzany na linii montażowej na dwóch stanowiskach pracy. Podczas eksperymentu pracownicy nosili egzoszkieleat od 2 do 4 godzin dziennie podczas jednej zmiany roboczej. Przed rozpoczęciem eksperymentu każdy z pracowników został przebadany przez lekarza medycyny pracy. Wybrano dwa stanowiska pracy, gdzie ze względu na niekorzystną postawę ciała pracownicy odczuwali znaczne zmęczenie oraz napięcie mięśni pleców po przepracowanej zmianie.

Badanym pasywnym egzoszkieleatem był Chairless Chair z firmy Noonee, który ma przeciwdziałać zmęczeniu poprzez unikanie długich okresów stania lub pochylania się. Pracownik nosi mechaniczny system wspomagający jak drugą parę nóg. Jego założenie zajmuje około 20 sekund. Jest on mocowany za pomocą pasków do bioder, ud i butów roboczych. Pośladki i uda są wspierane przez specjalnie do tego przystosowane powierzchnie. W przypadku wielu czynności związanych z montażem, egzoszkieleat umożliwia siedzenie w ergonomicznie korzystnej pozycji zamiast stania lub pochylania się. Chairless Chair można tłumaczyć jako „krzesło bez krzesła”.

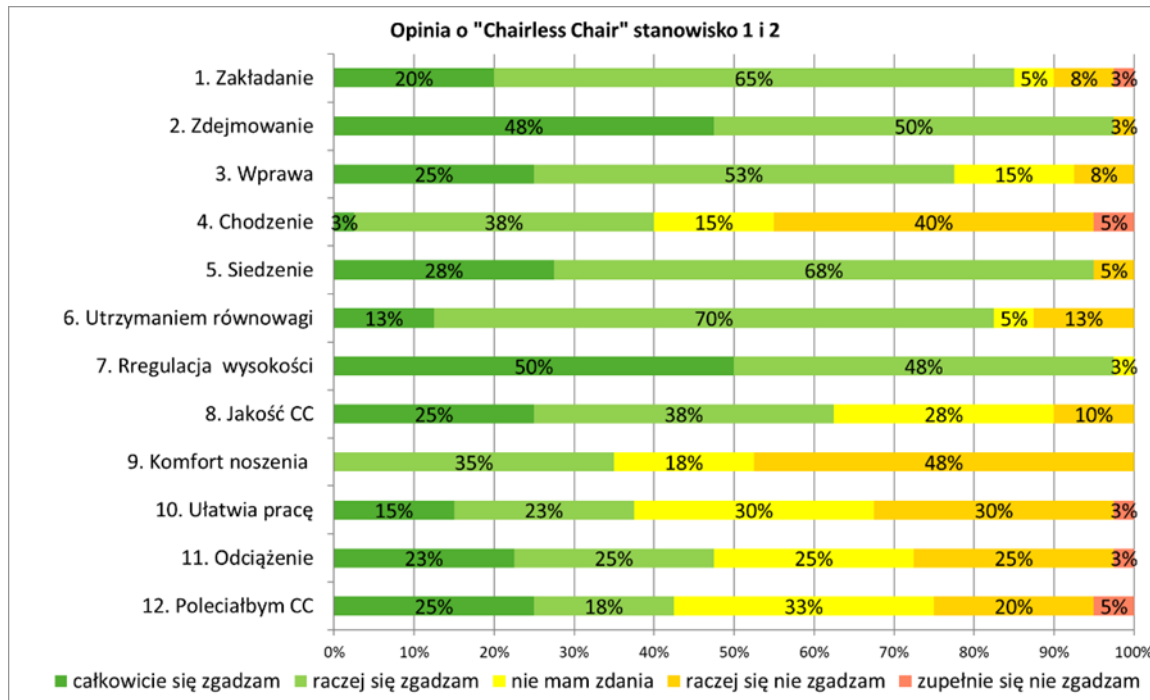
Przed przystąpieniem do eksperymentu przeanalizowano wybrane stanowiska pracy. **Na pierwszym stanowisku** odnotowano, że takt pracy montera wynosił 3 minuty. Najczęściej przyjmowaną przez pracownika wykonującego montaż wiązki elektrycznej w komorze silnika była pozycja z plecami zgiętymi i rękoma uniesionymi powyżej stawu łokciowego. Pozycja ta przyjmowana była przez 76,5% jednego cyklu. Natomiast tylko 23,5% czasu jednego cyklu pracownik utrzymywał pozycję ciała, przy której jego plecy były wyprostowane. 100% czasu pracownik przebywał z nogami wyprostowanymi, a obciążenie zewnętrzne ani razu nie przekroczyło 3 kg.

Na drugim stanowisku pracownik miał taki sam czas taktu równy 3 minutom. Najczęściej przyjmowaną pozycją ciała była ta z plecami zgiętymi oraz skrętem bocznym w pasie. Przyjmowana była ona przez 71,6% jednego cyklu. Natomiast tylko 28,0% czasu jednego cyklu pracownik utrzymywał pozycję ciała, przy której jego plecy i kończyny dolne były wyprostowane.

Codziennie po zakończonej pracy z egzoszkielem pracownicy wypełniali ankietę. Wyniki badań ankietowych przedstawione zostały na Wykresie 39. Każdy z pracowników wypełniał codziennie formularz, który obejmował 12 następujących stwierdzeń:

1. Zakładanie Chairless Chair uważam za łatwe.
2. Zdejmowanie Chairless Chair uważam za łatwe.
3. Czynności zakładania i zdejmowania wykonuję z coraz większą wprawą.
4. Chairless Chair nie przeszkadza mi przy chodzeniu.
5. Siedzenie z Chairless Chair uważam za wygodne.
6. Używając Chairless Chair, nie mam problemu z utrzymaniem równowagi.
7. Mogę łatwo regulować ustawienie wysokości.
8. Jestem zadowolony z jakości Chairless Chair.
9. Komfort noszenia uważam za wysoki.
10. Chairless Chair ułatwia mi pracę.
11. Poprzez korzystanie z Chairless Chair czuję się odciążony.
12. Poleciałbym Chairless Chair także innym pracownikom.

Pracownicy mogli ocenić każde pytanie w skali od 1 do 5, gdzie 1 oznacza, że pracownik całkowicie zgadza się z twierdzeniem, 5 – że pracownik zupełnie nie podziela tego zdania. Otrzymane wyniki prezentuje Wykres 32.



Wykres 32. Wyniki ankiety dotyczącej pracy z Chairless Chair. Źródło: badania własne.

Pracownicy ocenili zakładanie i zdejmowanie egzoszkieletu jako łatwe. Urządzenie było zdejmowane przed każdą przerwą. Czas na tę czynność powinien być uwzględniony przez planistę, który projektuje zadania dla danego stanowiska pracy. Po kilku dniach pracy pracownicy oceniali pozytywnie swoją wprawę w posługiwaniu się Chairless Chair. Najwięcej czasu poświęcili na naukę siedzenia i utrzymania równowagi. Podczas pracy z egzoszkieletem pracownicy mieli możliwość zmiany pozycji stojącej na siedzącą na kilku wybranych przez siebie wysokościach, dzięki czemu mogli indywidualnie i według własnych potrzeb dobrać wysokość siedzenia. Największym problem okazało się przemieszczanie pomiędzy miejscem pracy a tym, w którym znajdowały się części, które należało zabudować w aucie. „Krzesło bez krzesła” nie jest przeznaczone do pokonywania dłuższych dystansów. Osoby testujące zauważyły również wyraźną potrzebę poprawy w projekcie Chairless Chair, szczególnie w odniesieniu do poczucia bezpieczeństwa podczas siedzenia. Jakość wykonania i komfort noszenia urządzenia powinny zostać zoptymalizowane. Wszystkie uwagi pracowników przekazano drogą mailową do producenta urządzenia. Ze względu na powyższe uwagi, pracownicy ocenili średni wpływ na poziom odciążenia układu mięśniowego-szkieletowego i nie wszyscy polecaliby pracę z tym urządzeniem.

3.5.2. Wnioski z badań

W obydwu przeanalizowanych przypadkach pracy fizycznej na wybranych stanowiskach montażowych pozycje ułożenia poszczególnych członów ciała były wymuszone. Pozycje przyjmowane podczas pracy mogą mieć negatywny wpływ na układ mięśniowo-szkieletowy, ale dzięki zastosowaniu egzoszkieletu można takie postawy zmienić, redukując napięcia mięśni pleców i nóg. Podczas przeprowadzania eksperymentu postawa ciała zmieniła się na bardziej naturalną i pomogła w odciążeniu układu mięśniowo-szkieletowego.

Największym problemem podczas przeprowadzania eksperymentu okazała się dezynfekcja urządzenia. Na potrzeby eksperymentu były zakupione tylko 3 egzemplarze i przed rozpoczęciem pracy przez kolejnego uczestnika należało zdezynfekować urządzenie i poczekać na jego wyschnięcie.

Aby wdrożyć egzoszkielec na danym stanowisku pracy, należy odpowiedzieć na trzy zasadnicze pytania. Po pierwsze: skuteczność – czy egzoszkielec pomaga w pracy? Po drugie: jaki jest komfort noszenia, czy jest on dopasowany do wzrostu, wagi pracownika i czy można bezpiecznie pracować przy poruszającym się obiekcie? I po trzecie: obsługa – jak szybko i łatwo można go założyć?

Egzoszkielety mają potencjał, by znacznie zmniejszyć wpływ czynników leżących u podstaw rozwoju urazów mięśniowo-szkieletowych. Elastyczna struktura i niska masa egzoszkieletu sprawiają, że pracownicy mogą swobodnie chodzić, odwracać się i wykonywać wszystkie inne ruchy. Wiele czynności na linii montażowych musi być wykonywanych na stojąco tylko dlatego, że krzesło blokowałoby drogę. Pod koniec dnia pracy pracownicy nie tylko mają obolałe nogi i plecy, ale ich koncentracja i wydajność są również osłabione przez niepotrzebne stanie.

Dzięki przeprowadzonemu eksperymentowi udało się odpowiedzieć na czwarte pytanie badawcze: W jaki sposób środki techniki wpływają na możliwość planowania rotacji pracowników? Zastosowanie egzoszkieleatów rozszerza możliwość przydzielania stanowisk pracy osobom z niepełnosprawnościami, które do tej pory nie mogły pracować na wszystkich stanowiskach pracy. Przykładem takiego zastosowania są egzoszkielety na kończyny górne, które odciążają mięśnie rąk podczas pracy pod podwoziem auta lub podczas montażu nadkoli. Dzięki specjalnym siłownikom praca z rękoma uniesionymi nad linią barków nie powoduje dużego zmęczenia mięśni barków i pleców.

Pomimo dużego zainteresowania egzoszkieletemi o przeznaczeniu przemysłowym, ich wdrożenie na dużą skalę w przemyśle jest wciąż znikome. Jednym z powodów jest brak konkretnych norm bezpieczeństwa utrudniających wdrożenie ich na dużą skalę w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Używając odpowiednich egzoszkieleatów, promuje się zdrowe warunki pracy, pomaga unikać nadmiernego obciążenia.

Decydującym punktem jest właściwy wybór miejsca pracy. Egzoszkielety nie są bowiem środkiem zaradczym na nieergonomicznych stanowiskach pracy. Należy dokładnie przeanalizować zaplanowane dla danego stanowiska pracy czynności i potwierdzić, czy można je wykonać z użyciem urządzenia, ponieważ nie każdy egzoszkieleat pasuje do każdego zastosowania.

Egzoszkielety muszą stać się bardziej elastyczne w użyciu, oferować dobry komfort noszenia i nie mogą utrudniać użytkownikowi wykonywania dodatkowych czynności. Wykazano również, że egzoszkielety muszą być skuteczne i łatwe w obsłudze zgodnie z wymaganiami. Wtedy akceptacja pracowników dla ich noszenia wzrośnie. Jednak dowód na to, że egzoszkielety mogą zmniejszyć zaburzenia układu mięśniowo-szkieletowego, a tym samym liczbę dni chorobowych, musi zostać dostarczony w ramach długoterminowych badań.

Pomoce techniczne, takie jak mobilne dźwigi, podnośniki próżniowe lub stoły podnoszące, w 100% odciążają mięśnie pracowników. Jednak dźwigi, chwytaki czy podnośniki nie mogą być używane w każdym miejscu. I tu właśnie zaczyna się sensowne wykorzystanie egzoszkieleatów. Nie mogą one zastąpić pomocy technicznych, ale mogą je z pożytkiem uzupełniać.

Egzoszkieleat to kolejny element uzupełniający szeroką gamę środków wspomagających ergonomicznie zaprojektowane stanowiska pracy. Ze względu na wysoki potencjał, jakie oferują, zostały uwzględnione w modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej. Model bierze pod uwagę kryterium „przebadana możliwość usprawnień technicznych”, które odnosi się do sprawdzenia możliwości implementacji egzoszkieleatów lub ortez w systemie produkcyjnym.

3.6. Wywiady w zakresie ustalenia ograniczeń do modelu ergonomicznego balansowania

3.6.1. Opis i wyniki badań

Na podstawie wywiadu swobodnego przeprowadzonego z ekspertami zajmującymi się ergonomią pracy w produkcji pojazdów stwierdzono:

- Eksperci są zdania, że dopuszczalna jest praca po sobie na stanowiskach, które określone są jako krytyczne (powyżej 50 punktów według metody EWAS), ale nie powinny one obciążać tych samych partii mięśni. Odpowiednie zarządzanie obciążeniem pracy wpływa na komfort pracowników, umożliwiając osiągnięcie lepszej jakości pracy i szybszego tempa jej wykonywania.
- Jeżeli jest taka możliwość, to powinno tworzyć się stanowiska siedzące na linii montażowej. Wskazać należy, że praca przy produkcji może bardzo obciążać organizm. W zależności od roli pracownika w procesie produkcyjnym, mogą wystąpić problemy związane z trudnymi warunkami pracy, podnoszeniem ciężarów lub powtarzalnym stresem. Zła postawa to kolejny problem, który może powodować problemy ze zdrowiem osób pracujących w produkcji. Oprócz tego wskazuje się, że podejmowanie wysiłków na rzecz poprawy postawy wśród pracowników produkcyjnych może prowadzić do znacznego wzrostu produkcji. Pracownicy mogą poprawić postawę, uzyskując bezpośredni dostęp do fizjoterapii lub po prostu być bardziej uważnymi w ciągu dnia pracy.
- Rotacja stanowisk pracy powinna odbywać się w przemyślany sposób tak, aby nie obciążać tych samych partii mięśni podczas zmiany. Obecne metody tego nie uwzględniają. Warto też wspomnieć, że rotacja stanowisk to praktyka polegająca na regularnym przenoszeniu wszystkich pracowników między różnymi stanowiskami, aby zapewnić im dostęp do różnych działów firmy, jednocześnie ucząc się i doskonaląc swoje umiejętności. Rotację stanowisk można również wykorzystać do przełamania monotonnej pracy. Poza tym rotacja stanowisk zachęca pracowników do elastyczności, zmniejsza zmęczenie i pomaga złagodzić stres u pracowników, którzy pracują fizycznie. Zmieniające się środowisko pracy może również pobudzić nowe pomysły i perspektywy wpływające na pracę firmy i zwiększyć satysfakcję z pracy.
- W związku z tym, że nie wszystkie siły związane z montażem części można w miarodajny sposób zmierzyć, punkty ergo, które są przydzielone do danego stanowiska, nie

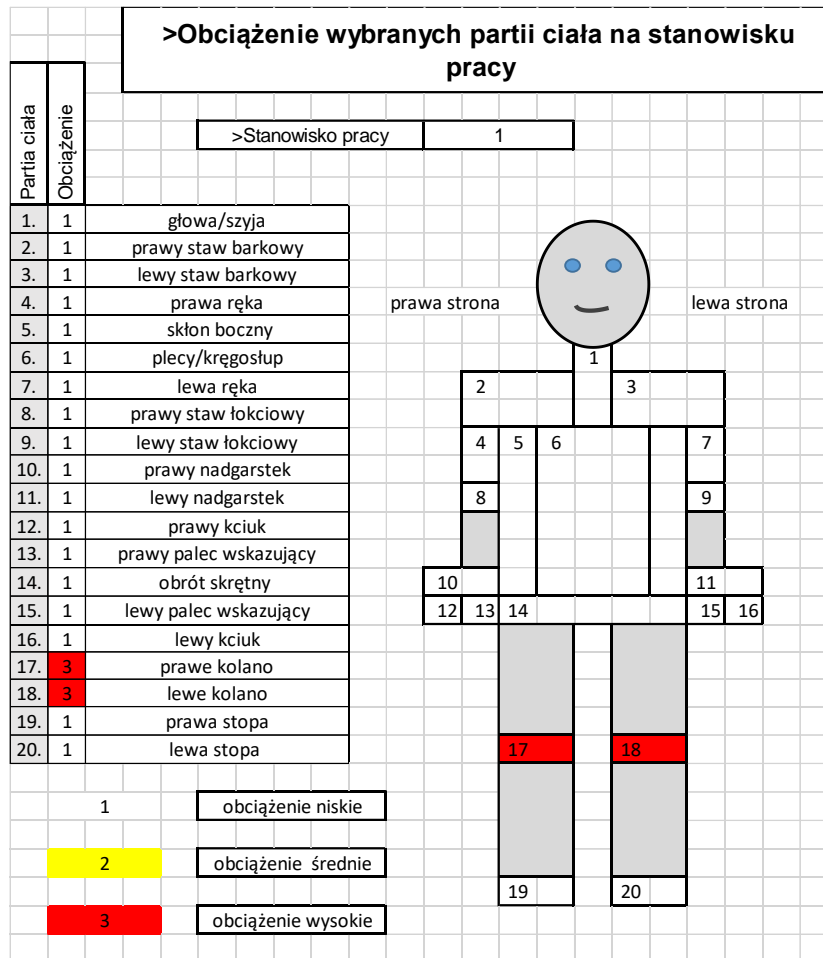
odzwierciedlają faktycznego obciążenia stanowiska. Szczególnie trudno zmierzyć siły związane z elektrycznym kontaktowaniem kostek elektrycznych oraz węży tzw. szybkozłącza. Nadmienić należy, że właściwe określenie ergo punktów ma na celu:

- 1) Zapewnienie prostego systemu analizy postawy wrażliwej na zagrożenia mięśniowo-szkieletowe w różnych zadaniach.
 - 2) Podział ciała na segmenty do indywidualnej oceny w odniesieniu do postaw i płaszczyzn ruchu.
 - 3) Zapewnienie systemu punktacji dla aktywności mięśni spowodowanej statyczną, dynamiczną, szybką zmianą lub niestabilną postawą.
 - 4) Zapewnienie przyjaznego dla użytkownika narzędzia oceny, które wymaga minimalnego czasu, wysiłku i sprzętu.
- W związku z tym, że nie ma wystarczających badań dotyczących stosowania egzoszkieleatów, nie są one zalecone do ciągłego stosowania.
 - Najczęstsze choroby spowodowane pracą na linii montażowej to: zespół cieśni nadgarstka, zapalenie ścięgna, artroza stawu, zespoły bólowe kręgosłupa i pleców.

Podczas wywiadów z ekspertami do spraw zdrowia omówiono koncepcje dwóch kart, które miałyby pomóc w procesie planowania rotacji. Karty i ich krótki opis znajdują się poniżej i są przedstawione na Rysunkach 13 i 14.

Karta stanowiska pracy i pracownika

W celu określenia subiektywnej oceny ryzyka ergonomicznego została zaproponowana karta stanowiska pracy, która zawiera informację o obciążeniu poszczególnych części ciała (Rysunek 13).



Rysunek 13. Przykładowa karta stanowiska pracy z subiektywną oceną. Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 14 przedstawia kartę pracownika z oznaczonym obszarem z dolegliwością zdefiniowaną przez lekarza medycyny pracy oraz ze znajomością stanowisk pracy w danym zespole.

>Karta Pracownika

>Pracownik 1

Partia ciała	Ograniczenia zdrowotne	
1.	1	głowa/szyja
2.	1	prawy staw barkowy
3.	1	lewy staw barkowy
4.	1	prawa ręka
5.	1	skłon boczny
6.	1	plecy/kręgosłup
7.	1	lewa ręka
8.	1	prawy staw łokciowy
9.	1	lewy staw łokciowy
10.	2	prawy nadgarstek
11.	2	lewy nadgarstek
12.	2	prawy kciuk
13.	2	prawy palec wskazujący
14.	2	obróć skrętny
15.	2	lewy palec wskazujący
16.	1	lewy kciuk
17.	1	prawe kolano
18.	1	lewe kolano
19.	1	prawa stopa
20.	1	lewa stopa

prawa strona lewa strona

1	może wykonywać
2	średnie obciążenie
3	nie może być obciążenia

> Znajomość stanowiska pracy

> Proszę zaznaczyć, czy pracownik potrafi wykonywać poniższe zadania: 1 - tak, 0 - nie

Stanowisko	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Znajomość	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Rysunek 14. Przykładowa karta pracownika. Źródło: opracowanie własne.

3.6.2. Wnioski z badań

Dzięki przeprowadzonym wywiadam udało się odpowiedzieć na piąte pytanie badawcze: Jak włączać do oceny biomechanicznej czynności o niskiej wariantowości, a wysokim stopniu obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego?

Aby tego typu czynności nie były pomijane, ergonomista na podstawie piktogramu „Stanowisko Pracy” określa subiektywnie, które partie mięśni lub stawy są szczególnie obciążone na danym stanowisku. Subiektywna ocena stanowiska pracy opiera się na nieobiektywnych

kryteriach oceny stanowiska pracy. Podczas tej oceny ergonomista zwraca szczególną uwagę na urządzenia, które ma obsługiwać pracownik i czynności, które będą leżały w zakresie jego obowiązków. Warto tu wspomnieć, że elementy te, znajdujące się w miejscu pracy, mają decydujące znaczenie dla tego, jakie ruchy i jakie obciążenia będą występowały u pracownika. Ergonomista dokonuje subiektywnej oceny na podstawie swojej wiedzy i doświadczenia. Dzięki subiektywnej ocenie czynności o wysokim stopniu obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego nie tracą na swojej ważności, mimo że występują stosunkowo rzadko. W innych metodach czynności o niskim wskaźniku występowania mogą być niezauważone w ogólnej ocenie ryzyka ergonomicznego. Zaproponowana przez autora karta stanowiska pracy nie uwzględnia częstotliwości występowania zadania, dzięki czemu wszystkie zaplanowane zadania traktowane są na równo i ich ocena pojawia się na zaplanowanej karcie, która jest podstawą do prowadzenia ergonomicznej rotacji pracowników.

Podsumowując, należy wskazać, że przeprowadzone badanie dostarczyło wielu cennych informacji w obszarze eksperckiej oceny ergonomicznego balansowania linii montażowej przy uwzględnieniu czynników bezpośrednio wpływających na efektywność pracy i zmęczenie pracowników. Najczęstsze zaburzenia mięśniowo-szkieletowe (MSD) są związane z powtarzalnymi i monotonnymi zadaniami wynikającymi z czynności manualnych wymagających ruchów ramion i dłoni, takich jak zginanie, prostowanie, chwytanie, trzymanie, skręcanie, zaciskanie i sięganie. W normalnym, zwykłym stanie te powszechne ruchy nie są szczególnie szkodliwe, ale wysoki poziom powtarzalności, często związany z innymi czynnikami (np. wibracje, siła ruchów, temperatura itp.), czyni je niebezpiecznymi w określonych sytuacjach pracy.

Skuteczną odpowiedzią może być odpowiednie zaplanowanie rotacji pracowników zaangażowanych w powtarzalne zadania ręczne.

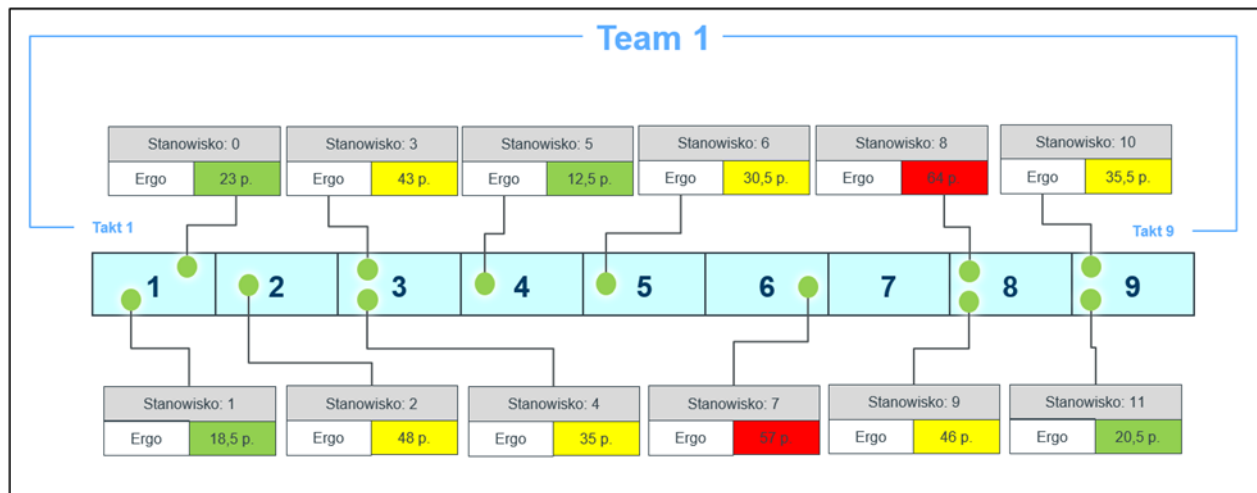
3.7. Badanie dotyczące zastosowania algorytmu rotacji pracowników

3.7.1. Struktura modelu badawczego

W badaniu wykorzystano potencjał programu Python do stworzenia autorskiego narzędzia do rotacji pracowników na linii produkcyjnej, który uwzględnia wcześniej opisane badania (nad rotacją pracowników).

Python to interpretowany, interaktywny, obiektowy język programowania. Zawiera moduły, wyjątki, dynamiczne typowanie, dynamiczne typy danych bardzo wysokiego poziomu i klasy. Wszystkie niezbędne narzędzia programistyczne są dostępne na licencjach otwartych, mogących zastąpić komercyjne, często kosztowne używane dotychczas programy.

Wspierając się środowiskiem PyCharm Community Edition 2021.3.2, autor przeniósł model koncepcyjny do narzędzia, tworząc model skomputeryzowany przy użyciu języka programowania Python. W celu przeprowadzenia badań nad ergonomicznym balansowaniem linii autor stworzył symulację linii montażowej. Czas trwania czynności został wyceniony według metody MTM UAS. Pierwsza linia składała się z 9 taktów i 12 stanowisk pracy. Schemat linii został przedstawiony na Rysunku 15.



Rysunek 15. Layout, zespół 1. Źródło: opracowanie własne.

Opracowany model gromadzi ograniczenia (które należy wypełnić) i udziela dokładnej odpowiedzi na pytanie czy można wypełnić wspomniane ograniczenia, a w przypadku pozytywnej odpowiedzi przedstawia możliwe rozwiązania. Jeżeli odpowiedź okaże się negatywna, model (a dokładnie wariant modelu) podejmuje próbę wyjaśnienia, dlaczego próba uzyskania rozwiązania nie powiodła się, co robi za sprawą rozwiązania uproszczonego (inaczej mówiąc zrelaksowanego) problemu. Program, stosując model z uproszczonym zadaniem, proponuje swojego rodzaju kompromis. Działanie tego składnika programu jest zawężone, ponieważ niektóre ograniczenia nie są możliwe do zrelaksowania (np. w sytuacji, gdy pracownik nie jest w stanie być jednocześnie w dwóch miejscach), nie są przedstawione wszystkie możliwości (mowa tu o ograniczeniu czasowym). Dodatkowo do ograniczeń problemu dodano zmienną, której zadaniem jest

rozproszenie średnich dziennych obciążeń działaniem (punktami ergonomicznymi EAWS). To tzw. odchylenie standardowe dobowej łącznej liczby punktów ergonomii. Możliwe jest zdefiniowanie jej największej wartości. Pod kątem praktycznym proces opiera się na sukcesywnym minimalizowaniu rozproszenia do momentu, aż osiągnie się „dobry” wynik. Jeżeli model nie znajduje rozwiązania, to należy podjąć działania polegające na przetaktowaniu czynności montażowych pomiędzy stanowiskami pracy.

W celu wyznaczenia optymalnej rotacji pracowników został napisany program, który wczytuje dane wejściowe z linii produkcyjnej i za pomocą algorytmów ustala najkorzystniejszą rotację pracowników w danym teamie przy uwzględnieniu zaplanowanych restrykcji.

Poniżej przedstawiono definicje, które zostały użyte w programie Python:

A – liczba stanowisk,

R – liczba rotacji,

Z – liczba pracowników,

B – liczba partii ciała,

D – liczba dni, na które planujemy prace.

$liczba_rotacji_dziennie = R/D$

$max_na_jednym_stanowisku$ - ile maksymalnie razy podczas wszystkich dni D można pracować na tym samym stanowisku

Stanowiska:

$p(i)$ - liczba punktów ergonomii dla stanowiska i

$$c(i) = \begin{cases} 0 & \text{gdy } p(i) \leq 25 \\ 1 & \text{gdy } 25 < p(i) \leq 50 \\ 2 & \text{gdy } 50 < p(i) \end{cases}$$

$$obciazenia_partii_ciala(i, b) = \begin{cases} 1 & \text{gdy stanowisko } i \text{ związane jest z obciążeniem niskim partii } b \\ 2 & \text{gdy stanowisko związane jest z obciążeniem średnim partii } b \\ 3 & \text{gdy stanowisko związane jest z obciążeniem wysokim partii } b \end{cases}$$

Pracownicy:

$$ogr_partii_ciala_prac(k, b) = \begin{cases} 1 & \text{gdy pracownik } k \text{ nie ma ograniczeń dla partii } b \\ 2 & \text{gdy pracownik } k \text{ ma lekkie ograniczenie dla partii } b \\ 3 & \text{gdy pracownik } k \text{ ma ciężkie ograniczenie dla partii } b \end{cases}$$

$U(k) \subset \overline{1, A}$ - zbiór umiejętności pracownika k .

Zmienne decyzyjne:

$x_{ijk} \in \overline{1, Z}$ - czy pracownik k pracuje na stanowisku i podczas rotacji j ,
 $i \in \overline{1, A}, k \in \overline{1, Z}$ oraz $j \in \overline{1, R}$.

```
#Constraint 3
#dwa zmiany z rzędu nie mogą być obie ciężkie

# Jeśli zmiana jest ciężka to zmienna hard ma wartość 1 w.p. 0
stanowiska_ciezkie = [hard for hard in range(data['A']) if data['c'][hard]]

for k in range(data['Z']):
    for j in range(data['R'] - 1):
        for l in stanowiska_ciezkie:
            for l_2 in stanowiska_ciezkie:
                if l != l_2:
                    solver.Add(x[l][j][k] + x[l_2][j+1][k] < 2)
```

Ograniczenia ogólne:

Pracownicy pracują na maksymalnie jednym stanowisku jednocześnie:

$$\forall_{j \in \overline{1, R}} \forall_{k \in \overline{1, Z}} \sum_i (x_{i,j,k}) \leq 1$$

Na każdym stanowisku pracuje dokładnie jeden pracownik:

$$\forall_{j \in \overline{1, R}} \forall_{i \in \overline{1, A}} \sum_k (x_{i,j,k}) = 1$$

Pracownik nie pracuje dwie zmiany po sobie na tym samym stanowisku pod warunkiem, że potrafi lub może pracować na przynajmniej 4 różnych stanowiskach:

$$\forall_{k \in \overline{1, Z}} \forall_{j \in \overline{1, R-1}} (\text{card}(U[k]) > 3 \Rightarrow x_{i,j,k} + x_{i,j+1,k} \leq 1)$$

Pracownik nie pracuje cały dzień na tym samym stanowisku pod warunkiem, że potrafi lub może pracować na przynajmniej 3 różnych stanowiskach:

$$\forall_{k \in \overline{1, Z}} \forall_{d \in \overline{1, D}} \forall_{i \in \overline{1, A}} (\text{card}(U[k]) > 2 \Rightarrow \sum_{j=(d-1)*\text{liczba_rotacji_dziennie}+1}^{(d-1)*\text{liczba_rotacji_dziennie}+3} x_{i,j,k} < \text{liczba_rotacji_dziennie})$$

Pracownik nie pracuje dwie zmiany po sobie na stanowisku krytycznym:

$$\forall_{k \in \overline{1, Z}} \forall_{j \in \overline{1, R-1}} c(i) \cdot x_{i,j,k} + c(i) \cdot x_{i,j+1,k} < 4$$

Pracownik pracuje tylko na stanowiskach ze swojego zbioru umiejętności:

$$\forall_{k \in \overline{1, Z}} \forall_{i \notin U(k)} x_{i,j,k} = 0$$

Liczba razy na tym samym stanowisku w ciągu całego przydziału np. tydzień, miesiąc itd. nie może przekraczać z góry określonej maksymalnej wartości pod warunkiem, że potrafi lub może pracować na przynajmniej 4 różnych stanowiskach:

$$\forall_{k \in \overline{1, Z}} \forall_{i \in \overline{1, A}} (\text{card}(U[k]) > 3 \Rightarrow \sum_{j=1}^R x_{i,j,k} < \text{max_na_jednym_stanowisku})$$

Każdy pracownik pracuje raz dziennie na stanowisku lekkim ze względu na obciążenie danej partii mięśni (ocena subiektywna):

$$\forall_{k \in \overline{1, Z}} \forall_{b \in \overline{1, B}} \forall_{i \in \overline{1, A}} \forall_{d \in \overline{1, D}} (\text{obciazenia_partii_ciala}(i, b) = 1 \Rightarrow \sum_{j=(d-1)*\text{liczba_rotacji_dziennie}+3}^{(d-1)*\text{liczba_rotacji_dziennie}+3} x_{i,j,k} \geq 1)$$

Jeżeli pracownik ma średnie ograniczenie partii ciała, to nie pracuje na stanowisku obciążającym te partie ciała w stopniu ciężkim dwa razy z rzędu:

$$\forall_{k \in \overline{1, Z}} \forall_{b \in \overline{1, B}} \forall_{j \in \overline{1, R-1}} (\text{obciazenia_partii_ciala}(i, b) = 3 \\ i \text{ ogr_partii_ciala_prac}(k, b) = 2 \Rightarrow x_{i,j,k} + x_{i,j+1,k} \leq 1)$$

Jeżeli pracownik ma ciężkie ograniczenie partii ciała, to nie pracuje na stanowisku obciążającym te partie ciała w stopniu średnim dwa razy z rzędu:

$$\forall_{k \in \overline{1, Z}} \forall_{b \in \overline{1, B}} \forall_{j \in \overline{1, R-1}} (\text{obciazenia_partii_ciala}(i, b) = 2 \\ i \text{ ogr_partii_ciala_prac}(k, b) = 3 \Rightarrow x_{i,j,k} + x_{i,j+1,k} \leq 1)$$

Jeżeli pracownik ma ciężkie obciążenie partii ciała, to nie pracuje na stanowisku obciążającym te partie ciała w stopniu ciężkim.

$$\forall_{k \in \overline{1, Z}} \forall_{b \in \overline{1, B}} \forall_{j \in \overline{1, R}} (\text{obciazenia_partii_ciala}(i, b) = 3 \\ i \text{ ogr_partii_ciala_prac}(k, b) = 3 \Rightarrow x_{i,j,k} = 0)$$

Warianty rotacji pracowników

Zaprojektowany i opisany wyżej model wylicza sposób rotacji dla trzech wariantów:

Wariant 1: uwzględnia punkty ergo (MTM EAWS) oraz obciążenia poszczególnych mięśni na stanowisku pracy. Uzyskane wyniki można zastosować do nowo planowanych linii montażowych, gdzie nie znamy jeszcze umiejętności i niepełnosprawności pracowników.

Wariant 2: uwzględnia tak jak w wariantcie 1: punkty ergo oraz obciążenia poszczególnych mięśni na stanowisku pracy oraz umiejętności i ograniczenia/niepełnosprawności pracowników. Uzyskane wyniki można zastosować dla bieżącej produkcji, kiedy znane są dane dotyczące pracowników. W przypadku, jeśli występuje duża ilość ograniczeń, restrykcji i duża liczba ograniczeń zdrowotnych pracowników, może zdarzyć się, że model nie wyznaczy rotacji, ponieważ nie będzie rozwiązania. W takim przypadku model zacznie wyliczać wariant 3.

Wariant 3: jeśli algorytm nie znajduje rozwiązania w wariantcie 3, to zostają uruchomione alokacje, a więc rezygnacja z niektórych restrykcji. Model wyznaczy sposób rotacji, ale przy założeniu, że będzie wyłączona pewna ilość restrykcji, np. dopuszczalna praca na tym samym stanowisku zmiana po zmianie.

Restrykcje zastosowane w modelu zostały opisane powyżej. Poniżej przedstawiono przykłady dla dwóch restrykcji:

Twarde restrykcje dla wariantu 3:

Dwie zmiany z rzędu nie mogą być zmianami ciężkimi; jeżeli pracownik ma problemy z barkiem, to nie pracuje na stanowiskach, które obciążą ta partię mięśni.

Miękkie restrykcje dla wariantu 3:

Warunek zmiany stanowisk bezpośrednio po sobie może zostać zwiększony dziennym rozrzutem punktów pomiędzy pracownikami.

Zaproponowane restrykcje można rozszerzać o dodatkowe, specyficzne dla danej linii czynniki. Ważnym aspektem w definiowaniu restrykcji jest stan zdrowia pracowników na danej linii montażowej oraz specyfika czynności, która w różnym stopniu obciąża poszczególne partie mięśni i części ciała. Na potrzeby badania zaproponowano restrykcje, które zostały omówione z ekspertami do spraw zdrowia.

3.7.2. Symulacja z zastosowaniem algorytmu rotacji

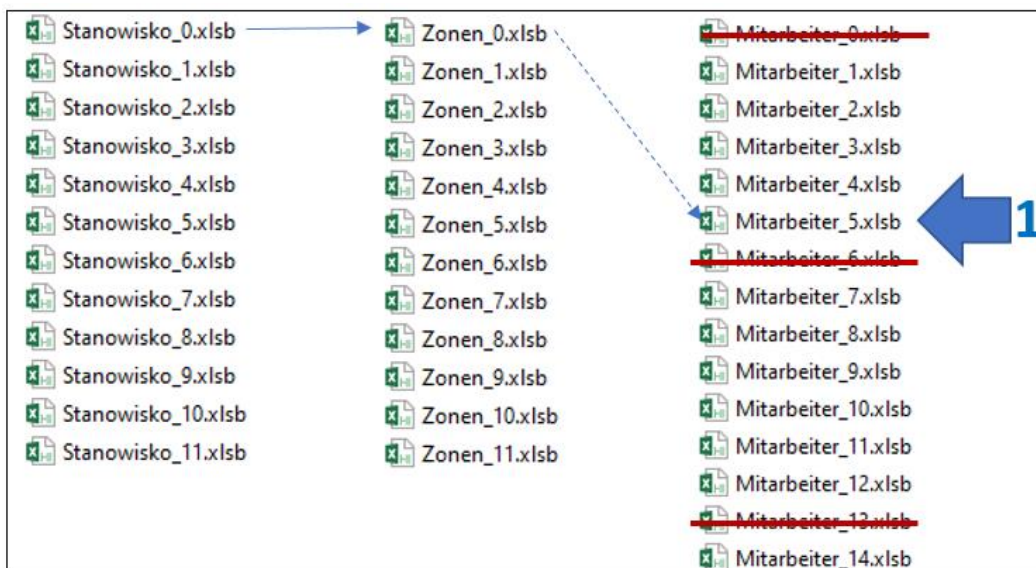
Scenariusz 1

Opisany scenariusz dotyczy wariantu 2 (w modelu występuje też wariant 1 i 3). W testowanym scenariuszu przyjęto następujące założenia:

- 4 pracowników ma stwierdzone przez lekarza medycyny pracy znaczne zwyrodnienia stanów kolanowych,
- kolejnych 4 pracowników ma umiarkowane zwyrodnienia stawów kolanowych,
- na 4 stanowiskach występują wysokie obciążenia stawów kolanowych,
- na 4 stanowiskach występują średnie obciążenia stawów kolanowych

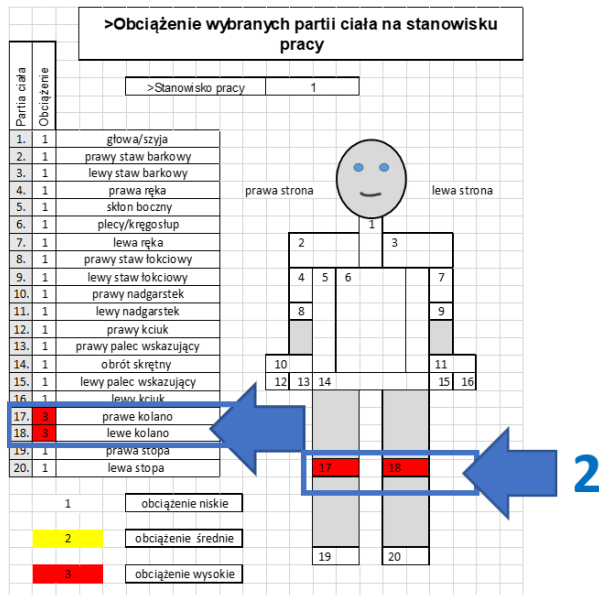
Scenariusz 1 zakłada pracę na 12 stanowiskach oznaczonych numerami od 0 do 11 (Rysunek 17). Każde ze stanowisk zostało wycenione pod kątem ergonomicznego obciążenia przy zastosowaniu metody MTM EAWS i zapisane w pliku „Stanowisko”. W kolejnym etapie dane zostały ocenione przez ergonomistów i zapisane w pliku „Zonen”.

Umiejętności i stan zdrowia pracowników został zapisany w pliku „Mitarbeiter”. Rysunek 16 przedstawia opisany pliki z danymi, które zostały opisane powyżej. Dla scenariuszy symulacyjnych opracowano dane dla 15 pracowników (dodatkowo pracownicy brutto oraz jeden dodatkowy pracownik z innej linii). Dla scenariusza 1 trzech pracowników (0, 6, 12) zostali wykreśleni, aby zgadzała się liczba miejsc pracy z pracownikami. Numer 1 wskazuje pracownika numer 5.



Rysunek 16. Dane wejściowe dla scenariusza 1. Źródło: opracowanie własne.

Dla scenariusza 1 zdefiniowano na stanowiskach 0, 1, 2, 3 wysokie obciążenie stawów kolanowych oznaczonych na polu 17 i 18 na rysunku 17. Dla stanowisk 4, 5, 6 i 7 określono te obciążenia jako średnie. Dla ostatnich czterech stanowisk określono jako obciążenie niskie. Numer 2 na karcie **stanowiska pracy** na poniższym rysunku wskazuje obszar kolan (w tabeli pozycja 17 i 18).



Rysunek 17. Przykładowa karta stanowiska pracy. Źródło: opracowanie własne.

Dla scenariusza 1 zdefiniowano czterech pracowników oznaczonych numerami 1, 2, 3, 4 którzy mają problemy ze stawami kolanowymi i nie mogą pracować na stanowiskach, które zostały określone jako charakteryzujące się wysokim obciążeniem tej partii ciała. Pracownicy 5, 7, 8, 9 mają dolegliwości w stawach kolanowych, ale nie wykluczają one pracy na tych stanowiskach. Pracownicy 10, 11, 12, 14 nie mają żadnych dolegliwości. Wszyscy pracownicy 0–14 znają wszystkie stanowiska pracy.

Rysunek 18 przedstawia **kartę pracownika** z oznaczonym obszarem z dolegliwością zdefiniowaną przez lekarza medycyny pracy bądź zgłoszoną przez pracownika osobiście do osoby wyznaczającej rotację. Numer 2 wskazuje na piktogram z pracownikiem, na obszar kolan (w Tabeli 17 i 18).

>Karta Pracownika

>Pracownik **1**

1.	1	głowa/szyja																		
2.	1	prawy staw barkowy																		
3.	1	lewy staw barkowy																		
4.	1	prawa ręka																		
5.	1	skłon boczny																		
6.	1	plecy/kregoslup																		
7.	1	lewa ręka																		
8.	1	prawy staw łokciowy																		
9.	1	lewy staw łokciowy																		
10.	1	prawy nadgarstek																		
11.	1	lewy nadgarstek																		
12.	1	prawy kciuk																		
13.	1	prawy palec wskazujący																		
14.	1	obrót skrętny																		
15.	1	lewy palec wskazujący																		
16.	1	lewy kciuk																		
17.	3	prawe kolano																		
18.	3	lewe kolano																		
19.	1	prawa stopa																		
20.	1	lewa stopa																		

1	możemykonywać
2	średnie obciążenie
3	nie może być obciążenia

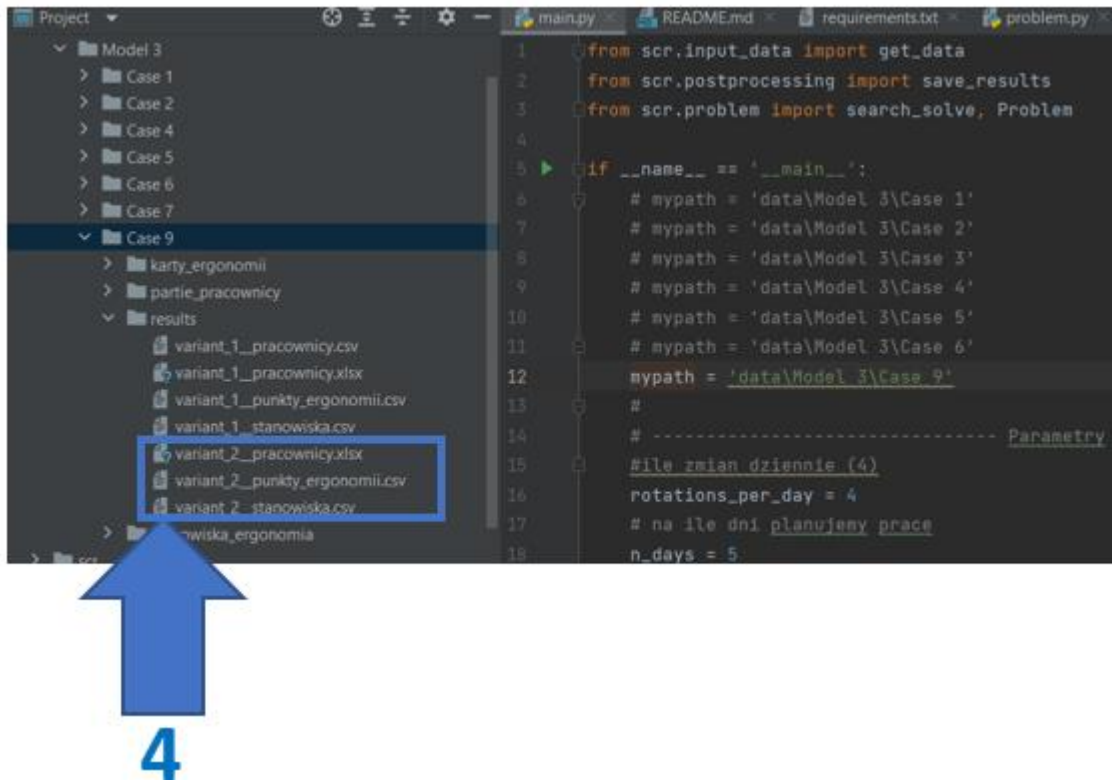
> Znajomość stanowiska pracy

> Proszę zaznaczyć, czy pracownik potrafi wykonywać poniższe zadania: 1 - tak, 0 - nie

Stanowisko	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Znajomość	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Rysunek 18. Przykładowa karta pracownika. Źródło: opracowanie własne.

Przy użyciu modelu ergonomicznego balansowania linii został zaproponowany wariant rotacji pracowników, który uwzględnia pracę w ciągu 5 dni roboczych przy założeniu, że każdy pracownik po godzinach zmienia swoje stanowisko pracy. Na rysunku 19 przedstawiono widok środowiska PyCharm Community Edition 2021.3.2. Numer 4 wskazuje wariant 2 i zapisane w katalogu rozwiązania proponowane przez algorytm.



Rysunek 19. Widok środowiska PyCharm Community. Źródło: opracowanie własne.

W Tabeli 11 przedstawiono wyniki proponowanej rotacji. Numer 5 wskazuje na pierwszy dzień pracy i cztery rotacje w ciągu dnia. Numery wewnątrz tabeli wskazują na stanowiska pracy (0–11), kolory oznaczają podział na stanowiska według EAWS:

- kolor zielony, zakres niekrytyczny: działania kształtujące nie są konieczne;
- kolor żółty, zakres potencjalnie krytyczny: należy wypróbować działania kształtujące, wykonalność jest zapewniona, konieczność sprawdzenia tolerancji w zależności od częstości i warunków wykonywania pracy;
- kolor czerwony: działania kształtujące są konieczne. Tego zakresu należy unikać. Nie wolno przekraczać wartości granicznych.

	Zmiana_nr_1	Zmiana_nr_2	Zmiana_nr_3	Zmiana_nr_4	Zmiana_nr_5	Zmiana_nr_6	Zmiana_nr_7	Zmiana_nr_8	Zmiana_nr_9	Zmiana_nr_10	Zmiana_nr_11	Zmiana_nr_12	Zmiana_nr_13	Zmiana_nr_14	Zmiana_nr_15	Zmiana_nr_16	Zmiana_nr_17	Zmiana_nr_18	Zmiana_nr_19	Zmiana_nr_20
pracownik_0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
pracownik_1	4	9	6	11	7	10	6	10	4	8	4	11	9	6	9	7	10	6	10	7
pracownik_2	5	11	7	10	6	11	5	9	6	10	6	8	6	8	5	10	4	9	7	11
pracownik_3	8	4	10	6	11	7	10	7	10	6	10	8	8	4	11	5	11	5	8	5
pracownik_4	7	10	11	7	9	6	8	5	11	5	9	6	10	5	8	6	8	4	9	4
pracownik_5	0	6	4	8	10	5	4	0	1	7	11	7	4	11	4	2	9	3	5	6
pracownik_6	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
pracownik_7	11	2	1	4	5	9	2	4	8	3	5	4	5	2	7	9	6	1	4	10
pracownik_8	2	5	9	5	4	8	0	6	5	4	2	10	7	10	2	4	7	2	6	9
pracownik_9	6	8	5	1	8	4	7	1	7	1	7	9	3	7	6	11	5	7	11	0
pracownik_10	10	1	0	3	0	2	9	3	0	11	0	2	1	9	3	1	0	11	3	1
pracownik_11	3	0	3	9	2	3	1	11	2	9	1	0	11	0	1	3	2	0	2	8
pracownik_12	9	3	2	0	1	0	3	8	9	2	3	1	2	3	10	0	1	10	0	3
pracownik_13	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
pracownik_14	1	2	8	2	3	1	11	2	3	0	8	3	0	1	0	8	3	8	1	2



Tabela 11. Proponowany system rotacji. Przydział stanowiska do pracownika. Źródło: opracowanie własne.

W Tabeli 12 pokazano obciążenie obszaru szyi, które zostało zdefiniowane przez ergonomistów jako „niskie”, dlatego w odpowiedniej komórce pojawił się kolor zielony.

W Tabeli 13 zostało pokazane obciążenie obszaru kolan, które zostało zdefiniowane przez ergonomistów jako „wysokie”, dlatego w odpowiedniej komórce pojawił się kolor czerwony.

Numer 6 wskazuje „Muscle 1”, które odpowiada za obszar szyi.

Numer 7 wskazuje „Muscle 17”, które odpowiada za obszar kolan.

W Tabeli 13 i 14 kolory wskazują, czy na danym stanowisku pojawiają się obciążenia poszczególnych partii mięśni i obszarów ciała.

Ponieważ pracownicy 1, 2, 3, 4 nie mogą pracować na stanowiskach, gdzie kolana są mocno obciążone, to przydzielone są tylko stanowiska z obszaru, gdzie występuje średnie obciążenie lub nie występuje w ogóle (kolor żółty i zielony). Dla tych pracowników została zdefiniowana również restrykcja miękka, która dopuszcza pracę na stanowisku, gdzie występuje obciążenie średnie, ale nie może ono pojawić się na dwóch zmianach z kolei (w ciągu jednego dnia roboczego).

System przydzielił pracownikom oznaczonym numerem 5, 7, 8 i 9 prace na stanowiskach obciążających ciężko dana część ciała, ale zgodnie z restrykcją do takiej sytuacji może dojść tylko jeden raz w ciągu dnia roboczego.

System przydzielił pracownikom oznaczonym numerem 10, 11, 12 i 14 prace na stanowiskach, gdzie obciążenie jest wysokie. Występuje tutaj restrykcja miękka, która mówi, że każdy pracownik w ciągu dnia powinien pracować przynajmniej raz na stanowisku, które nie obciąża w ogóle danej partii ciała, dlatego u każdego z ostatnich czterech pracowników przydzielono stanowisko, które nie obciąża danego mięśnia 4 razy w ciągu dnia.

	Zmiana_nr_1	Zmiana_nr_2	Zmiana_nr_3	Zmiana_nr_4	Zmiana_nr_5	Zmiana_nr_6	Zmiana_nr_7	Zmiana_nr_8	Zmiana_nr_9	Zmiana_nr_10	Zmiana_nr_11	Zmiana_nr_12	Zmiana_nr_13	Zmiana_nr_14	Zmiana_nr_15	Zmiana_nr_16	Zmiana_nr_17	Zmiana_nr_18	Zmiana_nr_19	Zmiana_nr_20
pracownik_0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
pracownik_1	4	9	6	11	7	10	6	10	4	8	4	11	9	6	9	7	10	6	10	7
pracownik_2	5	11	7	10	6	11	5	9	6	10	6	8	6	8	5	10	4	9	7	11
pracownik_3	8	4	10	6	11	7	10	7	10	6	10	5	8	4	11	5	11	5	8	5
pracownik_4	7	10	11	7	9	6	8	5	11	5	9	6	10	5	8	6	8	4	9	4
pracownik_5	0	6	4	8	10	5	4	0	1	7	11	7	4	11	4	2	9	3	5	6
pracownik_6	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
pracownik_7	11	7	1	4	5	9	2	4	8	3	5	4	5	2	7	9	6	1	4	10
pracownik_8	2	5	9	5	4	8	0	6	5	4	2	10	7	10	2	4	7	2	6	9
pracownik_9	6	8	5	1	8	4	7	1	7	1	7	9	3	7	6	11	5	7	11	0
pracownik_10	10	1	0	3	0	2	9	3	0	11	0	2	1	9	3	1	0	11	3	1
pracownik_11	3	0	3	9	2	3	1	11	2	9	1	0	11	0	1	3	2	0	2	8
pracownik_12	9	3	2	0	1	0	3	8	9	2	3	1	2	3	10	0	1	10	0	3
pracownik_13	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
pracownik_14	1	2	8	2	3	1	11	2	3	0	8	3	0	1	0	8	3	8	1	2



Tabela 12. Obciążenie partii dla obszaru „1”. Źródło: opracowanie własne.


	Zmiana_nr_1	Zmiana_nr_2	Zmiana_nr_3	Zmiana_nr_4	Zmiana_nr_5	Zmiana_nr_6	Zmiana_nr_7	Zmiana_nr_8	Zmiana_nr_9	Zmiana_nr_10	Zmiana_nr_11	Zmiana_nr_12	Zmiana_nr_13	Zmiana_nr_14	Zmiana_nr_15	Zmiana_nr_16	Zmiana_nr_17	Zmiana_nr_18	Zmiana_nr_19	Zmiana_nr_20
pracownik_0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
pracownik_1	4	9	6	11	7	10	6	10	4	8	4	11	9	6	9	7	10	6	10	7
pracownik_2	5	11	7	10	6	11	5	9	6	10	6	8	6	8	5	10	4	9	7	11
pracownik_3	8	4	10	6	11	7	10	7	10	6	10	5	8	4	11	5	11	5	8	5
pracownik_4	7	10	11	7	9	6	8	5	11	5	9	6	10	5	8	6	8	4	9	4
pracownik_5	0	6	4	8	10	5	4	0	1	7	11	7	4	11	4	2	9	3	5	6
pracownik_6	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
pracownik_7	11	7	3	4	5	9	2	4	8	3	5	4	5	2	7	9	6	1	4	10
pracownik_8	2	5	9	5	4	8	0	6	5	4	2	10	7	10	2	4	7	2	6	9
pracownik_9	6	8	5	1	8	4	7	1	7	1	7	9	3	7	6	11	5	7	11	0
pracownik_10	10	1	0	3	0	2	9	3	0	11	0	2	1	9	3	1	0	11	3	1
pracownik_11	3	0	3	9	2	3	1	11	3	9	1	0	11	0	1	3	2	0	2	8
pracownik_12	9	3	2	0	1	0	3	8	9	2	3	1	2	3	10	0	1	10	0	3
pracownik_13	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
pracownik_14	1	2	8	2	3	1	11	2	3	0	8	3	0	1	0	8	3	8	1	2



	Muscle_10	Muscle_11	Muscle_12	Muscle_13	Muscle_14	Muscle_15	Muscle_16	Muscle_17	Muscle_18
...									

Tabela 13. Obciążenie partii mięśni dla obszaru „17”. Źródło: opracowanie własne.

W Tabeli 14 pokazano przydział pracownika do stacji roboczej dla 1 tygodnia pracy (20 zmian, ponieważ $4 \times 5 = 20$). Numer 8 wskazuje na kolumnę ze stanowiskami.

8 

Pracownik numer:																				
	Zmiana nr. 1	Zmiana nr. 2	Zmiana nr. 3	Zmiana nr. 4	Zmiana nr. 5	Zmiana nr. 6	Zmiana nr. 7	Zmiana nr. 8	Zmiana nr. 9	Zmiana nr. 10	Zmiana nr. 11	Zmiana nr. 12	Zmiana nr. 13	Zmiana nr. 14	Zmiana nr. 15	Zmiana nr. 16	Zmiana nr. 17	Zmiana nr. 18	Zmiana nr. 19	Zmiana nr. 20
0	5	11	10	12	10	12	8	5	10	14	10	11	14	11	14	12	10	11	12	9
1	14	10	7	9	12	14	11	9	5	9	11	12	10	14	11	10	12	7	14	10
2	8	14	12	14	11	10	7	14	11	12	8	10	12	7	8	5	11	8	11	14
3	11	12	11	10	14	11	12	10	14	7	12	14	9	12	10	11	14	5	10	12
4	1	3	5	7	8	9	5	7	1	8	1	7	5	3	5	8	2	4	7	4
5	2	8	9	8	7	5	2	4	8	4	7	3	7	4	2	3	9	3	5	3
6	9	5	1	3	2	4	1	8	2	3	2	4	2	1	9	4	7	1	8	5
7	4	7	2	4	1	3	9	3	9	5	9	5	8	9	7	1	8	9	2	1
8	3	9	14	5	9	8	4	12	7	1	14	2	3	2	4	14	4	14	3	11
9	12	1	8	11	4	7	10	2	12	11	4	9	1	10	1	7	5	2	4	8
10	10	4	3	2	5	1	3	1	3	2	3	8	4	8	12	2	1	12	1	7
11	7	2	4	1	3	2	14	11	4	10	5	1	11	5	3	9	3	10	9	2

Tabela 14. Przydział pracownika do stacji roboczej. Źródło: opracowanie własne.

W Tabeli 15 pokazano punktację ergo dla każdej zmiany. Numerem 9 oznaczono tu kolumny z uśrednioną punktacją punktów ergonomicznego ryzyka dla każdego dnia roboczego (poniedziałek – piątek).

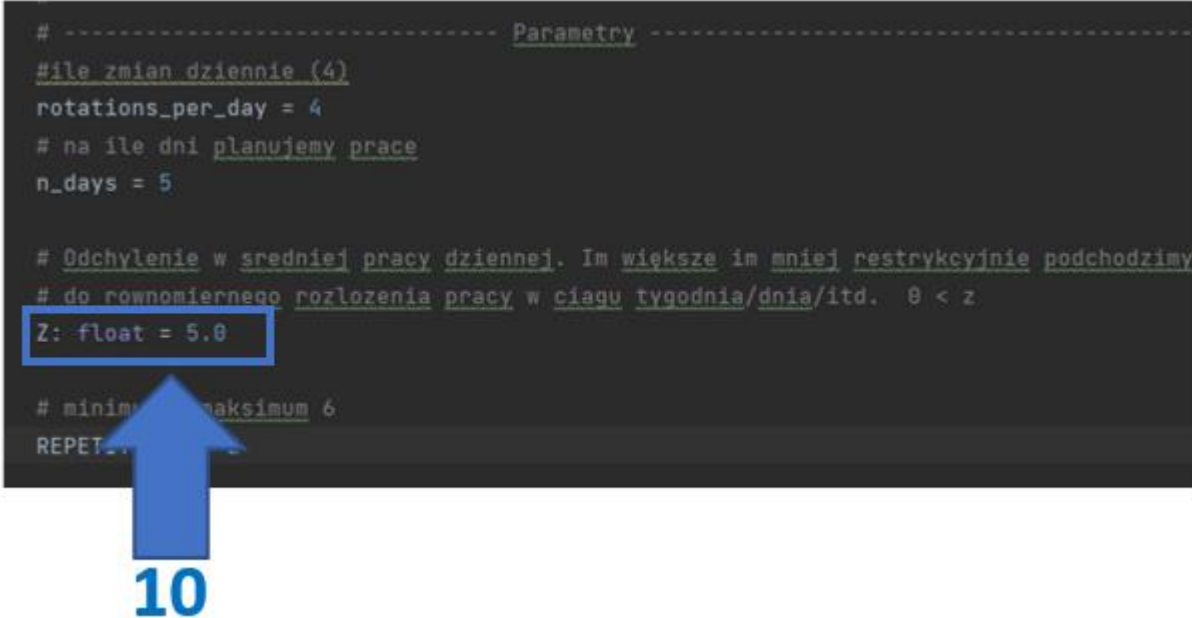
	Zmiana_nr_1	Zmiana_nr_2	Zmiana_nr_3	Zmiana_nr_4	Zmiana_nr_5	Zmiana_nr_6	Zmiana_nr_7	Zmiana_nr_8	Zmiana_nr_9	Zmiana_nr_10	Zmiana_nr_11	Zmiana_nr_12	Zmiana_nr_13	Zmiana_nr_14											
pracownik_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											
pracownik_1	95	46	30,5	20,5	57	95,5	30,5	35,5	35	64	95	20,5	46	30,5	46	57	35,5	30,5	35,5	57					
pracownik_2	12,5	20,5	57	95,5	30,5	12,5	46	30,5	35,5	64	30,5	64	30,5	46	30,5	35,5	46	57	20,5	20,5					
pracownik_3	64	95	30,5	20,5	57	95,5	30,5	35,5	35,5	12,5	64	30,5	64	30,5	46	30,5	12,5	12,5	64	12,5					
pracownik_4	57	35,5	20,5	57	95,5	30,5	12,5	46	30,5	35,5	12,5	64	30,5	64	30,5	46	30,5	64	35	35					
pracownik_5	23	30,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
pracownik_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
pracownik_7	20,5	57	18,5	95	12,5	46	48	95	64	43	12,5	35	12,5	48	57	46	30,5	18,5	35	35,5					
pracownik_8	48	12,5	46	12,5	35	64	23	30,5	12,5	35	48	35,5	57	35,5	48	35	57	48	30,5	46					
pracownik_9	30,5	64	12,5	18,5	64	35	57	18,5	57	18,5	57	18,5	43	57	30,5	20,5	12,5	57	20,5	23					
pracownik_10	35,5	18,5	23	43	23	48	46	43	23	20,5	23	48	18,5	46	43	18,5	23	20,5	43	18,5					
pracownik_11	43	23	43	46	48	43	18,5	20,5	48	46	18,5	23	20,5	23	18,5	43	48	23	48	64					
pracownik_12	46	43	48	23	18,5	23	43	64	46	48	43	18,5	48	43	35,5	23	18,5	35,5	23	43					
pracownik_13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
pracownik_14	18,5	48	64	48	43	18,5	20,5	48	43	23	64	43	23	18,5	23	64	43	64	18,5	48					
Średnia	33	39,6	27,4	40,1	35,6	28,6	38,6	29,0	32,9	38,4	32,9	38,6	40,9	39,9	32,8	43,9	45,4	37,8	28,3	31,5	26,3	45,8	37,4	30	43,4



Tabela 15. Rozkład punktów ryzyka ergonomicznego (EAWS). Źródło: opracowanie własne.

Do ograniczeń problemu wprowadzono zmienną odpowiadającą rozproszeniu średnich dziennych obciążeń pracą (punktami). Możemy zdefiniować maksymalną jej wartość. W praktyce proces polega na stopniowym zmniejszaniu rozproszenia, aż do uzyskania „dobrego” rezultatu.

Rysunek 20 przedstawia widok środowiska PyCharm Community. Numer 10 wskazuje na miejsce, w którym można zmieniać odchylenie standardowe dobowej łącznej liczby punktów ergonomii.

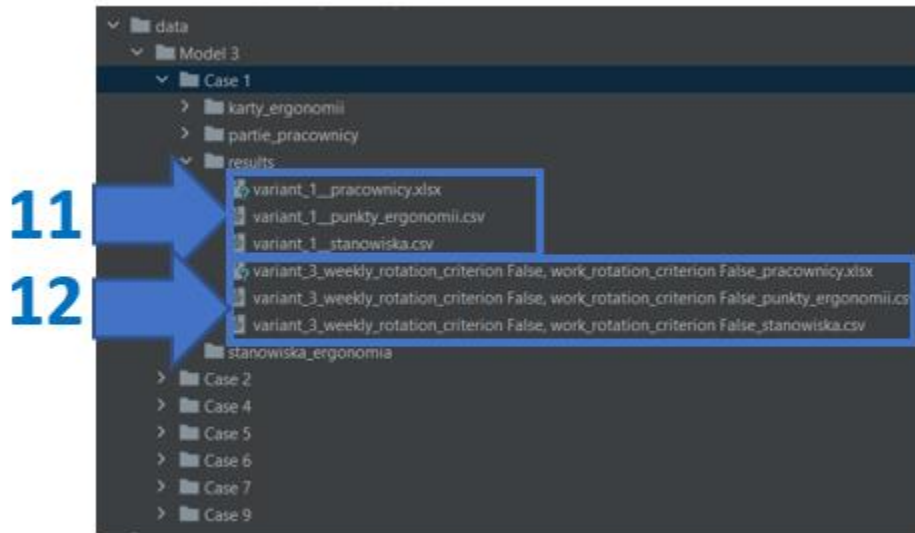


```
# ----- Parametry -----  
#ile zmian dziennie (4)  
rotations_per_day = 4  
# na ile dni planujemy prace  
n_days = 5  
  
# Odchylenie w sredniej pracy dziennej. Im większe im mniej restrykcyjnie podchodzimy  
# do rownomiernego rozlozenia pracy w ciągu tygodnia/dnia/itd. 0 < z  
Z: float = 5.0  
  
# minimum maksimum 6  
REPETITION = 6
```

Rysunek 20. Zmienna odpowiadająca rozproszeniu średnich dziennych obciążeń pracą. Źródło: opracowanie własne.

Scenariusz 2

W scenariuszu 2 zostały wprowadzone dodatkowe zmienne, które spowodowały, że model nie znalazł rozwiązania dla ergonomicznego balansowania i zaproponował wariant 3, który rezygnuje z restrykcji miękkich. Na Rysunku 21 przedstawiono obraz środowiska PyCharm Community. Numer 11 wskazuje na rozwiązanie wariantu 1. Numer 12 uwidacznia rozwiązanie wariantu 3 z pominięciem restrykcji: warunek zmiany stanowisk bezpośrednio po sobie.



Rysunek 21. Wariant 1 i wariant 2. Źródło: opracowanie własne.

W tabeli 16 przedstawiono wyniki proponowanej rotacji dla 1 dnia (4 zmiany) z pominięciem warunku zmiany stanowisk bezpośrednio po sobie.

Numer 13 wskazuje pracowników nr 2 i 11, którzy będą pracowali na tych samych stanowiskach zmiana po zmianie.

	Zmiana_nr_1	Zmiana_nr_2	Zmiana_nr_3	Zmiana_nr_4
pracownik_0	-1	-1	-1	-1
pracownik_1	5	5	10	8
pracownik_2	9	6	6	10
pracownik_3	6	8		9
pracownik_4	4	4		11
pracownik_5	2	10	7	5
pracownik_6	-1	-1	-1	-1
pracownik_7	3	7	11	
pracownik_8	7	9	0	
pracownik_9	8	11	1	6
pracownik_10	11	2	2	
pracownik_11	10	3	3	2
pracownik_12	1	0	9	0
pracownik_13	-1	-1	-1	-1
pracownik_14	0	1	8	3

Tabela 16. Rotacja pracowników w wariancie 3. Źródło: opracowanie własne.

3.7.3. Wnioski z badań

Jedną ze zidentyfikowanych luk badawczych podkreślanych w poniższej dysertacji jest brak obiektywnej, ilościowej metody oceny ergonomicznego balansowania linii montażowej, która służyłaby organizacjom jako uniwersalne narzędzie do planowania miejsca pracy w produkcji. Co więcej: dostępna literatura i dotychczas zbudowane metody oceny skupiają się na aspekcie utrzymania wysokiej produktywności, marginalizując lub zupełnie wyłączając z rozważań aspekt ergonomii. W związku z tym zaproponowano autorską metodę ergonomicznej rotacji pracowników, która wspiera model ergonomicznego balansowania i uwzględnia:

- podstawowe warunki pracy zgodnych z ustawami i normami BHP,
- wartości graniczne modułu EAWS oceny ryzyka ergonomicznego (postawa ciała, siły akcji, ręczna manipulacja ciężarów),
- subiektywna ocenę ergonomisty na temat obciążenia poszczególnych partii mięśni.

W celu otrzymania najlepszego zbalansowania obciążenia fizycznego i posturalnego pomiędzy pracownikami różnych stacji należy tak dobrać operacje do stacji, aby całościowe obciążenia poszczególnych stacji były zrównoważone. Zmiany takie powinny nie tylko zmniejszyć ryzyko występowania urazów związanych z pracą w nieergonomicznych warunkach, ale także pozytywnie wpłynąć na jakość i wydajność pracy.

Model wylicza sposób rotacji dla trzech wariantów.

Wariant 1 uwzględnia punkty ergo oraz obciążenia poszczególnych mięśni na stanowisku pracy.

Wariant 2 uwzględnia tak jak w wariacie 1 punkty ergo oraz obciążenia poszczególnych mięśni na stanowisku pracy oraz umiejętności i ograniczenia/niepełnosprawności pracowników.

Wariant 3: jeśli algorytm nie znajduje rozwiązania w wariacie 2, to zostają uruchomione alokacje, a więc rezygnacja z niektórych ograniczeń. Model wyznaczy sposób rotacji, ale przy założeniu, że będzie wyłączona pewna ilość zaplanowanych ograniczeń.

Rotacja stanowisk jest strategią organizacyjną coraz częściej stosowaną w systemach produkcyjnych, ponieważ przynosi korzyści zarówno pracownikom, jak i kierownictwu organizacji. Rotacja pracy zapobiega zaburzeniom układu mięśniowo-szkieletowego, eliminuje nudę, zwiększa satysfakcję z pracy i podnosi morale. W rezultacie przedsiębiorstwo zyskuje wykwalifikowaną i zmotywowaną siłę roboczą, co prowadzi do wzrostu produktywności, lojalności pracowników i spadku rotacji pracowników. Struktura algorytmu do ergonomicznej

rotacji stawia człowieka w punkcie centralnym i dopasowuje do jego możliwości oraz potrzeb treści pracy czy jej warunków.

Podsumowanie rozdziału trzeciego

W rozdziale 3 dysertacji przedstawiono siedem badań, które zrealizowano w celu stworzenia podstaw do zaprojektowania modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej.

- Zbadano możliwości redukcji rozrzutu czasu i stabilizacji procesów produkcyjnych.
- Zrealizowane badania ankietowe pozwoliły poznać opinie ekspertów dotyczące ważności czynników potrzebnych do określenia zbalansowania linii montażowej oraz ważności czynników podczas ustalania rotacji pracowników.
- Zbadano przydatność i akceptowalność egzoszkieleatów.
- Wywiady z ekspertami pozwoliły na opracowanie struktury algorytmu do planowania ergonomicznej rotacji pracowników.
- Przetestowano i potwierdzono skuteczność narzędzia do planowania ergonomicznej rotacji pracowników.

Konkludując: badania obserwacyjne pozwoliły na pogłębienie wiedzy autora z zakresu balansowania linii montażowej. W ramach badań ankietowych zweryfikowano wśród respondentów sposób interpretacji pojęcia ergonomicznego balansowania linii montażowej. Zbadano również ich podejście do ergonomicznej rotacji pracowników. Zrealizowane badanie ankietowe pozwoliło poznać opinie pracowników dotyczące pracy z egzoszkieleatami i umożliwiło zgłoszenie pomysłów optymalizacyjnych, które zostały przedstawione producentowi urządzenia. Wykorzystany algorytm do rotacji pracowników zapewnia najlepszą dostępną adekwatność pomiędzy pracownikami i kompetencjami potrzebnymi do wykonywania zadań.

W rozdziale trzecim zrealizowano zadania szczegółowe, odpowiadając jednocześnie na postawione wcześniej pytania badawcze. Powyższe aspekty pozwoliły autorowi na podjęcie dalszych rozważań, które umożliwiły powiązanie dotychczasowych efektów pracy z zaprojektowaniem modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej omówionego w rozdziale czwartym.

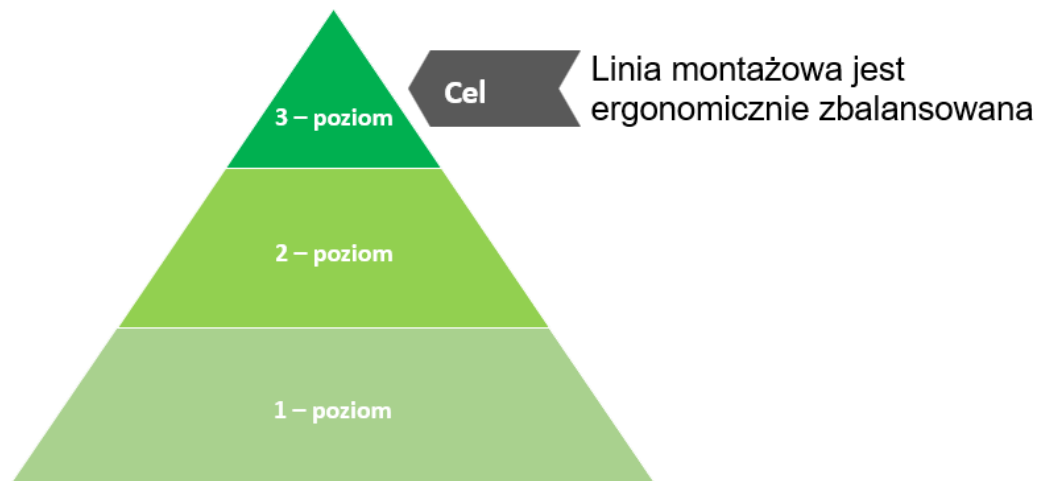
4. Model ergonomicznego balansowania linii montażowej

4.1. Założenia modelu

4.1.1. Ogólna koncepcja modelu

Głównym celem rozprawy jest opracowanie modelu ergonomicznego balansowania linii produkcyjnej przy uwzględnieniu obciążenia i uciążliwości pracy. Model został opracowany na podstawie przeglądu literatury na temat balansowania linii produkcyjnej, a także wyników obserwacji, wywiadów i ankiet przeprowadzonych wśród uczestników komórek ds. planowania procesów produkcyjnych, ergonomistów i fizjoterapeutów oraz pracowników produkcji (brygadzystów) odpowiedzialnych za planowanie rotacji pracowników na linii produkcyjnej.

Na Rysunku 22 została zaprezentowana propozycja modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej. Sekwencja potrzeb od najbardziej podstawowych do potrzeb wyższego poziomu to inspiracja modelem Abrahama Masłowa oraz modelami dojrzałości procesowej. Argumentem za powstaniem kolejnego modelu jest fakt, iż większość z dostępnych modeli dojrzałości procesowej bazuje głównie na ocenie dojrzałości procesów identyfikowanych w organizacjach. Niedocenione są obszary takie, jak ochrona pracowników przed nadmiernym obciążeniem i uciążliwością pracy, które mogą wpływać na poziom dojrzałości procesowej i warunkować sposób jej pomiaru.



Rysunek 22. Poziomy potrzeb w celu otrzymania i zachowania proergonomicznego zbalansowania linii montażowej. Źródło: opracowanie własne.

Modele dojrzałości pozwalają na całościowe spojrzenie na organizację i dokonanie kompleksowej oceny w aspekcie spełnienia kluczowych oczekiwań stawianych przez różnorodne wymogi (np. akty prawne, założenia koncepcji zarządzania czy wewnętrzne ustalenia firmy) oraz interesariuszy (pracownicy itp.)²³⁰. Właściwa organizacja pracy, w tym procesy planowania rotacji pracowników i dostrzeżenie problemów równoważenia obciążenia i uciążliwości pracą, stanowi fundament funkcjonowania przedsiębiorstw. Planowanie jest jedną z najbardziej istotnych funkcji zarządzania, zatem powinno być podstawowym narzędziem aktywnego sterowania procesami zachodzącymi w przedsiębiorstwie²³¹. Ważną rolę w modelu odgrywa również ergonomia i zwinność, która jest związana z szybkim reagowaniem na zmiany zachodzące w otoczeniu (pojawiające się niedyspozycje i niepełnosprawności wśród zatrudnionych pracowników na linii montażowej, zmiany programów produkcyjnych). Zwinność polega na szybkiej identyfikacji potrzeb pracowników, dokonaniu porządkowania zasobów wewnętrznych oraz wiedzy ekspertów po to, by osiągnąć długookresowe korzyści dla pracowników i organizacji. Celem nadrzędnym zarządzania bezpieczeństwem pracy jest stworzenie uwarunkowań minimalizujących występowanie niepożądanych zdarzeń związanych z wykonywaniem pracy i powodujących straty. W szczególności odnosi się to do tych sytuacji, w których u pracowników występują niekorzystne skutki zdrowotne w wyniku zagrożeń zawodowych. Ich przyczyną jest środowisko pracy lub sposób wykonywania pracy²³². Warunkiem wstępnym wysokiej jakości i wydajnej pracownika jest zapewnienie mu poczucia komfortu w środowisku pracy²³³.

Powyższe aspekty zostały uwzględnione w zaproponowanym modelu. Jego zastosowanie polega na realizacji trzech poziomów.

Poziom pierwszy podstawowy dotyczy ustabilizowania produkcji, oceny ryzyka ergonomicznego, opracowania ergonomicznej rotacji pracowników, kontroli spełnienia czynników

²³⁰ A. Kosieradzka, J. Smagowicz, *Analiza porównawcza modeli dojrzałości organizacji*, 2016, s. 283–296, http://konceptje.uek.krakow.pl/wp-content/uploads/2017/01/20_2016.pdf, 1.01.2017.

²³¹ A. Gola, *Podstawy przedsiębiorczości*, Politechnika Lubelska, Lublin 2021.

²³² B. Mrugalska, M. Sławińska, *Narzędzia makroergonomii w sterowaniu bezpieczeństwem procesów pracy*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Organizacja i Zarządzanie” 2014, (63), s. 131–139.

²³³ A. Górny, J. Sadłowska-Wrzesińska, *Aspekty ergonomiczne w zarządzaniu ryzykiem zawodowym. Bezpieczeństwo i higiena pracy*, SHO 2016, s. 102–104, https://scholar.google.pl/citations?view_op=view_citation&hl=pl&user=tnSpKgIAAAAJ&citation_for_view=tnSpKgIAAAAJ:7PzIFSSx8tAC, 2016.

fizycznych oraz sprawdzenia możliwości wspomagania pracownika środkami techniki. **Procesy są zidentyfikowane, opisane, mierzone, dokumentowane.**

Poziom drugi zaawansowany dotyczy analizy odchyleń i kontroli produktywności, w tym minimalizację marnotrawstw. Badana jest możliwość ponownego podziału czynności montażowych na niezbalansowanej ergonomicznie linii montażowej oraz ocena pomysłów PCU (**Proces Ciągłego Ulepszana**). To poziom zarządzany ilościowo, na którym **procesy są badane, planowane i monitorowane, ale nie zarządzane.**

Poziom trzeci – pełna dojrzałość procesów organizacji – dotyczy utrzymania wysokiej produktywności oraz proergonomicznego równoważenia linii montażowej. To poziom optymalny, na którym **procesy są monitorowane i zarządzane.** Czynnikiem wpływającymi na ciągłe zmiany zachodzące w procesach produkcyjnych są: zmiany konstrukcyjne pojazdu, zmiany programów produkcyjnych, stan zdrowia pracowników i rotacja pracowników z innych obszarów montażowych.

Na podstawie przeprowadzonego badania określono czynniki, które wpływają na zbalansowanie linii montażowej. Czynniki zostały uwzględnione w pierwszym poziomie uwzględniającym 4 etapy, które zostały opisane w punkcie 4.1.2. Na podstawie opracowanych kryteriów i ich ważności zaproponowano wzór na obliczenie wskaźnika oceny ergonomicznego balansowania linii. Wzór opisano w rozdziale 4.1.4. Ponieważ w modelu ważną rolę odgrywa rotacja miejsc pracy, opracowano autorskie narzędzie do projektowania ergonomicznej rotacji pracowników. Narzędzie opisano w rozdziale 3.7 i jest ważnym elementem modelu ergonomicznego balansowania.

Do oceny obciążenia pracą (w modelu) zostały zaproponowane:

– **obiektywna ocena:** korzystając z gotowej karty EAWS określana jest liczba punktów ergonomicznych. Inżynier ocenia stanowisko pracy według zasad metody EAWS.

– **badanie indywidualnych cech anatomicznych, fizjologicznych i biomechanicznych pracownika :** w tym celu został stworzony piktogram „Karta Pracownika”, gdzie lekarz medycyny pracy określa, czy dany pracownik ma schorzenia bądź niepełnosprawności, które uniemożliwiają mu pracę na wybranych stanowiskach. Następnie majster lub lider oznaczają stanowiska, które pracownik zna i potrafi samodzielnie na nich pracować.

– **subiektywna ocena ergonomiczna stanowiska pracy:** mimo istnienia dostępnych rozwiązań informatycznych, które pomagają gromadzić, porządkować, systematyzować i przetwarzać celowo informacje, nie można jeszcze zastąpić człowieka/eksperta, który dysponując pakietem fachowej wiedzy i doświadczeniem, mądrze kojarząc fakty zgodnie z polityką (interesem) przedsiębiorstwa²³⁴. Ergonomista określa subiektywnie, które partie mięśni lub stawy są szczególnie obciążone na danym stanowisku. Subiektywna ocena stanowiska pracy opiera się na nieobiektywnych kryteriach oceny stanowiska pracy. Dzięki temu ekspert potrafi umiejętnie określić występujące zagrożenia. Ocena stanowiska pracy i występujących na nim ich ryzyk zwykle odnosi się do niematerialnych cech występujących na tym stanowisku, ale i do cech pracownika. Opiera się na subiektywnych informacjach zwrotnych, w przeciwieństwie do obiektywnych, wymiernych informacji zwrotnych. Korzystanie z subiektywnych kryteriów oceny może zapewnić pracownikom lepsze warunki pracy i możliwości wykorzystania ich potencjału (w tym przypadku fizycznego), ale nadużywanie subiektywnych kryteriów wiąże się z pewnym ryzykiem. Po dokonaniu oceny zebrane informacje, w połączeniu z umiejętnościami rozumowania, będą służyć jako przewodnik po obiektywnej ocenie. Subiektywna ocena to pierwszy ważny krok w kierunku oceny ryzyka zawodowego.

Ocena ergonomii, zwana również oceną ryzyka ergonomicznego, jest niejako kolejnym etapem po ocenie subiektywnej i stanowi obiektywną miarę czynników ryzyka w środowisku pracy, które mogą prowadzić do zaburzeń układu mięśniowo-szkieletowego lub urazów wśród pracowników. Celem oceny ergonomii jest zidentyfikowanie czynników ryzyka i ich ilościowe określenie, aby możliwe było dokonanie wymiernych usprawnień w środowisku pracy. Dokładna ocena ergonomii jest podstawą do stworzenia bezpieczniejszego, zdrowszego i mniej podatnego na urazy miejsca pracy oraz poprawy ogólnego samopoczucia w miejscu pracy. Po przeprowadzeniu oceny ergonomicznej dział zdrowia, bhp lub HR może podjąć kroki poparte danymi w celu zmniejszenia liczby obrażeń i zwiększenia komfortu w miejscu pracy.

²³⁴ M. Wyrwicka, D. Jaźwińska, *Percepcja uwarunkowań rozwoju przedsiębiorstw*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, *Ekonomia i Zarządzanie*, Białystok 2014, 6.2, s. 259–275, file:///C:/Users/marek/Downloads/Percepcja_uwarunkowa%C5%84_rozwoju_przed.pdf, 19.02.2014.

4.1.2. Etapy postępowania w zastosowaniu modelu

Model zaproponowany przez autora obejmuje ważne kwestie z punktu widzenia ergonomicznego balansowania linii. Aby otrzymać i utrzymać ergonomiczne balansowanie linii montażowej, należy wykonać następujące czynności przypisane do odpowiednich poziomów i etapów:

- **Poziom 1, podstawowy** dotyczący planowania procesów produkcyjnych i równoważenia ergonomicznego linii montażowej. Są to czynności:

Etap 1

- określanie czasu pracy według metody MTM/REFA,
- przygotowanie dokumentacji produkcyjnej,
- badanie możliwości równomiernego obciążenia stanowisk pracy pod względem czasu,
- obliczenie zapotrzebowania na personel,
- przygotowanie celów produktywności (E1.1),
- określanie ograniczeń procesowych (E1.2).

W nawiasach znajdują się oznaczenia danych procesów, które wymagają ustalenia celów, określenia scenariuszy reagowania na sytuacje nieprzewidziane podczas realizacji planowania ergonomicznego balansowania linii montażowej. Wspomniane procesy powinny zostać omówione z członkami komórek ds. ergonomii, planistów oraz członków wyższego kierownictwa.

Etap 2

- określanie ryzyka ergonomicznego za pomocą EAWS,
- określanie ograniczeń ergonomicznych (E2.1),
- przygotowanie karty pracownika (E2.2),
- określanie obciążenia pracą wg. subiektywnej oceny ergonomistów (E2.3).

Etap 3

- dostosowywanie warunków pracy do możliwości psychofizycznych i anatomicznych,
- sprawdzanie możliwości rotacji pracowników:
 - z wykorzystaniem środowiska PyCham Community (E3.1),
 - z wykorzystaniem tabeli rotacji pracownika (E3.2).

Etap 4

- kontrola przestrzegania norm bhp,
- określanie kryteriów fizycznych,

- badanie zastosowania środków techniki do indywidualnego obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego (E4.1),
- dostosowanie wysokości pracy na liniach transportowych (E4.2).

Przykłady dla zastosowanych kroków:

Cele produktywności (E1.1):

- średnie obciążenie stanowiska pracy na linii montażowej na poziomie minimum 85% dostępnego czasu,
- średnie obciążenie stanowiska pracy na linii podmontażu na minimum 90% dostępnego czasu.

Ograniczenie procesowe (E1.2):

- równomierne wymieszanie wariantów: jeżeli wariant A ma wysoki nakład montażowy na stanowisku pracy, a wariant B ma niski nakład na tym samym stanowisku, to możliwe będzie osiągnięcie stabilnego wykorzystania stanowiska pracy poprzez równomierne wymieszanie wariantów oraz wprowadzenie odpowiedniej sekwencji aut na linie produkcyjne.

Ograniczenia ergonomiczne (E2.1):

- pracownik nie pracuje dwie zmiany po sobie na stanowisku krytycznym,
- każdy pracownik pracuje raz dziennie na stanowisku lekkim ze względu na obciążenie danej partii mięśni (ocena subiektywna).

Przygotowanie karty pracownika (E2.2): opisane w rozdziale 3.6.1, Rysunek 14.

Określanie obciążenia pracą (danego stanowiska) według subiektywnej oceny ergonomistów (E2.3): opisane w rozdziale 3.6.1, Rysunek 13.

Sprawdzanie możliwości rotacji pracowników:

- z wykorzystaniem środowiska PyCham Community (E3.1): badanie opisane w rozdziale 3.7,
- z wykorzystaniem tabeli rotacji pracownika (E3.2): rozdział 4.1.3, Tabela 17.

- **Poziom 2, zaawansowany** dotyczący eliminacji powstałych błędów przy planowaniu procesów produkcyjnych i przy równoważeniu ergonomicznym na poziomie 1.

Etap 5

- analiza odchyłeń, ocena pomysłów PCU,
- kontrola produktywności,
- kontrola dokumentacji produkcyjnej na miejscu pracy,

- minimalizacja marnotrawstw (7+2 rodzajów Muda),
 - badanie możliwości ponownego podziału czynności montażowych na niezbalansowanej ergonomicznie linii montażowej (E5.1).
- **Poziom 3, pełna dojrzałość procesów organizacji**, dotyczący ciągłego ulepszania procesów i proergonomicznego równoważenia linii montażowej. Poziom zawiera potrzebę ciągłego ulepszania, który należy przeprowadzać wraz z wchodzącymi zmianami konstrukcyjnymi produktu, zmianami programów produkcyjnych oraz śledzeniem aktualnego stanu zdrowia pracowników.

Aby osiągnąć główny cel muszą zostać zrealizowane następujące warunki:

- spełniony jest zakres pożądaný dla ergonomicznego kształtowania pracy,
- zapewniona jest tolerancja (jakość wykonania produktu),
- występuje wysoka efektywność wykorzystania czynników produkcji,
- zastosowano optymalną kolejność wykonywanych operacji,
- czas przestoju poszczególnych stacji jest minimalny,
- zapewnione jest wysokie bezpieczeństwo pracy.

Przykładem praktyk wykorzystywanych w modelu dojrzałości w obszarze zarządzania jest Cykl Deminga PDCA + SDCA²³⁵. Wielokrotnie powtarzana dobra praktyka staje się standardem. Wtedy możemy mówić o cyklu SDCA, którego pierwszy etap brzmi: „Standaryzuj”. Różnica między cyklami SDCA i PDCA jest więc następująca: cykl SDCA pozwala standaryzować procesy zachodzące w przedsiębiorstwie, a cykl PDCA pozwala je usprawniać i wprowadzać nowe. Cykl Deminga (PDCA) został zaproponowany jako narzędzie do wspierania poziomu 3. Jest on sposobem działania doskonalenia standardów i wdrażania zmian w poszczególnych procesach pracy. Jego nazwa stanowi akronim czterech anglojęzycznych terminów:

- P – zaplanuj (ang. *plan*),
- D – wykonaj (ang. *do*),
- C – sprawdź (ang. *check*),
- A – działaj (ang. *act*).

²³⁵ A. Kosieradzka, J. Smagowicz, *Model dojrzałości organizacji w obszarze publicznego zarządzania kryzysowego*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Organizacja i Zarządzanie” 2018, z. 128.

PDCA stanowi skuteczny punkt wyjścia do wdrożenia Lean Manufacturing w różnorodnych branżach. Warto zauważyć, iż PDCA – podobnie jak pozostałe metodologie typu Lean – ma na celu wzrost wydajności produkcji poprzez ulepszenie procesów. Zasadniczo cykl PDCA stanowi swoistą podwalinę pod ulepszenie każdego procesu w miejscu pracy. Zazwyczaj stanowi zespołowy wysiłek, jednak zastosowanie go może różnić się w zależności od poziomu danej jednostki w organizacji:

- lider → sprawdzanie standardowo stosowanych procedur pracy i ulepszanie ich,
- zespół → wprowadzanie zmian (*kaizen*),
- menedżer → sugerowanie ulepszeń (*gemba*).

Warto nadmienić, iż główną funkcją PDCA jest zidentyfikowanie marnotrawstwa, które powinno zostać wyeliminowane, a także uzyskanie efektów działań *kaizen*. Cykl ten, choć może być stosowany w dowolnym momencie. Znajduje w szczególności zastosowanie w sytuacji, gdy zidentyfikowano konkretny problem, lecz nie znaleziono jeszcze sposobu jego eliminacji. Do skutecznego wykorzystania omawianego cyklu niezbędne jest dokładne obserwowanie sytuacji bieżącej przez zaangażowane osoby. W efekcie możliwe staje się zidentyfikowanie problematycznych aspektów oraz elementów wymagających poprawy. Dzięki posiadaniu wszechstronnych informacji w tym zakresie cykl PDCA pozwala na uzyskanie zadowalających rezultatów.

Cztery fazy cyklu trwają w sposób ciągły, a zatem pozwalają na wyszukiwanie kolejnych rozwiązań, jakie mogą zostać wdrożone w przyszłości dla stałego doskonalenia się organizacji (*kaizen*). Cykl PDCA tworzy swoiste ramy, które pozwalają na przeprowadzenie bieżących zmian w przedsiębiorstwie.

W pierwszej kolejności kluczowe jest **planowanie**. Wówczas konieczne jest ocenienie aktualnego stanu i znalezienie poszczególnych ulepszeń. W sytuacji, gdy zidentyfikowany zostanie konkretny problem, należy go szczegółowo zbadać, a następnie opracować potencjalne rozwiązania i sposoby ich przeprowadzenia. Faza „plan” wymaga zebrania jak największej ilości informacji. Dopiero wtedy możliwe stanie się świadome podejmowanie kolejnych kroków.

Drugim etapem jest **wykonanie**. W tej fazie należy skupić się na próbowaniu poszczególnych rozwiązań i uświadamianiu zaangażowanych osób w konieczność wdrażania zmian. W efekcie możliwe jest uzyskanie jak najbardziej dokładnych rezultatów.

Trzecia faza polega na **sprawdzeniu** skuteczności poszczególnych zmian. Wówczas należy przeprowadzić dokładną analizę porównawczą wcześniejszego stanu ze stanem aktualnym.

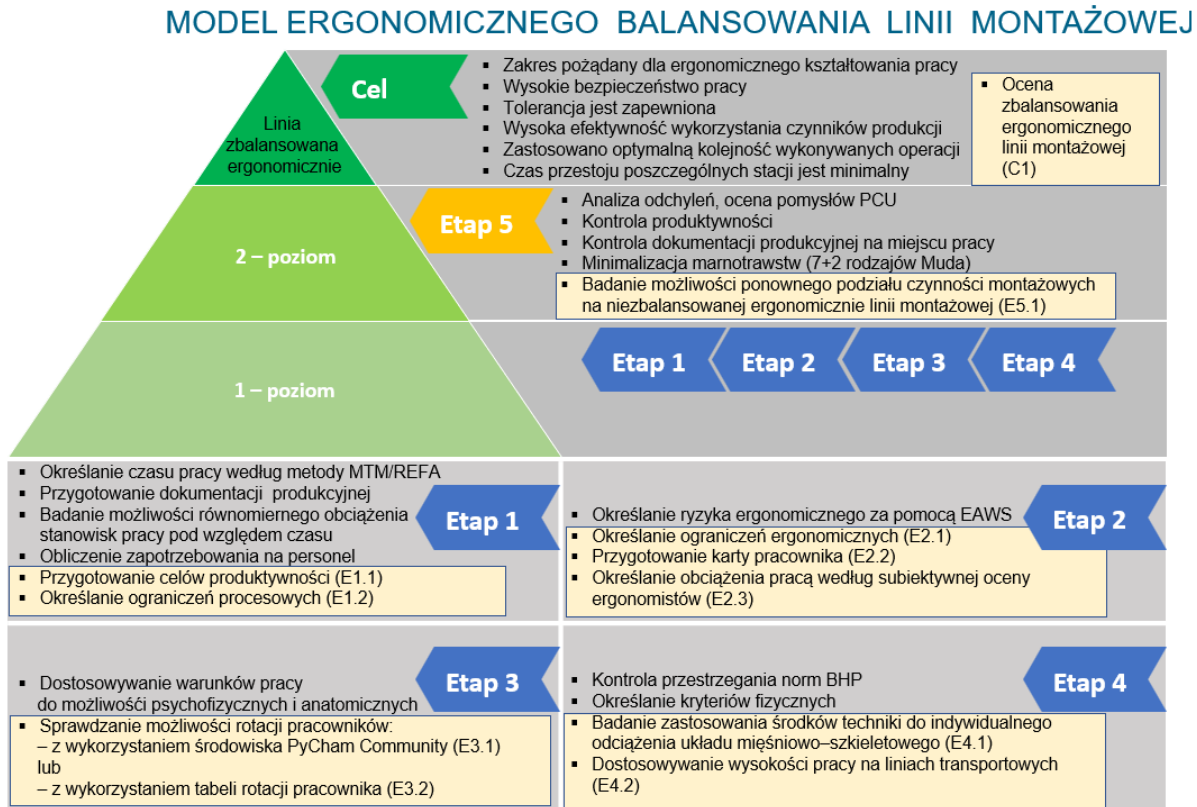
Kolejny etap to **działanie**. W tym momencie wprowadzane są ewentualne poprawki i cykl zatacza koło. W sytuacji, gdy wdrożone zmiany okazują się skuteczne, należy przy nich pozostać i traktować je w formie nowego standardu, który stanowi cenny punkt wyjścia dla działań cyklu PDCA w przyszłości.

Podsumowanie:

Najważniejszym zasobem prawie w każdej organizacji są ludzie wymieniani jako jeden z kilku podstawowych czynników rozwoju wewnętrznego przedsiębiorstwa²³⁶. Ważnym aspektem modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej jest zatem humanizacja pracy ze szczególnym uwzględnieniem ochrony pracownika przed nadmiernym obciążeniem i uciążliwością pracy. Rosnące zapotrzebowanie na bezpieczne i ergonomiczne warunki pracy, wzmacniane dodatkowo zmianami demograficznymi, również zmusza przedsiębiorstwa do wdrażania systemów pozwalających na zarządzanie skutkami pracy, jakim mogą być narastające dolegliwości zdrowotne (*Work-related Musculoskeletal Disorders* – WMSDs) oraz szeroko pojęte zmęczenie, które będzie rozumiane jako spadek zdolności do wykonywania pracy (ISO/TR 22100-3)²³⁷. Zarządzanie zmęczeniem i uciążliwością pracy ma szczególne znaczenie w przypadku prac montażowych z wyznaczonym taktem pracy, gdzie z uwagi na często powtarzające się czynności obciążane są te same partie mięśni, w związku z czym może dojść do powstawania chorób zawodowych. Aby osiągnąć zamierzony cel, jakim jest ergonomicznie zbalansowana linia montażowa, należy realizować zaproponowane etapy modelu, uwzględniające zasady i metody oceny ergonomicznej. Rysunek 23 przedstawia model zawierający wszystkie etapy ergonomicznego balansowania linii montażowej.

²³⁶ M. Wyrwicka, D. Jaźwińska, *Percepcja uwarunkowań rozwoju przedsiębiorstw*, „Economics and Management” 2014, 2, s. 259–275.

²³⁷ M. Butlewski, A. Misztal, *Kierunki zmian procesowych w systemie zarządzania zmęczeniem pracowników*, „Zeszyty Naukowe Małopolskiej Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Tarnowie” 2016, 3 (31), s. 72–75.



Rysunek 23. Model ergonomicznego balansowania linii montażowej. Źródło: opracowanie własne.

4.1.3. Karty kontrolne do planowania rotacji pracowników

Bardzo ważnym aspektem jest zaangażowanie fizjoterapeutów i ergonomistów w subiektywną ocenę obciążenia biomechanicznego każdego stanowiska. Przy planowaniu rotacji istotne jest, aby odległości między miejscami pracy, które mają być zamienione, były jak najmniejsze, dlatego rotacje zaplanowane są tylko w ramach jednego zespołu. Długich dystansów nie da się pokonać w krótkim czasie. W przypadku występowania takich stanowisk należy uwzględnić czas na pokonanie odpowiedniej odległości. Jeśli weźmie się pod uwagę wyniki wcześniej przeprowadzonych badań i wskazówki dotyczące projektowania rotacji stanowisk, można zapewnić utrzymanie dobrostanu pracowników do późnej starości. Tabela 17 zawiera propozycję kontrolowania obciążenia poszczególnych partii mięśni i części ciała podczas rotacji w jednym zespole roboczym. Tabele można wykorzystać w ramach wizualizacji procesów na *shopfloor management*.

Stanowisko		8 8 8 8				8 8 8 8				8 8 8 8						
Zmiana		L	1	2	3	4	L	1	2	3	4	L	1	2	3	4
1.	głowa/szyja															
2.	prawy staw barkowy															
3.	lewy staw barkowy															
4.	prawe ramię															
5.	skłon boczny															
6.	plecy															
7.	lewe ramię															
8.	prawy staw łokciowy															
9.	lewy staw łokciowy															
10.	prawy nadgarstek															
11.	lewy nadgarstek															
12.	prawy kciuk															
13.	prawy palec wskazujący															
14.	obrót skrętny															
15.	lewy palec wskazujący															
16.	lewy kciuk															
17.	prawe kolano															
18.	lewe kolano															
19.	prawa stopa															
20.	lewa stopa															
Pracownik		0				1				2						

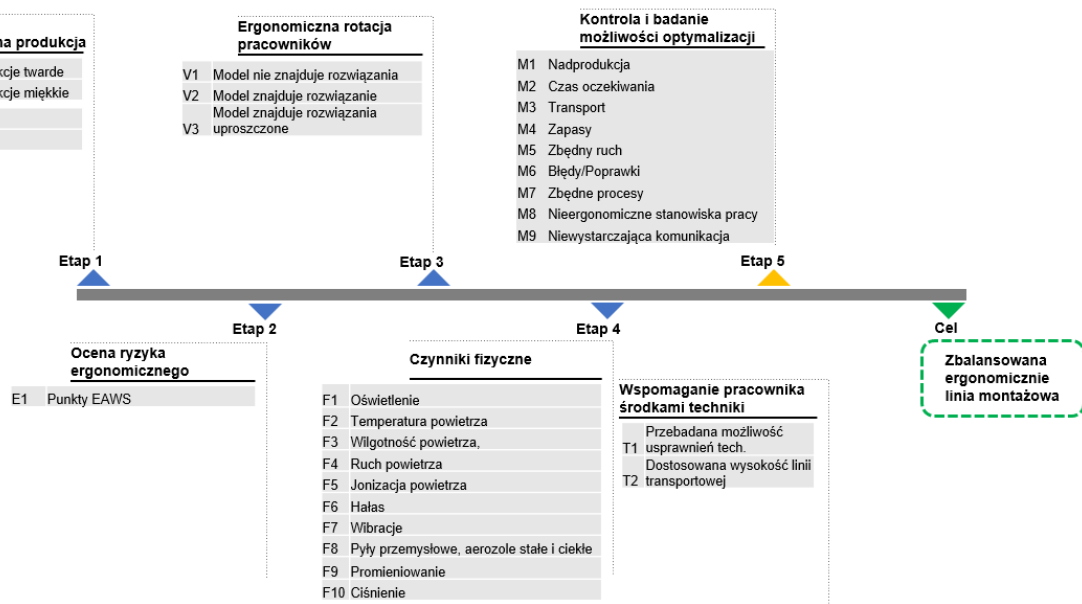
Tabela 17. Karta do kontroli obciążenia poszczególnych partii mięśni. Źródło: opracowanie własne.

W Tabeli 17 po lewej stronie znajduje się pierwsza kolumna ze wszystkimi obszarami ciała, które są kontrolowane w ramach rotacji. Są to pola od „1 – głowa i szyja” do „20 – lewa stopa”. Dla każdego pracownika przydzielona jest jedna kolumna. Kolumnę „L” wypełnia lekarz medycyny pracy. Kolejne cztery kolumny 1–4 oznaczają kolejne stanowiska pracy w danym dniu dla tego pracownika. W kolumnach (1–4) wpisywana jest wartość obciążenia oceniona subiektywnie przez ergonomistę zakładowego (wartości od 1 do 3).

4.1.4. Wskaźnik kompleksowej oceny ergonomiczności

Dodatkowym aspektem w zastosowaniu modelu ergonomicznego balansowania jest możliwość dokonania przez przedsiębiorstwo samooceny w zakresie poziomu zbalansowania linii produkcyjnej. Aby dokonać samooceny, zostały wyłonione kryteria (w opisanym badaniu w podrozdziale 3.3), które spełnią wymogi: są skorelowane z celami firmy, spójne ze sobą, precyzyjnie zdefiniowane w ujęciu wartościowym i jakościowym, żeby ich monitoring i analiza były precyzyjne i jednoznaczne.

Kryteria zostały zidentyfikowane na podstawie przeglądu literatury, wywiadów z ekspertami oraz przeprowadzonych analiz. Przeprowadzając ankiety wśród osób odpowiedzialnych za planowanie procesów produkcyjnych badano ważność czynników w pięciostopniowej skali. Na Rysunku 24 przedstawiono kryteria przyporządkowane do danego etapu modelu, które uznano za ważne i bardzo ważne.



Rysunek 24. Kryteria do oceny zbalansowania linii produkcyjnej. Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że wszystkie wymienione powyżej kryteria są bardzo ważne. Jedynie kryterium R2 dotyczące przestrzegania restrykcji miękkich uznano za ważne. W kolejnym kroku przeprowadzono wywiady z ekspertami w celu omówienia wyników ankiety i ustalenia gradacji punktów. Poszczególne kryteria mają różną wagę i dlatego

przyporządkowano im różne punkty oceny. W tym celu zostały zaproponowane następujące punkty gradacji, które pokazuje Tabela 18:

Gradacja punktów			
Priorytet	S	C	N
b. ważny	4	1	-1
ważny	3	1	0

Legenda:
 S - spełniony
 C - częściowo spełniony
 N - niespełniony

Tabela 18. Gradacja punktów i priorytety. Źródło: opracowanie własne.

Poniżej przedstawiono propozycję dla oceny kryteriów:

Przykład 1: dla bardzo ważnego kryterium:

D1 – średnie obciążenie pracą.

Jeżeli dane stanowisko osiągnęło wyznaczony cel, to kryterium otrzymuje maksymalną liczbę punktów = 4.

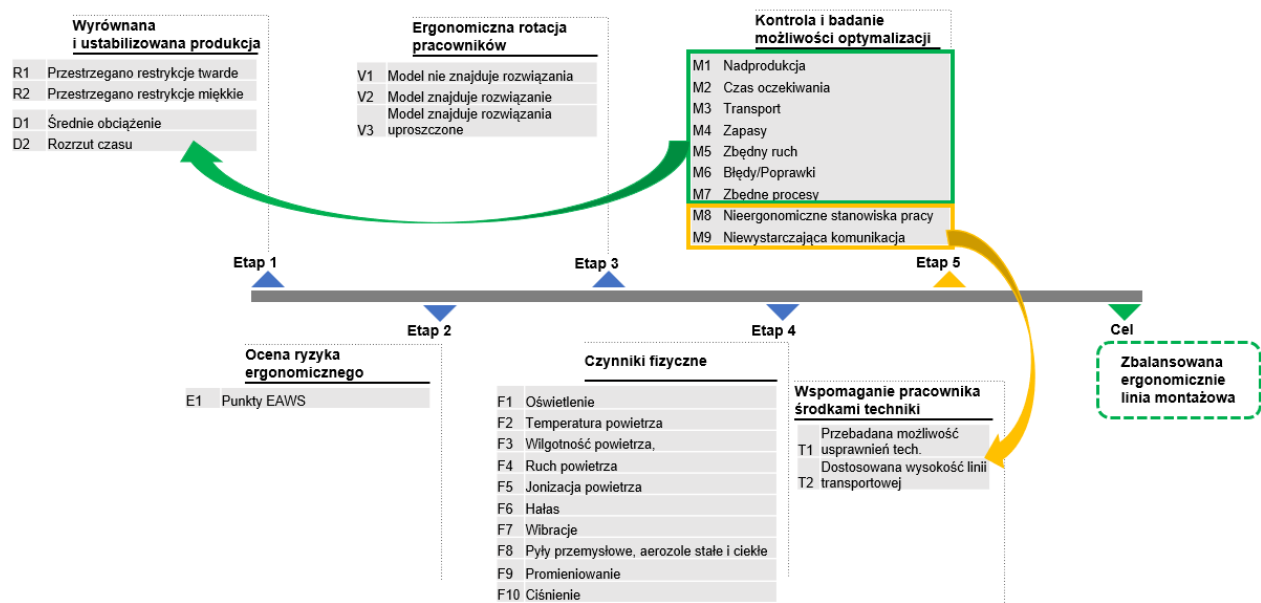
Przykład 2: dla ważnego kryterium:

R2 – miękkie ograniczenie (mięka restrykcja). Ograniczenia te nie są obowiązkowe, ale prowadziłyby do lepszego, bardziej optymalnego zrównoważenia. Jeżeli dane stanowisko osiągnęło wyznaczony cel, to kryterium otrzymuje maksymalną liczbę punktów = 3.

Piąty etap w modelu ergonomicznego balansowania dotyczył analizy i kontroli poprzednich czterech etapów. Jednym z punktów jest minimalizacja marnotrawstwa, które uznano za bardzo ważne kryteria z punktu widzenia samego balansowania linii. W każdym procesie zasoby albo dodają wartość, albo jej nie dodają. *Muda* odnosi się do każdego działania, które nie przynosi wartości. Ohano sklasyfikował *muda* w *gemba* w następujących siedmiu kategoriach²³⁸: *muda* nadprodukcji, zapasów, napraw/braków, ruchu, przetwarzania, oczekiwania i transportu. Na podstawie przeprowadzonych badań i wywiadów uznano, że wszystkie wymienione powyżej kryteria są już uwzględnione w etapie pierwszym, gdzie zadaniem jest uzyskanie wysokiej produktywności i ustabilizowanej produkcji. Autor przyjął stanowisko, że dwa ostatnie kryteria powinny być uwzględnione osobno ze względu na ich potencjał i bardzo duże znaczenie dla proergonomicznego balansowania linii montażowej. Na Rysunku 25 pokazano podział kryteriów

²³⁸ M. Imai, *Gemba Kaizen*, 2006, s. 115.

związanych z marnotrawstwem i przyporządkowanie do grupy kryteriów z pierwszego i czwartego etapu.



Rysunek 25. Kryteria do ergonomicznego balansowania linii. Podział kryteriów dotyczących marnotrawstwa. Źródło: opracowanie własne.

Ostatnie dwa wspomniane kryteria z grupy marnotrawstw to **nieergonomiczne stanowiska pracy** i **niewystarczająca komunikacja**. Brak ergonomiczności w zakresie stanowisk pracy może powodować wśród pracowników negatywne konsekwencje zdrowotne. Za nieergonomiczne stanowiska pracy uznaje się takie miejsca, które wymagają między innymi częstego schylenia się lub częstego sięgania wysoko.

Ważnym aspektem wymienianym przez ekspertów od spraw balansowania linii był temat dostosowywania wysokości karoserii auta na liniach transportowych. W związku z tym powstało kryterium **T2**: dostosowywanie wysokości linii transportowych, które ma za zadanie sprawdzanie każdorazowo na takiej wysokości linii transportowej do zaplanowanych czynności i pracujących tam operatorów. Jest to bardzo ważne kryterium ze względu na ergonomiczne balansowanie linii, natomiast osiągnięcie celu wymaga dużo mniejszej inwestycji czasu i opracowania środków zaradczych, dlatego opracowano osobną skalę do oceniania tego kryterium (Tabela 19):

Gradacja punktów		
Priorytet	S	N
b. ważny	1	0

Tabela 19. Gradacja punktów i priorytety dla T1 i T2. Źródło: opracowanie własne.

Brak wystarczającej komunikacji lub niewykorzystane pomysły to ostatnie z kryterium wymieniane wśród marnotrawstw. Sprawna komunikacja, w tym wspieranie pomysłów pracowników, przyczynia się do efektywnego wykorzystania posiadanych zasobów i sprzyja efektywnemu funkcjonowaniu przedsiębiorstwa. Innowacyjność wiąże się z posiadanymi zasobami (ludzkie, rzeczowe, kapitałowe, informacyjne), ale także umiejętnością ich wykorzystania, czyli dojrzałością innowacyjną²³⁹. Innowacyjne technologie w coraz większym stopniu decydują o przewadze konkurencyjnej przedsiębiorstw. Stanowią również podstawę nowoczesnych procesów wytwórczych umożliwiających spełnienie potrzeb społeczeństwa²⁴⁰.

Innowacje technologiczne w produkcji pojazdów użytkowych mogą być realizowane w wielu obszarach. Założenie o ergonomicznej i bezpiecznej pracy powinno być spełnione przez przedsiębiorstwo, ponieważ na nim spoczywa obowiązek dbania o swoich pracowników. Egzoszkielety można uznać za innowacyjne ergonomiczne pomoce w celu zmniejszenia fizycznego obciążenia pracowników na liniach montażowych.

Ciągle zmieniające się warunki otoczenia przedsiębiorstw przemysłowych nakładają na nie konieczność ciągłego poszukiwania rozwiązań umożliwiających elastyczną i wysokowydajną produkcję przy jednoznacznym zapewnieniu minimalnych kosztów wytwarzania. Z drugiej strony ciągle pojawiają się nowe rozwiązania technologiczne umożliwiające produkcję zgodną z wyżej wymienionymi założeniami. Zjawiskiem mającym niewątpliwie kluczowy wpływ na rozwój systemów wytwarzania było pojawienie się robotów przemysłowych, które w znaczący sposób zmieniły podejście do zagadnień organizacji i sterowania produkcją w systemach wytwórczych²⁴¹.

Jednym z badań prowadzonych w ramach tej dysertacji było sprawdzenie wykorzystania możliwości zastosowania egzoszkieletów podczas ergonomicznego balansowania linii. Również

²³⁹ S. Lachiewicz, T. Łuczka, E. Stawasz, *Znaczenie i obszary badań nad innowacyjnością i konkurencyjnością małych i średnich przedsiębiorstw w Polsce*, „Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie” 2010, 46 (1091), s. 5–16.

²⁴⁰ K. Halicka, *Prospektywna analiza technologii-metodologia i procedury badawcze*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2016.

²⁴¹ Ł. Sobaszek, A. Gola, A. Świć, *Kierunki rozwoju robotyki w aspekcie projektowania współczesnych systemów produkcyjnych*, „Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji” 2017, 1, s. 460–471.

zastosowanie ortez (specjalne rękawice ułatwiające montaż, np. zaślepek) lub robotów współpracujących z człowiekiem może w znacznym stopniu odciążyć pracownika lub przejąć jego zadania. W związku z tym drugim bardzo ważnym czynnikiem jest kryterium **T1**, które dotyczy badania możliwości usprawnień technicznych i obejmuje innowacyjne technologie. Dla modelu ergonomicznego balansowania linii autor proponuje, aby każdorazowo sprawdzić, czy jest możliwość wyposażenia danego stanowiska lub operatora na nim pracującego w innowacyjne środki takie jak egzoszkielety dopasowane dla danego pracownika lub roboty HCR. Dla tego kryterium przyjęto również gradacje punktów w skali od 1 do 0.

Ponieważ poziom zbalansowania linii w oparciu o zaproponowane kryteria może być teraz oszacowany za pomocą opracowanego arkusza oceny (Tabela 20), należy ocenić wszystkie punkty według zaproponowanej wyżej skali.

		stanowiska pracy															Max P	Linia P		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	.	.	.			n	
kryteria	V																	4	0,0	
	R1																	4	0,0	
	R2																	3	0,0	
	D1																	4	0,0	
	D2																	4	0,0	
	E1																	4	0,0	
	F																	4	0,0	
	T1																	1	0,0	
	T2																	1	0,0	
																		Σ	0	25

maksymalna liczba punktów	100
uzyskana liczba punktów	0,00

Tabela 20. Arkusz do oceny zbalansowania linii montażowej. Źródło: opracowanie własne.

Maksymalnie zbalansowana linia montażowa może osiągnąć wartość 100 punktów. Punkty wskazują, jak bardzo lub w jakim stopniu została osiągnięta równowaga. Oznacza to, że dobry projekt wariantu prowadzi do wysokiej wartości liczby kluczowej, natomiast słaby projekt wyraża się w niskiej liczbie kluczowej. Na podstawie poniższego wzoru zastała przedstawiona teoretyczna procedura obliczania wskaźnika oceny ergonomicznego zbalansowania linii montażowej:

$$P_{erg} = \begin{cases} V_1 \sum_{i=1}^n (P_{R1_i} + P_{R2_i} + P_{D1_i} + P_{D2_i} + P_{E1_i} + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{Fm} + P_{T1_i} + P_{T2_i}) & \text{gdy brak rozwiązania} \\ V_2 \sum_{i=1}^n (P_{R1_i} + P_{R2_i} + P_{D1_i} + P_{D2_i} + P_{E1_i} + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{Fm} + P_{T1_i} + P_{T2_i}) & \text{istnieje rozwiązanie} \\ V_3 \sum_{i=1}^n (P_{R1_i} + P_{R2_i} + P_{D1_i} + P_{D2_i} + P_{E1_i} + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_{Fm} + P_{T1_i} + P_{T2_i}) & \text{rozwiązanie niekompletne} \end{cases}$$

Legenda:

(4.1.1)

P_{erg} – wskaźnik zbalansowania linii montażowej,

P – liczba punktów przyjęta dla konkretnego kryterium.

Ponieważ w modelu główną rolę odgrywa rotacja miejsc pracy, kryterium V umieszczone zostało przed nawiasem wzoru i pomnożone przez pozostałe kryteria. Kryteria V odpowiadają za rotację stanowisk pracy:

V_1 – algorytm rotacji podstawowej (bez ograniczeń pracowników) lub nie znajduje żadnego rozwiązania,

V_2 – algorytm znajduje rozwiązanie optymalne,

V_3 – algorytm znajduje uproszczone (zrelaksowane) rozwiązanie problemu,

n – liczba stanowisk pracy,

m – liczba czynników fizycznych.

Pozostałymi ocenianymi kryteriami uwzględnionymi we wzorze są:

$R1$ – ograniczenia produkcyjne twarde,

$R2$ – ograniczenia produkcyjne miękkie,

F – czynniki fizyczne (hałas, oświetlenie),

$D1$ – średnie obciążenie stanowiska pracy,

$D2$ – rozrzut czasu pracy na stanowisku,

$E1$ – punkty ryzyka ergonomicznego (EAWS),

$T1$ – przebadana możliwość usprawnień technicznych,

$T2$ – wysokość linii transportowej dostosowana do pracownika.

W Tabeli 21 przedstawiono zakresy zbalansowania linii wraz z uwagami i działaniami korygującymi. Linia zbalansowana ergonomicznie to taka, gdzie zaproponowane kryteria są

spełnione i istnieje możliwość planowania równomiernego obciążenia i odciążenia mięśni podczas rotacji pracowników pomiędzy stacjami roboczymi. Zakres zbalansowania powinien być omawiany każdorazowo z osobami odpowiedzialnymi za bezpieczeństwo pracy pracowników.

Interpretacja	Zakres	Uwagi	Działania kształtujące
Linia zbalansowana ergonomicznie	Niekrytyczny	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zakres pożądany dla ergonomicznego kształtowania pracy. ▪ Tolerancja jest zapewniona. ▪ Wysoka efektywność wykorzystania czynników produkcji. ▪ Zastosowano optymalną kolejność wykonywanych operacji w taki sposób, aby praca na stanowiskach była porównywalna. ▪ Czas przestoju poszczególnych maszyn jest minimalny. ▪ Wysokie bezpieczeństwo pracy. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Działania kształtujące nie są konieczne. ▪ Pełna wydajność pracy całego systemu produkcyjnego.
	Potencjalnie krytyczny	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wykonalność jest zapewniona. ▪ Konieczność sprawdzenia tolerancji w zależności od częstości i warunków wykonywania pracy. ▪ Średnia efektywność wykorzystania czynników produkcji. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Należy wypróbować działania kształtujące. ▪ Konieczna optymalizacja procesów produkcyjnych lub/i job rotation.
Linia niezbalansowana ergonomicznie	Krytyczny	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tego zakresu należy unikać. ▪ Nie wolno przekraczać wartości granicznych. ▪ Wykonalność nie jest zapewniona. ▪ Niska efektywność wykorzystania czynników produkcji ▪ Brak bezpieczeństwa pracy. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Działania kształtujące są konieczne. ▪ Należy dokonać analizy pracy. ▪ Mapowanie obszarów wszystkich zadań roboczych i skoncentrowanie wysiłków na rzecz szybkiego przeprojektowania krytycznych stanowisk pracy.

Tabela 21. Zakresy zbalansowania linii montażowej. Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie przedstawionych w tabeli danych należy wskazać, że zbalansowana ergonomicznie linia nie wykazuje zakresów krytycznych. W obszarze bezkrytycznym, który nie wymaga wprowadzania działań naprawczych i korygujących, wyszczególniono kilka kluczowych spostrzeżeń.

- Po pierwsze zakres ten jest pożądany dla ergonomicznego kształtowania pracy i zapewnia wysoką tolerancję.
- Po drugie czynniki produkcji są istotnie wysoko efektywne dla całego procesu.
- Zastosowano optymalną kolejność wykonywanych operacji w taki sposób, aby praca na stanowiskach była porównywalna.
- Kolejny element to minimalizacja czasu przestojów i wysokie bezpieczeństwo pracy.

W obszarze potencjalnie krytycznym, w którym zastosowanie znajdują działania korygujące, wyszczególniono następujące elementy:

- Wykonalność jest zapewniona.
- Konieczność sprawdzenia tolerancji w zależności od częstości i warunków wykonywania pracy.
- Średnia efektywność wykorzystania czynników produkcji.

W odniesieniu do linii niezbalansowanej ergonomicznie wyszczególniono jedynie zakres krytyczny, który wymaga podejmowania działań kształtujących i naprawczych. Poza tym wymagane jest dokonanie analizy pracy, a także mapowanie obszarów wszystkich zadań roboczych i skoncentrowanie wysiłków na rzecz szybkiego przeprojektowania krytycznych stanowisk pracy. Wskazano także na te elementy, które są zaburzone w przypadku niezbalansowanej linii:

- Przekraczanie wartości granicznych.
- Wykonalność nie jest zapewniona.
- Niska efektywność wykorzystania czynników produkcji
- Brak bezpieczeństwa pracy.

4.1.5. Badanie możliwości ponownego podziału czynności montażowych na niezbalansowanej ergonomicznie linii montażowej

Na wydajność i produktywność pracowników wpływa wiele czynników związanych z jednej strony z całym procesem planowaniem czynności montażowych, a z drugiej z ich samopoczuciem. Potrzeba wysokiego tempa produkcji nie może wpływać na zaniedbania w zakresie ochrony pracowników. Najczęstsze zaburzenia mięśniowo-szkieletowe są związane są z powtarzalnymi i monotonnymi zadaniami wynikającymi z czynności manualnych wymagających ruchów ramion i dłoni, takich jak zginanie, prostowanie, chwytanie, trzymanie, skręcanie, zaciskanie i sięganie. Rotacja pracowników pomiędzy stanowiskami pracy jest jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod łagodzenia zmęczenia fizycznego i zmniejszania stresu związanego z pracą. Jednak często strategie rotacji pracy zawodzą z powodu braku systematycznego podejścia. W niniejszej dysertacji zaproponowano narzędzie do minimalizacji ryzyka narażenia pracowników wykonujących powtarzalne czynności na liniach montażowych poprzez równoważenie i śledzenie obciążenia poszczególnych partii mięśni. Algorytm zbiera ograniczenia do spełnienia ergonomicznego balansowania linii i precyzyjnie odpowiada na pytanie, czy istniejące ograniczenia mogą być spełnione. W przypadku, gdy nie znajduje on rozwiązania, podaje rozwiązanie uproszczonego (zrelaksowanego) problemu. Aby otrzymać ergonomicznie zbalansowaną linię montażową zaproponowany model uwzględnia badanie **możliwości ponownego podziału czynności montażowych na niezbalansowanej ergonomicznie linii montażowej**. W celu osiągnięcia zamierzonego celu należy sprawdzić jakie czynności można przesunąć między stacjami lub pogrupować je, ze względu na obciążenia. Narzędziem, jakim jest wykres Yamazumi, skutecznie usprawnia proces ponownego podziału czynności. Yamazumi to skumulowany wykres słupkowy pokazujący równowagę obciążeń czasowych pomiędzy wieloma operatorami. Pojedyncze pole w słupku pokazuje jedną czynność, która jest zwymiarowana (np. za pomocą metody MTM UAS) w stosunku do pochłanianego czasu. W tym przypadku w analizowanych wykresach skupia się na ryzyku ergonomicznym i jego akceptowalności, a nie tylko na wartości dodanej i chronologii procesu montażowego.

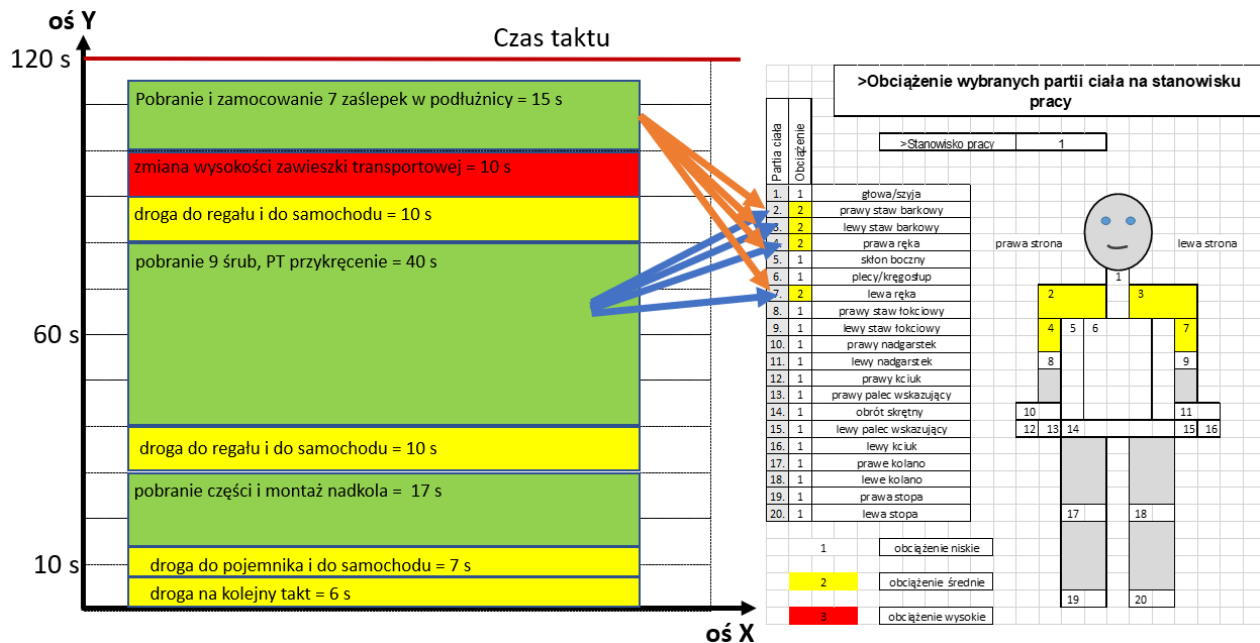
Średni czas trwania każdego zadania jest rejestrowany i wyświetlany na wykresie słupkowym. Każde zadanie procesu jest ułożone w stos, aby reprezentować cały krok procesu.

Osie wykresu Yamazumi są następujące:

- oś y reprezentuje czas cyklu,

- oś x reprezentuje każdy etap procesu.

Wykres Yamazumi może być używany zarówno do eliminacji czynności procesowych, jak i do śledzenia obciążenia poszczególnych części ciała. Etapy procesu można zmienić, aby zoptymalizować i zrównoważyć docelowy proces. Na Rysunku 26 zostało pokazane wykorzystanie omawianego narzędzia dla wybranego stanowiska pracy.



Rysunek 26. Zastosowanie wykresu Yamazumi do wizualizacji obciążenia poszczególnych partii mięśni na danym stanowisku pracy. Źródło: opracowanie własne.

4.2. Weryfikacja modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej

4.2.1. Założenia przebiegu procesu weryfikacji

W pierwszym etapie walidacji poddano narzędzie do planowania rotacji pracowników, które uwzględniało obciążenie poszczególnych mięśni na danym stanowisku pracy.

Autor wspierając się środowiskiem PyCharm Community Edition 2021.3.2, przeniósł model koncepcyjny do narzędzia, tworząc model skomputeryzowany przy użyciu języka programowania Python. Model programowania liniowego (LP) został utworzony z wykorzystaniem biblioteki narzędziowej OR-Tools. Walidacja modelu obejmowała przede wszystkim zaprojektowanie wariantów i scenariuszy jego wykorzystania w praktyce. Zastosowany model walidacyjny umożliwił ocenę przydatności modelu w praktyce dzięki wykorzystaniu modelowania w programie Python. Za pomocą tego narzędzia zostają zaproponowane najlepsze możliwe rotacje uwzględniające wszystkie trzy wyceny ergonomii (EAWS, Karta Pracownika, Karta Stanowiska Pracy). Podana rotacja uwzględnia tygodniowy przydział poszczególnych stanowisk pracy, zakładając, że każdy z pracowników zmienia w ciągu dnia 4 razy swoje stanowisko pracy.

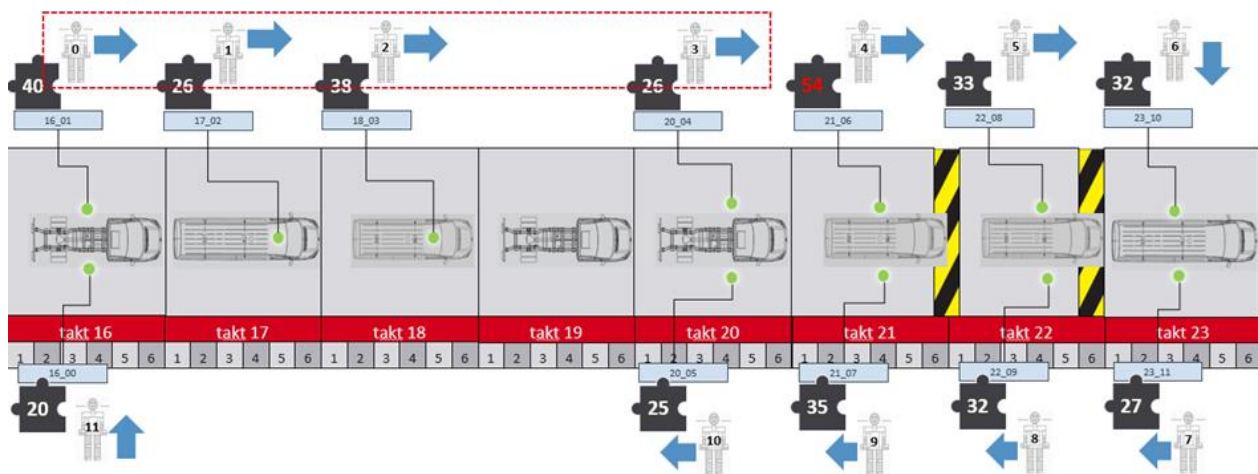
W drugim etapie poddano walidację samego modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej. Badania empiryczne wykazały, że opracowany wzór nadaje się do obliczania wskaźnika zbalansowania i dzięki temu można porównywać wyniki przed i po zastosowaniu opisanego modelu ergonomicznego balansowania. Główne korzyści wynikające z zastosowania modelu to możliwość oceny ryzyka na istniejący już liniach. Ale można badać ryzyko również na projektowanych liniach, ponieważ opisane kryteria można oszacować na podstawie danych wejściowych. Przeprowadzono kilka eksperymentów w celu sprawdzenia możliwości modelu. Eksperymenty odnoszą się do systemu produkcyjnego składającego się z jednej linii montażowej, gdzie znajdują się trzy brygady. W rozdziale 4.2.2 opisano scenariusz 2.

4.2.2. Symulacja drugiego scenariusza ergonomicznej rotacji pracowników

W celu przeprowadzenia badania nad ergonomicznym balansowaniem linii i sprawdzenia zaproponowanego modelu autor stworzył symulację linii montażowej składającej się z 3 brygad i 23 taktów. Czas trwania czynności została wyceniona według metody MTM UAS, a do oceny

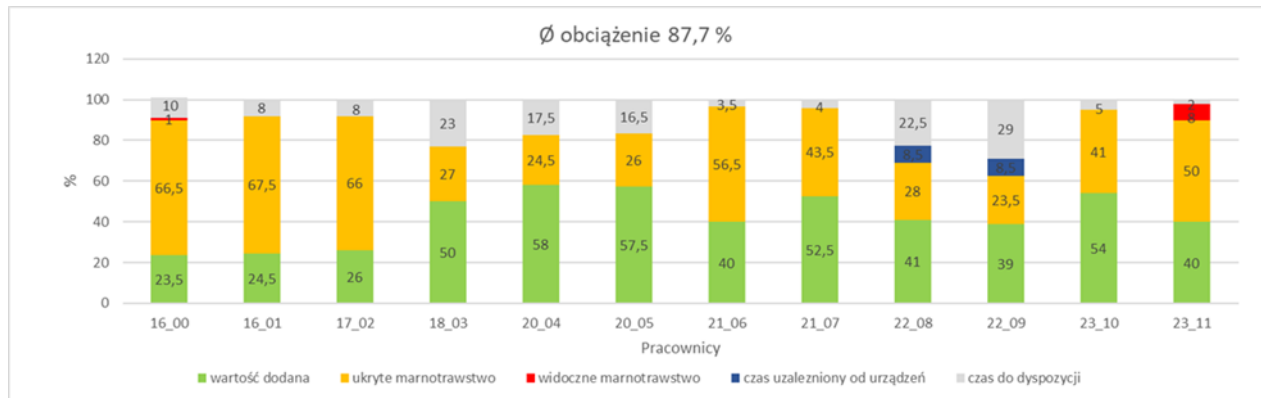
ergonomii została zastosowana metoda EAWS. Ryzyko ergonomiczne zostało określone na podstawie metody MTM EAWS oraz subiektywnej oceny przez eksperta fizjoterapeutę. Na Rysunku 27 przedstawiono layout jednej z brygad montażowych z opisem stanowisk i ilością punktów ergo (punkty ergo znajdują się w czarnych „puzzlach”). W brygadzie jest 8 taktów roboczych (od taktu 16 do 23) oraz zaplanowanych 12 stanowisk roboczych. Rysunek 28 przedstawia rotacje dla pracownika „0”, który, tak jak pozostali pracownicy, rotuje kolejno na następne stanowisko.

Dane wejściowe: Na linii montażowej montowany jest jeden model samochodu, ale w wielu wariantach zabudowy. Czas taktu wynosi 2 minuty, pracownicy rotują kolejno na stanowisko, zmieniając je co 2 godziny.



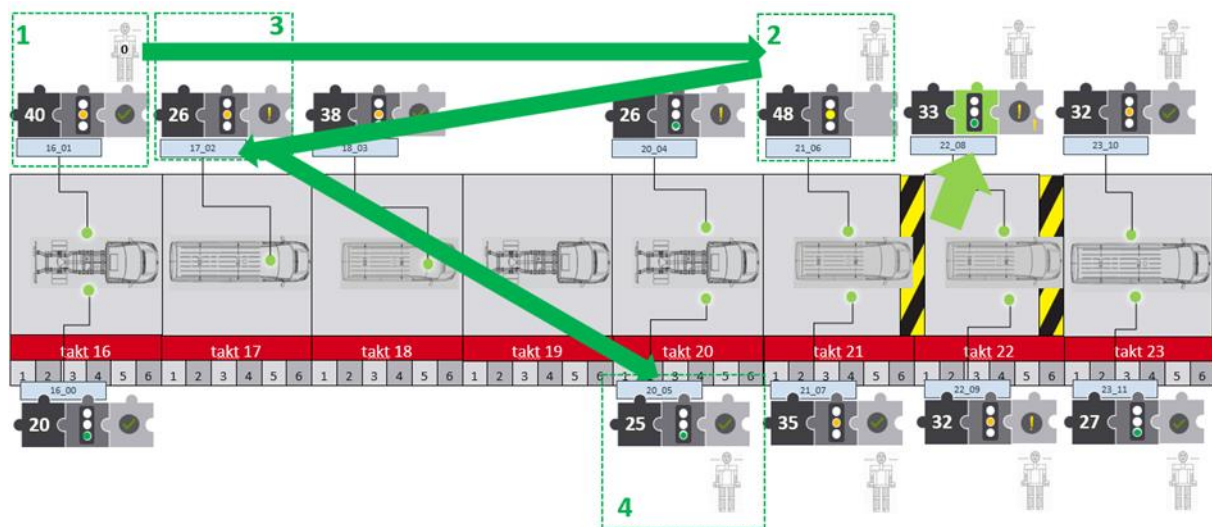
Rysunek 27. Rotacja pracowników przed zastosowaniem algorytmu dla ergonomicznej rotacji, scenariusz 2. Źródło: opracowanie własne

Na Wykresie 33 przedstawiono obciążenia dla poszczególnych stanowisk pracy z uwzględnieniem podziału czynności na wartość dodaną, ukryte marnotrawstwa, czasu uzależnionego od urządzeń oraz niewykorzystanego czasu na danym stanowisku. Wartości zostały uśrednione dla danego stanowiska pracy (każdy wariant ma inne obciążenie czasowe na danym stanowisku pracy). Średnie obciążenie pracą dla całego zespołu wynosi 87,7 % i według założonych celów znajduje się na dobrym poziomie (nie jest wymagana redukcja stanowisk pracy a jedynie równoważenie ergonomiczne).



Wykres 33. Wykres obciążenia pracą za pomocą MTM oraz ocena ryzyka ergonomicznego za pomocą EAWS. Źródło: opracowanie własne.

Przy użyciu narzędzia do ergonomicznego planowania rotacji pracy został zaproponowany nowy schemat rotacji dla każdego pracownika. Nowy plan uwzględnia wszystkie ograniczenia zdrowotne i zaplanowane ograniczenia ergonomiczne. Na Rysunku 28 pokazano rotację dla pracownika „0”. Pracownik powinien pracować kolejno na stanowisku 0, 2, 6 i 5.



Rysunek 28. Rotacja dla wybranego pracownika z uwzględnieniem propozycji ergonomicznej rotacji, scenariusz 2. Źródło: opracowanie własne.

W Tabeli 22 przedstawiono rotację pracowników dla jednego tygodnia roboczego wraz z podziałem punktów ergonomicznego ryzyka dla konkretnego pracownika na dany dzień roboczy. Średnia punktów ergonomicznego ryzyka dla całego tygodnia pracy dla pracownika 0 wynosi 40,28 punktów.

	Zmiana_nr_1	Zmiana_nr_2	Zmiana_nr_3	Zmiana_nr_4	Zmiana_nr_5	Zmiana_nr_6	Zmiana_nr_7	Zmiana_nr_8	Zmiana_nr_9	Zmiana_nr_10	Zmiana_nr_11	Zmiana_nr_12	Zmiana_nr_13	Zmiana_nr_14	Zmiana_nr_15	Zmiana_nr_16	Zmiana_nr_17	Zmiana_nr_18	Zmiana_nr_19	Zmiana_nr_20	ergonom_d1	ergonom_d2	ergonom_d3	ergonom_d4	ergonom_d5	40,38
Pracownik 0	40	54	26,5	24	20	26,5	38	54	24	38	26,5	24	54	24	40	26,5	20	24	26,5	38	36,125	34,625	28,125	36,125	27,125	
Pracownik 1	38	24	38	32,5	35,5	38	54	20	54	40	40	24	20	38	54	40	38	40	20	32,5	33,125	36,875	35,5	38	32,625	
Pracownik 2	54	27	32,5	32,5	32,5	20	24	32,5	33,5	32,5	20	24	27	33,5	32,5	20	24	27	33,5	20	36,75	27,25	29,625	30,375	25,875	
Pracownik 3	32,5	33,5	20	32,5	32,5	33,5	40	26,5	20	33,5	32,5	33,5	26,5	20	26,5	32,5	32,5	26,5	26,5	33,5	29,625	33,125	29,875	26,375	29,75	
Pracownik 4	26,5	32,5	27	40	26,5	32,5	33,5	24	26,5	20	33,5	26,5	32,5	27	32,5	27	26,5	33,5	27	33,5	31,5	29,125	26,625	31,375	30,125	
Pracownik 5	33,5	26,5	32,5	26,5	38	35,5	26,5	32,5	32,5	26,5	24	33,5	24	26,5	33,5	24	33,5	32,5	24	32,5	29,75	33,125	37,125	31,375	30,625	
Pracownik 6	32,5	40	24	38	24	27	24	24	32,5	24	27	24	24	27	24	24	34	35,5	38	24	33,625	24,75	29,125	24,75	30,375	
Pracownik 7	24	32,5	33,5	54	33,5	54	32,5	33,5	35,5	27	35,5	32,5	35,5	32,5	24	32,5	32,5	32,5	32,5	54	36	36,375	32,625	31,375	37,875	
Pracownik 8	24	38	24	35,5	54	24	35,5	38	27	54	24	54	24	24	35,5	54	35,5	24	54	35,5	30,375	37,875	39,75	34,375	37,25	
Pracownik 9	27	35,5	40	20	27	40	32,5	35,5	40	35,5	27	32,5	27	40	20	35,5	27	20	35,5	40	30,625	33,75	33,75	30,625	30,625	
Pracownik 10	20	24	35,5	27	40	24	27	40	38	24	38	24	38	24	38	32,5	38	24	27	26,625	32,75	31,75	31,75	35,25	35,75	
Pracownik 11	35,5	20	54	24	24	32,5	20	27	24	32,5	40	38	32,5	54	27	38	40	54	40	24	33,375	25,875	33,625	37,875	39,5	

Tabela 22. Rotacja pracowników i podział punktów ryzyka ergonomicznego. Źródło: opracowanie własne.

W Tabeli 23 przedstawiono rotację pracowników z podziałem na obciążenie poszczególnych partii mięśni z wykorzystaniem karty kontrolnej.

Stanowisko	Zmiana			
	L	I	II	III
1. głowa/ szyja	1	1	1	1
2. prawy staw barkowy	2	1	5	1
3. lewy staw barkowy	2	1	5	1
4. prawe ramię	1	5	1	2
5. skłob boczny	1	1	1	2
6. plecy	1	2	1	1
7. lewe ramię	1	5	1	2
8. prawy staw łokciowy	1	1	1	1
9. lewy staw łokciowy	1	1	1	1
10. prawy nadgarstek	1	1	1	1
11. lewy nadgarstek	1	1	1	1
12. prawy kciuk	1	1	1	1
13. lewy kciuk	1	1	1	1
14. obrót skrętny	1	1	1	1
15. prawy palec wskaźujący	1	1	1	1
16. lewy palec wskaźujący	1	1	1	1
17. prawe kolano	1	1	1	1
18. lewe kolano	1	1	1	1
19. prawa stopa	1	1	1	1
20. lewa stopa	1	1	1	1

Pracownik	0				1				2				3				4				5				6				7				8				9				10				11			
	L	I	II	III	L	I	II	III	L	I	II	III	L	I	II	III	L	I	II	III	L	I	II	III	L	I	II	III	L	I	II	III	L	I	II	III	L	I	II	III	L	I	II	III				
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
60	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
70	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
80	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
90	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabela 23. Karta kontrolna rotacji pracy z podziałem obciążenia poszczególnych partii mięśni. Źródło: opracowanie własne.

4.2.3. Weryfikacja z zastosowaniem wszystkich kroków modelu

Celem weryfikacji jest potwierdzenie przydatności zaprojektowanego modelu, czyli jego analiza pod kątem spójności i poprawności działania. Weryfikacja modelu pozwala zatem sprawdzić, czy wyniki otrzymanych prac badawczych mogą być później wykorzystane w praktycznym zastosowaniu w przedsiębiorstwie produkcyjnym.

Po przeprowadzonej analizie scenariusza 2 przedstawiono uzyskane wyniki przed i po zastosowaniu modelu ergonomicznego balansowania linii. Wyniki przedstawione są w Tabeli 24 i 25. W celu przeprowadzenia badania porównawczego nie można było określić dokładnie wyniku kryterium „v” dla punktacji z balansowania linii przed zastosowaniem modelu, ponieważ kryterium i jego funkcje zostały opracowane w ramach tej dysertacji. W ramach porównania tych kryteriów dla opisanego przypadku wystawiono ocenę 3, która odpowiada za częściowe przestrzeganie ograniczeń dla ergonomicznej rotacji pracowników. Wszystkie pozostałe kryteria można było oszacować na podstawie danych wejściowych.

		stanowiska pracy														Max P	Linia P		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	.	.			.	n
kryteria	V	3														4	3		
	R1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4				12	4	4,0
	R2	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3				12	3	2,7
	D1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4				12	4	3,8
	D2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4				12	4	4,0
	E1	4	1	1	1	4	4	-1	1	1	1	1	1	1			12	4	1,6
	F	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4				12	4	4,0
	T1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				12	1	1,0
	T2	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1				12	1	0,8
												Σ	8	25	21,8				
											maksymalna liczba punktów		100						
											uzyskana liczba punktów		65,4						

Tabela 24. Wynik punktacji z balansowania linii przed zastosowaniem modelu. Źródło: opracowanie własne.

W ramach zaplanowanych etapów ergonomicznego balansowania linii udało się poprawić postawę pracownika na stanowisku 6, co zmniejszyło ilość punktów EAWS, dzięki czemu

stanowisko nie jest oceniane jako krytyczne tylko potencjalnie krytyczne (żółty kolor). Na stanowisku 8 i 9 wdrożono egzoszkielety, które odciążają mięśnie podczas czynności związanych z przykręcaniem nadkoli.

		stanowiska pracy														Max P	Linia P		
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	.	.			.	n
kryteria	V	4														4	4		
	R1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4				12	4	4,0
	R2	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3				12	3	2,7
	D1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4				12	4	3,8
	D2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4				12	4	4,0
	E1	4	1	1	1	4	4	1	1	1	1	1	1				12	4	1,8
	F	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4				12	4	4,0
	T1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				12	1	1,0
	T2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				12	1	1,0
	Σ																8	25	22,2
																maksymalna liczba punktów		100	
																uzyskana liczba punktów		88,8	

Tabela 25. Wynik punktacji z balansowania linii po zastosowaniu modelu. Źródło: opracowanie własne.

Wskaźnik oceny ergonomicznego balansowania linii poprawił się o 23,4 %.

Wzór na obliczanie wskaźnika zbalansowania ergonomicznego linii montażowej zapewnia kompromis pomiędzy celami ekonomicznymi i ergonomicznymi, ponieważ w widoczny sposób można obliczyć wskaźnik poprawy zbalansowania linii, inwestując również w pomysły związane z ochroną pracownika przed nadmiernym obciążeniem i uciążliwością pracy. Do tej pory było bardzo ciężko udowodnić stopień ważności takiej inwestycji (zakup egzoszkieleatów).

Podsumowanie rozdziału czwartego

W rozdziale 4 prezentowanej dysertacji przedstawiono założenia opracowanego modelu dotyczącego ergonomicznego balansowania linii montażowej w produkcji pojazdów użytkowych. Najważniejsze aspekty przedstawione w tym rozdziale można podsumować w następujących punktach:

1. Zaproponowany model pozwala na minimalizację ryzyka narażenia pracowników wykonujących powtarzalne czynności manualne dla założonego celu produkcyjnego poprzez zrównoważenie obciążenia i uciążliwości pracą w akceptowalnych granicach. Zastosowanie modelu wymaga przeprowadzenia oceny poszczególnych kryteriów według zaproponowanej skali. Każda linia montażowa posiada wiele specyficznych dla niej problemów związanych z równoważeniem czynności i obciążenia pracą. W związku z tym ustandaryzowana ocena wszystkich kryteriów ujawnia wielką użyteczność modelu i pomaga w podejmowaniu decyzji dla menadżerów i inżynierów oraz pozwala porównywać stopień ergonomicznego zbalansowania pomiędzy wszystkimi liniami montażowymi.

2. Model uwzględnia kroki przeprowadzania poszczególnych etapów, które są zawarte w założeniach znanych metodyk balansowania linii montażowej. Zostały one jednak uzupełnione o aspekty ergonomiczne poprzez zaproponowanie narzędzia, takie jak: karta do oceny subiektywnej, czy algorytm rotacji pracowników.

3. Linia montażowa jest kompletnie zbalansowana, gdy na stacjach nie występują przestoje oraz obciążenia zostały rozłożone w sposób równomierny.

4. Aby zweryfikować skuteczność modelu, autor sprawdzał potencjalne scenariusze symulacyjne, które opierają się na kombinacji różnych możliwych zdarzeń na linii produkcyjnej.

Podsumowanie

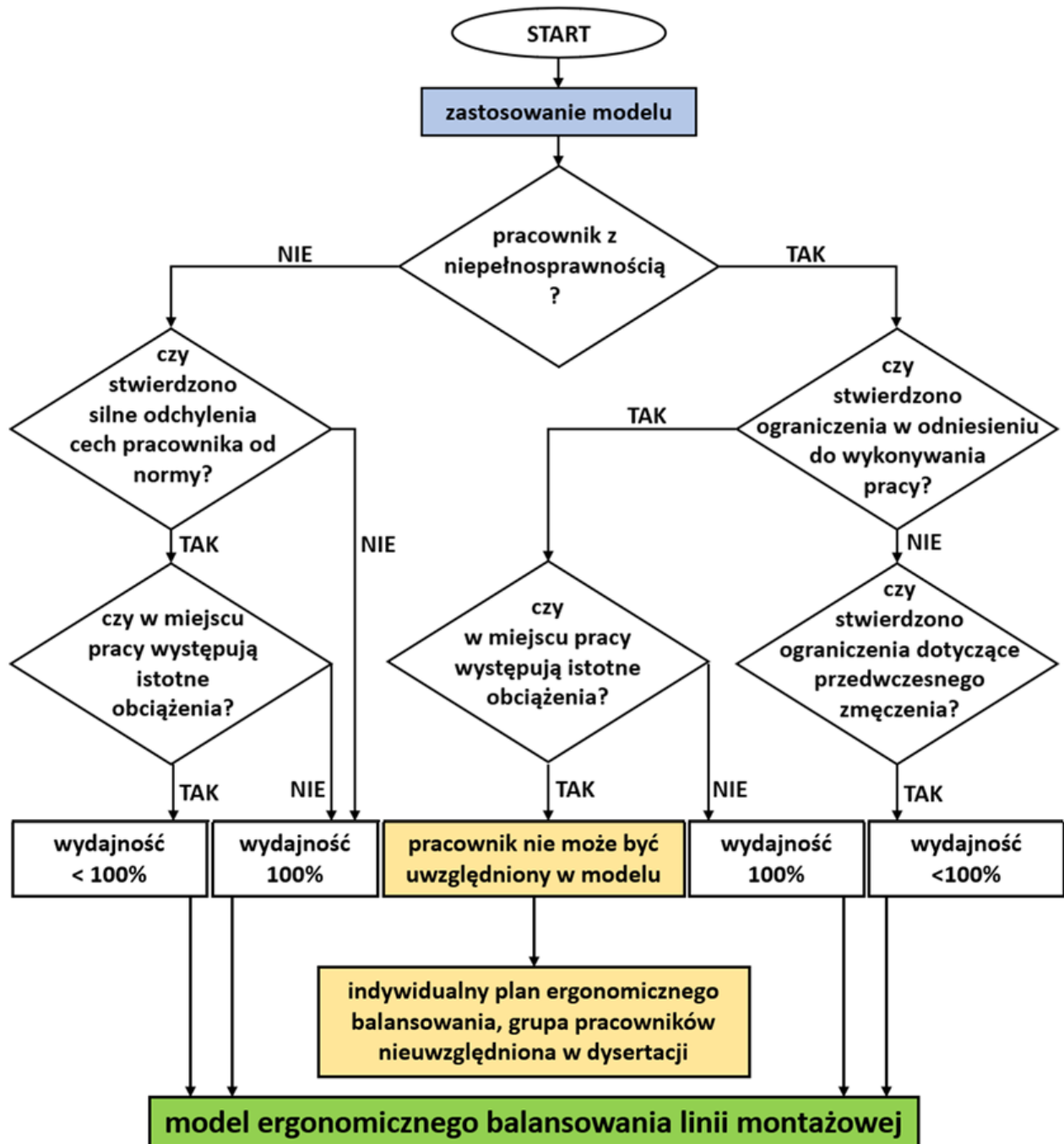
Zastosowanie i ograniczenia modelu

Opracowany model umożliwia użytkownikom wydajne ergonomiczne balansowanie linii w krótkim czasie obliczeniowym i dostarcza wyniki w postaci szczegółowych raportów równoważenia linii. Model ergonomicznego balansowania może być zastosowany w wielu przypadkach oraz w innych branżach niż motoryzacyjna. Opracowanie modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej pozwala m.in. na:

- mapowanie obszarów wszystkich zadań roboczych i skoncentrowanie wysiłków na rzecz szybkiego przeprojektowania krytycznych stanowisk pracy,
- śledzenie zgodności z przepisami prawa i zapewnienie sprzyjających ergonomicznych warunków pracy,
- zarządzanie dokumentacją dotyczącą oceny warunków pracy,
- możliwość stosowania modelu w dowolnej firmie zajmującej się produkcją pojazdów użytkowych,
- określenie ergonomicznych mierników efektywności wdrożeń w przedsiębiorstwach w kontekście równoważenia proergonomicznego linii produkcyjnych,
- identyfikacje elementów (bądź etapów) wdrożeń, które mają wpływ na kształtowanie metody proergonomicznego równoważenia linii produkcyjnej,
- śledzenie zmian w postrzeganiu stanu bezpieczeństwa i higieny pracy przez pracowników przed i po wdrożeniach,
- sprawdzenie, w jakim stopniu możliwe jest wspomaganie przedsiębiorstw w realizacji wdrożeń w kontekście inwestycyjnym (jak i w co inwestować, aby wdrożenia proergonomiczne przyczyniały się do podniesienia poziomu kultury bezpieczeństwa w przedsiębiorstwie).

Dzięki integracji modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej można skutecznie włączać pracowników z niepełnosprawnościami do zespołów roboczych i prowadzić proergonomiczną rotację wewnątrz linii montażowej. Na Rysunku 29 przedstawiono ograniczenia wobec osób z poważnymi niepełnosprawnościami, których stan zdrowia i przydzielenie do konkretnego miejsca pracy wymaga konsultacji z ergonomistą i pracownikiem działu zdrowia. Jeżeli u pracownika stwierdzono niepełnosprawności i są one przeszkodą, aby zapewnić rotację z uwzględnieniem obciążenia na poszczególne części ciała oraz jeśli na danej linii występują

istotne obciążenia (np. wymagane przenoszenie części powyżej 3 kg, użycie siły powyżej 40 N), to model dla takich pracowników nie będzie spełniał swojego założenia i należy zastanowić się nad innym rozwiązaniem, które pozwoli pracownikowi w bezpieczny sposób wykonywać powierzone obowiązki.



Rysunek 29. Zastosowanie modelu. Źródło: opracowanie własne.

Dokładna analiza stanowisk pracy w połączeniu z modelem ergonomicznego balansowania linii umożliwi integrację osób z niepełnosprawnościami i zapewni im bezpieczną pracę na liniach montażowych w warunkach, które będą uwzględniać indywidualne ograniczenia i chronić przed uciążliwością pracy.

Koncepcje integracji grupy pracowników z poważnymi ograniczeniami zdrowotnymi

W przypadku osób z niepełnosprawnościami szczególnego znaczenia nabierają kwestie związane z dostępnością miejsc i obiektów, w których osoby te podejmują różnego typu aktywności. Zagrożenia istniejące w środowisku architektonicznym, środowisku pracy, w każdej innej aktywności przekładają się na zwiększone zainteresowanie zagadnieniami przystosowania warunków życia i pracy do tej grupy podmiotów. Jest to wynik zarówno zwiększającej się systematycznie aktywności i samoświadomości tych osób, jak i konsekwencje szeroko zakrojonych, nowo wprowadzanych unormowań w zakresie równości traktowania i niedyskryminowania osób z niepełnosprawnością w pracy i w każdym innym obszarze aktywności²⁴².

Osoby z niepełnosprawnościami w wielu przypadkach chcą podjąć zatrudnienie i w związku ze swoimi ograniczeniami stanowią bardzo zróżnicowanego odbiorcę działań ergonomicznych w miejscu pracy. Wśród najczęściej klasyfikowanych grup niepełnosprawności znajdują się:

- niewidomi i słabowidzący,
- osoby o obniżonej sprawności umysłowej,
- niesłyszący i niedosłyszący,
- osoby z dysfunkcją narządu ruchu,
- przewlekle chorzy,
- osoby społecznie niedostosowane,
- niepełnosprawni ze względu na wiek.

Analizując środowisko pracy w kontekście integracji pracowników z niepełnosprawnościami, należy wskazać, że pracownicy niepełnosprawni mają ograniczenie sprawności stwierdzone przez lekarza medycyny pracy. Niezdolność może być częściowa lub

²⁴² por. A. Jasiak, D. Swereda, *Ergonomia osób niepełnosprawnych*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009.

całkowita (nieprzydatność do pracy lub wykonywania określonych zadań/funkcji). Istnieje wiele rozwiązań integrujących niepełnosprawność w przedsiębiorstwach. Jednakże osoby niepełnosprawne z kilku powodów mają utrudniony dostęp do zatrudnienia.

- Osoby te mają czasem mniejsze kwalifikacje zawodowe i mogą wykonywać tylko ograniczone zadania.
- Nie zawsze są mobilni i mają trudności z dotarciem do miejsca pracy.
- Mimo obowiązującego prawa i zmiany postaw w ostatnich latach, nadal utrzymuje się dyskryminacja, a pracodawcy niechętnie zatrudniają osoby niepełnosprawne.
- Niektóre firmy nie posiadają udogodnień ułatwiających dostęp i poruszanie się osobom niepełnosprawnym, więc nie mogą pracować w dobrych warunkach.

Do ograniczeń związanych z dostosowaniem miejsca pracy oprócz niepełnosprawności wprost prowadzą również dolegliwości i schorzenia mięśniowo-szkieletowe (w szczególności bóle szyi, ramion, pleców, urazy i zaburzenia w obrębie kończyn górnych i dolnych).

Zgodnie z prawem wszyscy pracodawcy mają obowiązek umożliwić osobom niepełnosprawnym integrację w miejscu pracy. Obowiązek dostosowania miejsca i czasu pracy jest bezpośrednim obowiązkiem nałożonym na pracodawców przez prawo. Zgodnie z orzecznictwem sądów pracy, pracodawcy powinni dokonać racjonalnych dostosowań przed zbadaniem zdolności osoby niepełnosprawnej do wykonywania podstawowych wymogów pracy. W przypadku, gdy pracownik stał się niepełnosprawny lub jego niepełnosprawność uległa pogłębieniu w trakcie trwania umowy, oprócz obowiązku pracodawcy do dokonania racjonalnych zmian wynikających z ustawy o równości (zwłaszcza w odniesieniu do pracowników długoterminowych), pracodawca musi starać się umożliwić pracownikowi kontynuację wykonywania pracy w odpowiednich warunkach, co jest istotną częścią stosunku pracy.

W przypadku występowania większej grupy osób z poważnymi niepełnosprawnościami należy przeanalizować, jakie czynności blokują rotację wewnątrz danej grupy. Następnie należy sprawdzić możliwość przesunięcia tych operacji na inne linie montażowe, jeśli konstrukcja pojazdu i procesy na to pozwalają. Drugim sposobem jest możliwość wyznaczenia dwóch zespołów w danej linii montażowej (lub brygadzie). Przydział osób do danej grupy rotacyjnej powinno nastąpić równocześnie z analizą czynności oraz oceną ryzyka ergonomicznego.

Wnioski końcowe

W ramach realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej podjęto tematykę ergonomicznego balansowania linii montażowej w produkcji pojazdów użytkowych. Planowanie czynności montażowych i obciążenie biomechaniczne pracowników na tego typu liniach w znaczny sposób różnią się od linii montażowych samochodów osobowych. Najważniejsze różnice to:

- Znacznie **większa wariantowość** zabudowywanych części, która wpływa na zadania do realizacji na poszczególnym stanowisku pracy. Ze względu na konstrukcję samochodu użytkowego, który może być przeznaczony do:
 - transportu ludzi (wyposażenie: siedzenia w tylnej części auta),
 - transportu towarów (wyposażenie: uchwyty mocujące do zabezpieczenia ładunku),
 - zabudowy specjalnej (specjalna zabudowa, np. karetki, wozy strażackie),czynności zaplanowane na danym takcie wymagają pracy z innymi urządzeniami i częściami, co wpływa na obciążenie większej liczby mięśni. Przyczynia się to do pojawiania problemów w projektowaniu rotacji dla pracowników z ograniczeniami zdrowotnymi lub powoduje wręcz pogłębianie się choroby zawodowej powstałej na skutek pracy na źle przystosowanym miejscu pracy.
- Ważnym aspektem jest **czas trwania taktu**, który w pojazdach użytkowych jest znacznie dłuższy i wynika głównie z gabarytu produktu. Dłuższy czas taktu oznacza przypisanie do danego miejsca pracy większej ilości zadań, które musi wykonać pracownik, aby zrealizować zaplanowane zadania. Większa liczba ruchów przyczynia się również do angażowania większej ilości partii mięśni.

W celu uzupełnienia zidentyfikowanej na podstawie przeglądu literatury **luki badawczej** podjęto badania jakościowe i ilościowe. Lukę badawczą zidentyfikowano jako: brak propozycji modeli ergonomicznego balansowania linii produkcyjnej w produkcji pojazdów użytkowych ze szczególnym uwzględnieniem indywidualnych wskaźników zdrowia pracowników i rotacji opartej na zrównoważonym obciążeniu poszczególnych grup mięśni. Wyniki uzyskane w poszczególnych badaniach pozwoliły na opracowanie modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej w przedsiębiorstwach produkcyjnych ze szczególnym uwzględnieniem ochrony pracownika przed nadmiernym obciążeniem i uciążliwością pracy.

W części teoretycznej dysertacji dokonano analizy dostępnych metod i narzędzi balansowania linii, która posłużyła na opracowanie podstaw modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej. Analiza dotyczyły takich zagadnień, jak:

- **balansowania linii montażowej.** Uwzględniono dotychczasowe ustalenia innych badaczy i wskazano, że balansowanie linii montażowej stanowi główny element optymalizacji planowania pracy na stanowiskach produkcyjnych. Spostrzeżenia badaczy przyczyniły się również do opracowania kryteriów zbalansowania linii, a następnie podstaw do oceny ergonomicznego zbalansowania linii montażowej.
- **zmniejszania rozrzutu czasu poprzez wprowadzanie ograniczeń.** Różnice trwania czynności na danym takcie powodują różne problemy w linii montażowej. Rozrzut czasu wpływa przede wszystkim na znaczne obciążenie pracą i wymaga doboru takich ograniczeń procesowych, aby nie dopuścić do zatrzymania linii produkcyjnej. Problem dodatkowo komplikują relacje pierwszeństwa między zadaniami, w których niektóre zadania muszą zostać zakończone przed rozpoczęciem innych.
- **narzędzi wspomagających balansowanie linii montażowej.** Koncerny samochodowe przyjęły metodę MTM-UAS jako główne narzędzie do wyznaczania czasu na wykonanie czynności opisanej na arkuszach procesów, w których cykle produkcyjne są ustrukturyzowane i mierzone za pomocą standardowego i uniwersalnego systemu. Drugim narzędziem wspierającym jest metoda MTM-EAWS, która zapewnia zgodność z odpowiednimi normami CEN/ISO i jest skonstruowana tak, aby wykorzystać informacje dostępne w analizie MTM w celu wsparcia opisu cyklu i oceny ryzyka. Jest to system holistyczny (pełne pokrycie wszystkich obszarów ryzyka) i zapewnia szczegółowe wyniki w czterech sekcjach. Wyżej wymienione narzędzia zostały wykorzystane w zaproponowanym modelu do ergonomicznego balansowania linii.

Wspierając się również innymi metodami do oceny ryzyka ergonomicznego, opracowano piktogramy do oceny subiektywnego obciążenia stanowisk pracy oraz do oceny stanu zdrowia pracownika.

- **mierników do oceny zbalansowania linii montażowej.** Głównym celem produktywności i ergonomiczności jest ciągle poszukiwanie dróg poprawy obecnego systemu. W celu mierzenia tych wartości został opracowany wskaźnik do oceny zbalansowania linii montażowej.

- **czynników niepożądanych w organizacji pracy ludzkiej na linii montażowej.** Z uwagi na wiele marnotrawstw występujących na linii montażowej należy pamiętać o braku ergonomiczności w zakresie stanowisk pracy, co może powodować wśród pracowników choroby zawodowe, zaś pracodawców narażać na zbędne koszty. Za nieergonomiczne stanowiska pracy uznaje się takie, które wymagają częstego schylania się lub nagminnego sięgania wysoko, dźwigania i przenoszenia nieporęcznych, ciężkich przedmiotów oraz przyjmowania nienaturalnych pozycji. Dodatkowo problem ten występuje w przypadku, gdy na danym stanowisku obciążonych jest wiele partii mięśni, co powoduje utrudnienia w równoważeniu obciążenia.
- **wizualizacji poziomu zbalansowania linii przy użyciu wykresów Yamazumi.** Analizując narzędzia, które znajdują najlepsze zastosowanie w równoważeniu linii montażowych z wysokim stopniem wariantowości produkowanego asortymentu, autor za najbardziej korzystne uznał wykresy Yamazumi. Narzędzie Yamazumi jest idealną metodą zwiększenia wydajności pracy. Dostępne wizualizacje pozwalają na łatwe zobrazowanie punktów, w których dochodzi do marnowania czasu. Wykresy Yamazumi zostały zaproponowane jako narzędzia wspierające omawiany model do ponownego podziału czynności montażowych na niezbalansowanej ergonomicznie linii montażowej.
- **rotacji pracowników.** Rotacja na stanowisku pracy pozwala przede wszystkim na odciążenie poszczególnych partii mięśni pracownika, a dla przedsiębiorstwa oznacza zapewnienie płynności produkcji w razie absencji. Opisane metody naukowe autor uznał za niewystarczające i w części badań własnych zaproponował nowe podejście do planowania rotacji pracowników.
- **wybranych aspektów do ergonomicznego balansowania linii.** Ustalono, że wspomaganie pracownika środkami techniki (egzoszkielety, ortezy, podpory) jest ważne dla optymalizacji procesów montażowych i dla ergonomicznego balansowania linii. Na podstawie przeanalizowanych metod do oceny ryzyka ergonomicznego wybrano metodę EAWS. W toku prowadzonych badań ustalono, że ocena subiektywna ergonomistów ma duże znaczenie w procesie określania uciążliwych stanowisk pracy i należy ją również uwzględnić. Kwestie prawne, odnoszące się do organizacji ergonomicznego, a także bezpiecznego stanowiska pracy, regulowane są w Polsce normami: PN-EN ISO 9241-1:2001/A1:2002 i PN-EN ISO 9241-1:2001/A1:2005 (tzw. norma A1).

W części praktycznej przeprowadzono badania, a uzyskane wyniki pozwoliły na udzielenie odpowiedzi na przyjęte w rozprawie pytania badawcze:

- **W jaki sposób równoważyć obciążenie pracą przy występującym rozrzucie czasu?**

Najlepszym sposobem na minimalizację rozrzutu czasowego byłoby uwzględnianie tego aspektu podczas projektowania produktu, dzięki czemu można byłoby uniknąć procesów, które znacznie wydłużają czas trwania czynności dla niektórych wariantów zabudowy. Takie rozwiązanie wymagałoby dostarczania modułów na linie montażowe, których elementy powinny być już wcześniej ze sobą połączone (np. u dostawcy części).

Wśród zaobserwowanych bezpośrednio na linii montażowej sposobów walki z redukcją rozrzutu czasu za najlepiej działające narzędzie uznano wprowadzanie sekwencji, którą definiuje się poprzez ustalanie restrykcji (twardych i miękkich).

- **Jakie są najważniejsze czynniki decydujące o ergonomicznym zbalansowaniu linii montażowej?**

W obszarze działań ergonomicznych eksperci uczestniczący w badaniu wskazali, że najważniejsze jest zapewnienie minimalizacji narażenia pracownika na urazy wynikające z wykonywania zadań (113 punktów), ale także priorytetowe traktowanie bezpieczeństwa pracowników w przedsiębiorstwie (111 punktów).

- **Jakie są kluczowe czynniki wpływające na planowanie rotacji pracowników?**

Respondenci najwyżej ocenili ważność czynnika 11, który wskazuje na fakt, że pracownik mający problemy z daną grupą mięśni, nie powinien pracować na stanowisku obciążającym tę partię ciała. Spełnienie tego czynnika zostało uwzględnione i było traktowane priorytetowo w modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej. W modelu zwrócono również uwagę na to, aby zdrowe osoby miały również zapewniony ergonomiczny bilans obciążenia poszczególnych partii mięśni.

- **W jaki sposób środki techniki (egzoszkielety) wpływają na możliwość planowania rotacji pracowników?**

Zastosowanie egzoszkieletów, manipulatorów lub robotów współpracujących z człowiekiem rozszerza możliwość przydzielania większej liczby stanowisk pracy osobom z niepełnosprawnościami, które do tej pory nie mogły pracować na wszystkich stanowiskach. Dzięki takiemu rozwiązaniu wszyscy pracownicy na linii montażowej mogą pracować na większej liczbie stanowisk, co znacznie poprawia ich mobilność i zmniejsza monotoność pracy.

- **Jak włączać do oceny biomechanicznej czynności o niskiej wariantowości, a wysokim stopniu obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego?**

Subiektywna ocena ergonomisty, która jest dokonywana dla wszystkich czynności zaplanowanych na danym stanowisku pracy, przyczynia się do niepomijania czynności o niskiej wariantowości, a wysokim stopniu obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego. Dzięki subiektywnej ocenie czynności o wysokim stopniu obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego nie tracą na swojej ważności, mimo że występują stosunkowo rzadko.

- **W jaki sposób organizować rotację pracowników, aby uwzględnić równomierne obciążenie poszczególnych partii mięśni?**

W celu równomiernego obciążenia wszystkich partii mięśni autor proponuje wykorzystanie metody obiektywnej (EAWS) i subiektywnej (ergonomista dokonuje subiektywnej oceny na podstawie swojej wiedzy i doświadczenia). Wykorzystując algorytm matematyczny, w szybkim czasie można zestawzić ze sobą ocenę ryzyka ergonomicznego oraz ocenę stanu zdrowia. Model matematyczny wskazuje na optymalną rotację pracowników, uwzględniając zaplanowane ograniczenia procesowe oraz ergonomiczne. Uzyskane wyniki pozwalają śledzić rotację pracowników, którą można wykorzystać głównie w celu poprawy zdrowia i samopoczucia pracowników, ale również dla polepszenia jakości produktu (poprzez monitoring powstawania błędów).

W toku prowadzonego badania literatury i działań empirycznych autor zaprojektował model uwzględniający pięć etapów, dzięki którym następuje balansowanie linii produkcyjnej pod kątem ergonomii pracy. To z kolei przyczyniać się może do podniesienia stanu bezpieczeństwa zdrowotnego pracowników. Dzięki rotacjom na stanowiskach i zastosowaniu technologii odciążających pracowników możliwe będzie stałe wspomaganie pracowników, przez co podniesie się efektywność pracy. Wskazano także na potrzebę włączania pracowników z ograniczeniami zdrowotnymi do pracy i ich integrację z zespołem.

Dysertacja stanowi syntezę dostępnej wiedzy literaturowej oraz wniosków wynikających z przeprowadzonych badań, w których zastosowano zróżnicowane metody badawcze, takie jak: obserwacja, badanie opinii ekspertów, badanie ankietowe, eksperyment oraz studium przypadku. Dzięki temu możliwa była realizacja celu głównego dysertacji w postaci opracowania autorskiego modelu do ergonomicznego balansowania linii montażowej w produkcji pojazdów użytkowych.

Model został opisany w rozdziale czwartym. Jest to tym samym uzupełnienie zidentyfikowanej przez autora luki badawczej.

Zgodnie z modelem oceny balansowania linii zaproponowanym przez autora, człowieka stawia się w punkcie centralnym i dopasowuje do jego możliwości i potrzeb treści pracy oraz jej warunki. Peter Drucker, badacz procesów organizacji i zarządzania w korporacjach, podczas jednego ze swoich słynnych wystąpień powiedział: „Nie można zarządzać czymś, czego nie da się zmierzyć”²⁴³. Sukces tkwi zatem w pomiarze procesów, które realizujemy w przedsiębiorstwie, a dokładniej w wykorzystaniu informacji, które z tych pomiarów uzyskujemy. W modelu zostały zdefiniowane kryteria do ergonomicznego balansowania linii montażowej, dzięki czemu przedsiębiorstwa produkcyjne mają możliwość dokonania samooceny w zakresie poziomu zbalansowania linii produkcyjnej.

Podsumowując: ergonomiczne zbalansowanie linii można oceniać w odniesieniu do obciążeń fizycznych i posturalnych na danym stanowisku pracy. Aby zapewnić optymalny balans, należy dobrać operacje na różnych stacjach pracy w taki sposób, by całościowe obciążenia poszczególnych stacji były równe. Należy również zapewnić odpoczynek mięśni i układu kostnego, nie obciążając tych samych partii części ciała przez cały dzień pracy. W konsekwencji doprowadzi to do zmniejszenia ryzyka wystąpienia urazów oraz korzystnie wpłynie na jakość i wydajność pracy. Znajomość zagadnień z zakresu ergonomii pracy może znacząco przyczyniać się do wdrażania takich rozwiązań, które będą sprzyjać bezpiecznemu środowisku pracy i umożliwią pracownikom pracę, która nie będzie skutkowałą pojawianiem się problemów zdrowotnych czy urazów.

Kierunki dalszych badań

Choć dokonana w ramach dysertacji synteza modelu ergonomicznego balansowania linii montażowej już teraz uzupełnia zidentyfikowaną w badaniach literaturowych lukę badawczą, autor chciałby kontynuować pracę nad modelem ergonomicznego balansowania linii, rozszerzając model o kolejne etapy, które pomogą przedsiębiorstwom śledzić wskaźnik kompleksowej oceny ergonomiczności.

²⁴³ M. Sasin, *O wskaźnikach (KPI) i dashboardach w zarządzaniu*, <https://www.ark-doradztwo.pl/czytelnia/o-wskaznikach-kpi-i-dashboardach-w-zarzadzaniu>, 5.06.2019.

- Ciekawym kierunkiem wydaje się zbadanie możliwości rotacji pracowników między dwoma liniami montażowymi. Należy zbadać wpływ zmniejszenia obciążenia i uciążliwości pracy oraz zadowolenia pracowników pomiędzy takimi liniami, które w znaczny sposób obciążają pewne grupy mięśni na jednej linii, a na drugiej nie obciążają ich w ogóle. Takim przykładem mogą być linie wysokie, na których pracownicy pracują pod podwoziem auta z rękoma podniesionymi powyżej linii ramion lub nad nimi. Linią do równoważenia tego obciążenia mogą być linie podmontażu, gdzie pracownicy głównie stoją w jednym miejscu i obciążają kończyny dolne lub np. linie niskie, gdzie pracownicy pracują wewnątrz auta w pozycji klęczącej lub z różnego rodzaju skrętami bocznymi oraz pochyleniami.
- Kolejnym kierunkiem rozwoju zaproponowanego modelu może być uwzględnienie w nim czynników odrzuconych w toku przeprowadzania badań ankietowych opisanych w podrozdziale 3.3. Przykładem może być czynnik: powołanie kompetentnego zespołu realizującego poprawę warunków ergonomicznych, głównie w kontekście stanowisk krytycznych, tzn. jeśli liczba punktów według metody EAWS wyniesie powyżej 50.
- Przyszłym kierunkiem badań nad implementacją zaproponowanej w rozprawie metody może być także weryfikacja jej zastosowania w odniesieniu do kryteriów, które muszą być spełnione podczas planowania rotacji, która prowadziła do poprawy jakości oraz niskiej liczby błędów wytwarzanego produktu.
- Jako kolejny obszar rozwoju badań przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy można wymienić przekształcenie wszystkich etapów modelu w narzędzie informatyczne, aby ułatwić użytkownikowi stosowanie modelu. W ramach realizacji rozprawy zaproponowano narzędzie do planowania rotacji pracowników, które można dalej rozwijać o dodatkowe moduły, jak np. planowanie rotacji pracowników podczas pandemii (jak COVID-19), gdzie należy zastosować środki ograniczające kontakty personalne.
- Analizy literatury przedmiotu wskazały, że zbyt mało miejsca poświęca się rotacji na miejscu pracy pracownikom ze względu na ich wiek (zwłaszcza tych młodocianych oraz osiągających wiek emerytalny). Podczas przeprowadzania badań ankietowych i wywiadów z ekspertami przyznano, że wiek pracownika nie ma większego znaczenia podczas planowania rotacji. Z uwagi na duży potencjał, warto rozszerzyć badania nad modelem ergonomicznego balansowania linii z uwzględnieniem wieku pracowników (**starsi**

pracownicy posiadają dużą wiedzę i doświadczenie, a **młodociani** po ukończeniu przygotowania zawodowego mogą być potencjalnymi pracownikami w przedsiębiorstwie).

W ramach dalszych badań autor chciałby również podkreślać i promować uwzględnienie ochrony pracownika przed nadmiernym obciążeniem i uciążliwością w miejscu pracy, ponieważ jest to istotny element wpływający na wydajność pracy i zdrowie pracowników zatrudnionych na poszczególnych stanowiskach.

Bibliografia

1. ABB, *Roboty współpracujące*, <https://automatykab2b.pl/technika/52085-roboty-wspolpracujace>, 13.12.2019.
2. ACGIH, 2010, TLVs and BEIs guidelines, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010, Ohio.
3. Adam B., *Efektywna współpraca z robotami*, <https://automatykab2b.pl/technika/50512-efektywna-wspolpraca-z-robotami>, 21.01.2019.
4. Agrawal P. K., *The related activity concept in assembly line balancing*, „International Journal of Production Research” 1985, 23:2, s. 403–421.
5. Åkertedt T., *Shift work and disturbed sleep/wakefulness*, „Occup Med” 2003, 53, s. 89–94, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12637592/>, 1.03.2003.
6. Akyol S. D., Baykasoglu A., *ErgoALWABP: A multiple-rule based constructive randomized search algorithm for solving assembly line worker assignment and balancing problem under ergonomic risk factors*, „Journal of Intelligent Manufacturing” 2016, 30, s. 1–12.
7. Albrecht S. A., Bakker A., Gruman J., Macey W., Saks A., *Employee engagement, human resource management practices and competitive advantage*, „Journal of Organizational Effectiveness: People and Performance”, 2015, 2 (1), s. 7–35.
8. Alfes K., Shantz A. D., Truss C., Soane E., *The link between perceived human resource management practices, engagement and employee behaviour: a moderated mediation model*, „The International Journal of Human Resource Management”, 2013, 24 (2), s. 330–351.
9. Anandan T. M., *Współpraca robotów i ludzi*, <https://www.controlengineering.pl/wspolpraca-%E2%80%A8robotow-i-ludzi/>, 29.01.2018.
10. Ariyanti, Silvi & Azhar, M. & Lubis, Sobron, 2020, *Assembly Line Balancing with The Yamazumi Method*, IOP Conference Series: „Materials Science and Engineering”, 4.08.2020, Dżakarta. https://www.researchgate.net/publication/348113315_Assembly_Line_Balancing_with_The_Yamazumi_Method, 1.12.2020.

11. Asensio-Cuesta S, Diego-Mas J. A., Canós-Darós J., Andrés-Romano C., *A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria*, „International Journal of Advanced Manufacturing Technology” 2012, 60, s. 1161–1174.
12. Asensio-Cuesta S., Diego-Mas J. A., Cremades-Oliver L. V., González-Cruz M. C., *A method to design job rotation schedules to prevent work-related musculoskeletal disorders in repetitive work*, „Int. J. Prod. Res.” 2012, 50 (25), s. 7467–7478.
13. *Assembly Lines Lead to Injury*, <https://thehwlawfirm.COM/2020/04/07/assembly-line-workers-comp>, 7.04.2020.
14. Augustyńska D., Pleban D., Radosz J., *Zagrożenia hałasem na stanowiskach pracy w Polsce i innych państwach Unii Europejskiej*, „Medycyna Pracy” 2012, 63(6), s. 689–700.
15. autoEXPERT, *Coraz więcej inteligentnych robotów w fabrykach samochodów*, <https://autoexpert.pl/artykuly/coraz-wiecej-inteligentnych-robotow-w-fabrykach-samochodow>, 14.10.2019.
16. Axelos, *Zarządzanie ryzykiem: przewodnik dla praktyków*, PeopleCert, 2022.
17. Bagher M., Zandieh M., Farsijani H., *Balancing of stochastic U-type assembly lines: an imperialist competitive algorithm*, „International Journal of Advanced Manufacturing Technology” 2010, 54, s. 271–285.
18. Barathwaj N., Raja P., Gokulraj S., *Optimization of assembly line balancing using genetic algorithm*, „Journal of Central South University” 2015, 22, s. 3957–3969.
19. Battai'a O., Dolgui A., *A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches*, „International Journal of Production Economics” 2013, 142, s. 259–277.
20. Battini D., Delorme X., Dolgui A., Persona A., Sgarbossa F., *Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure: A multi-objective model*, „International Journal of Production Research” 2016, 54, s. 824–845.
21. Battini D., Faccio M., Persona A., Sgarbossa F., *New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design*, „International Journal of Industrial Ergonomics” 2011, 41 (1), s. 30–42.

22. Bautista J., Alfaro-Pozo R., Batalla-García C., *Maximizing comfort in assembly lines with temporal, spatial and ergonomic attributes*, „International Journal of Computational Intelligence Systems” 2016, 9, s. 788–799.
23. Baybars I., *A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem*, „Management Sciences” 1986, 32, s. 909–932.
24. Baykasoglu A., Tasan S. O., Tasan A. S., Akyol S. D., *Modeling and solving assembly line design problems by considering human factors with a real-life application*, „Human Factors Ergonomic Manufacturing & Service Industries” 2017, 27 (2), s. 96–115.
25. Bayou M. E., Korvin A. De, *Measuring the Leanness of Manufacturing Systems: A Case Study of Ford Motor Company and General Motors*, „Journal of Engineering and Technology Management” 2008, 4, s. 25–287.
26. Becker C., Scholl A., *A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing*, „European Journal of Operational Research” 2006, 168, s. 694–715.
27. Bergmann G., *Die fragile Zukunft der Automobilindustrie – und was das für Arbeitstätigkeiten und Jobs bedeutet*, https://www.hspforzheim.de/fileadmin/user_upload/uploads_redakteur_wirtschaft/Personalmanagement/Personal_Forum/2021/2021_10_28/Automobilindustrie_Personal_Forum_2021.pdf, 28.10.2021.
28. *Bezpieczeństwo systemów z robotami współpracującymi, cz. 1*, <https://fugai.pl/bezpieczenstwo-systemow-z-robotami-wspolpracujacymi-cz-1/>, 2.01.2019.
29. Bhim S., Garg S. K., Sharma S. K., Grewal C., *Lean implementation and its benefits to production industry*, „International Journal of Lean Six Sigma” 2010, 1 (2), s. 157–168.
30. Boysen N., Fliedner M., Scholl A., *A classification of assembly line balancing problems*, „European Journal of Operational Research” 2007, 183, s. 674–693.
31. Boysen N., Fliedner M., Scholl A., *Assembly line balancing: Which model to use when?*, „International Journal of Production Economics” 2008, III, s. 509–528.
32. Bruder R., *Kooperationsprogramm zum normativen Management von Belastungen und Risiken bei körperlicher Arbeit*, Darmstadt Institut für Arbeitswissenschaft TU, Darmstadt 2007.

33. Bryton B., *Balancing of continuous production line*, praca magisterska, Northwestern University, Evanston, IL, 1954.
34. Bukchin J., Dar-El E., Rubinovitz J., *Mixed Model Assembly Line Design in a Make-to-order Environment*, „Computers & Industrial Engineering” 2002, 41, s. 405–421.
35. Bukchin Y., Cohen Y., *Minimising throughput loss in assembly lines due to absenteeism and turnover via work-sharing*, „International Journal of Production Research” 2013, 51(20), s. 6140–6151.
36. Butlewski M., Misztal A., *Kierunki zmian procesowych w systemie zarządzania zmęczeniem pracowników*, „Zeszyty Naukowe Małopolskiej Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Tarnowie” 2016, 3 (31), 72–75.
37. Butlewski M., *Projektowanie ergonomiczne wobec dynamiki deficytu zasobów ludzkich*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2018.
38. Carnahan B. J., Norman B. A., Redfern M. S., *Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing*, „HE Transactions” 2001, 33, s. 875–887.
39. Carraway R., *A Dynamic Programming Approach to Stochastic Assembly Line Balancing*, „Management Science” 1989, 35, s. 459–471.
40. Carrier J., Monk T. H., *Circadian rhythms in performance: new trends*, „Chronobiol. Int.” 2000, 17, s. 719–732, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11128289/>, 1.07.2000.
41. Casse Ch., Troyer M. De, *Gender, working conditions and health. What has changed?* <https://www.etui.org/sites/default/files/2021-05/Gender%2C%20working%20conditions%20and%20health-What%20has%20changed-2021-web.pdf>, 10.05.2021.
42. Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P17600564961351869251623&html_tresc_root_id=12125&html_tresc_id=3000622&html_klucz=12125&html_klucz_spis=, 1.07.2021.
43. Chan C. O., Lau H., Fan Y., *Rola wykresu Yamazumi w standaryzacji lean: modelowanie i analiza z wykorzystaniem funkcji utraty wydajności*, „International Journal of Productivity and Quality Management” 2023, 38 (4), s. 435–463.

44. Choi G., *A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload*, „Computers & Industrial Engineering” 2009, 57, s. 395–400.
45. Chojnicki J., Jarosiewicz G., *ABC BHP Informator dla pracodawców*, Państwowa Inspekcja Pracy, Warszawa 2019, s. 58–70.
46. Christmansonn M., Falck A. C., Amprazis J., Forsman M., Rasmusson L., Kadefors R., *Modified method time measurements for ergonomic planning of production systems in the manufacturing industry*, „International Journal of Production Research”, 2000, 38, s. 4051–4059.
47. Colombini D., Occhipinti E., Grieco A., *Risk Assessment and Management of Repetitive Movements and Exertions of Upper Limbs*, „Elsevier Ergonomics Book Series”, vol. 2, Amsterdam Elsevier, 2002.
48. Comper M. L. C., Padula R. S., *The effectiveness of job rotation to prevent work-related musculoskeletal disorders: protocol of a cluster randomized clinical trial*, BMC Musculoskeletal Disorders (ed.) 2014, 15, s. 170.
49. Czekaj J., *Koncepcja lean administration*, [w:] Błaszczuk W., Bednarska-Wnuk I., Kuźbik P. (red.), *Nurt metodologiczny w naukach o zarządzaniu*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2010.
50. Dalle Mura M., Dini G., *Job rotation and human–robot collaboration for enhancing ergonomics in assembly lines by a genetic algorithm*, „Int. J. Adv. Manuf. Technol.” 2022, 118, s. 2901–2914.
51. Damiani L., Giribone P., Guizzi G., Revetria R., Romano E., *Different approaches for studying interruptible industrial processes: Application of two different simulation techniques* (Book Chapter). *Handbook of Research on Computational Simulation and Modeling in Engineering*, 2015, s. 69–104.
52. Damrath F., *Increasing Competitiveness of Service Companies: Developing Conceptual Models for Implementing Lean Management in Service Companies*, Politecnico di Milano, Milano 2012.
53. De Felice F., Petrillo A., Silvestri A., *Offshoring: Relocation of production processes towards low-cost countries through the project management & process reengineering performance model*, „Business Process Management Journal” 2015, 21 (2), s. 379–402.

54. DePuy G. W., Whitehouse G. E., *Applying the COMSOAL Computer Heuristic to the Constrained Resource Allocation Problem*, „Computers & Industrial Engineering” 2000, 38, s. 413–422.
55. Depuy W. G., Whitehouse G. E., *A simple and effective heuristic for the resource constrained project scheduling problem*, „International Journal of Production Research” 2001, 39 (14), s. 3275–3287.
56. Deutsch D., *A Branch and Bound Technique for Mixed-Product Assembly Line Balancing*, Ph. D. Dissertation, Arizona State University, 1971.
57. Domschke W. R., Scholl A., *Antizipative Leistungsabstimmung bei moderner Variantenfließfertigung*, „Zeitschrift für Betriebswirtschaft” 1996, 66, s. 1465–1490.
58. Drozdowski G., *Kształtowanie zatrudnienia w organizacjach publicznych*, PWSZ IPiA Studia Lubuskie, Sulechów 2012, s. 201–223.
59. Dul J., Vries H. de, Verschoof S., Eveleens W., Feilzer A., *Combining economic and social goals in the design of production systems using ergonomics standards*, „Computers & Industrial Engineering” 2004, 47, s. 207–222.
60. Dz. U. 2020.1320 z dnia 2020.07.30 Art. 2352, Rozdział VII – Wypadki przy pracy i choroby zawodowe.
61. Eklöf M., Hagberg M., *Are simple feedback interventions involving workplace data associated with better working environment and health? A cluster randomized controlled study among Swedish VDU workers*, „Appl. Ergon.” 2006, 37 (2), s. 201–210.
62. Evans E., *Job rotation as training and development tool for enhancing employee’s performance*, „A Study of united bank of Africa (UBA)”, 2021, Lagos.
63. Fekete M., Hulvej J., 2013, „*Humanizing” Takt Time and Productivity in the Labor – Intensive Manufacturing Systems*, International Conference Zadar [online], 2013, Zadar, Croatia, <http://www.toknowpress.net/ISBN/978-961-6914-02-4/papers/ML13-245.pdf>, 22.06.2013.
64. Filus R., Okimorto M. L., *The effect of Job Rotation intervals in muscle fatigue – Lactic acid*, „Work” 2012, (41), s. 1572–1581.
65. Filus R., Okimorto M. L., *The effect of Job Rotation intervals in muscle fatigue – Lactic acid*, „Work” 2012, 41, s. 1572–1581.

66. Friedman B., Hendry D. G., *Value Sensitive Design: Shaping Technology with Moral Imagination*, 2019.
67. Frieling E. (Hrsg.), *Schriftenreihe Personal- und Organisationsentwicklung*, Band 8, University Press, Kassel.
68. Gabryelewicz I., Sadłowska-Wrzesińska J., *Problemy z zakresu bezpieczeństwa pracy w MMŚP na przykładzie badania poziomu kultury bezpieczeństwa w firmie rodzinnej*, 2016, wersja elektroniczna publikacji jest wersją podstawową, <http://bazekon.icm.edu.pl/bazekon/element/bwmeta1.element.ekon-element-000171487081>, 18.01.2016.
69. Gamberini R., Grassi A., Rimini B., *A new multi-objective heuristic algorithm for solving the stochastic line re-balancing problem*, „International Journal of Production Economics” 2006, 102, s. 226–243.
70. Ginting R. and William, 2020, *Assembly Line Balancing with Method Ranking Positional Weight* (case study: XYZ Company), IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 3.09.2020, Medan, Indonezja. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1003/1/012032/pdf>, 1.12.2020.
71. Gironimo G. di, Di Martino C., Lanzotti A., Marzano A., Russo G., *Improving MTM-UAS to predetermine automotive maintenance times*, „International Journal on Interactive Design and Manufacturing” (IJIDeM) 2012, 6, s. 265–273.
72. Główny Inspektorat Sanitarny, *Ryzyko związane z ręcznymi pracami transportowymi. Przewodnik po wybranych metodach oceny ryzyka: MAC i KIM*, „Inspektor Pracy”, 2008, nr 1, Departament Warunków Pracy GIP, Warszawa 2008.
73. Główny Inspektorat Sanitarny, *Czynniki rakotwórcze występujące w miejscu pracy*, <https://www.gov.pl/web/gis/czynniki-rakotworcze-wystepujace-w-miejscu-pracy>, 24.07.2012.
74. Gola A., *Podstawy przedsiębiorczości*, Politechnika Lubelska, Lublin 2021.
75. Golan M., Cohen Y., Singer G., *A framework for operator – workstation interaction in Industry 4.0*, „International Journal of Production Research” 2020, 58 (8), s. 2421–2432.
76. Gosh S., Gagnon R., *A Comprehensive Literature Review and Analysis of the Design. Balancing and Scheduling of Assembly System*, „Int. J. Prod. Res.” 1996, 27, 4, s. 637–670.

77. Górny A., Sadłowska-Wrzesińska J., *Aspekty ergonomiczne w zarządzaniu ryzykiem zawodowym. Bezpieczeństwo i higiena pracy*, SHO, 2016, s. 102–104,
https://scholar.google.pl/citations?view_op=view_citation&hl=pl&user=tnSpKgIAAAAJ&citation_for_view=tnSpKgIAAAAJ:7PzIFSSx8tAC, 2016.
78. Groover M. P., *Automation. Production Systems and Computer-Integrated Manufacturing*, 2008, 3rd Edition, Pearson Education, New Delhi.
79. Grosse E., Glock C., Jaber M., Neumann P., *Incorporating human factors in order picking planning models: Framework and research opportunities*, „International Journal of Production Research” 2015, 53, s. 695–717.
80. Grosse E., Glock C., Neumann P., *Human factors in order picking: a content analysis of the literature*, „International Journal of Production Research” 2017, 55 (5), s. 1260–1276.
81. *Grupa Volkswagen wybrała robota Universal Robots do zwiększenia ergonomii pracy*,
<https://www.automatyka.pl/artykuly/grupa-volkswagen-wybrala-robota-universal-robots-do-zwiekszenia-ergonomii-pracy-71726-6>, 29.08.2013.
82. Grzechca W., *Strategia just in time w problemie balansowania linii montażowej*, „Logistyka” 2012, nr 2, Poznański Instytut Technologiczny,
http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BUS6-0040-0026?q=bwmeta1.element.baztech-volume-1231-5478-logistyka-2012-nr_2;38&qt=CHILDREN-STATELESS, 2.02.2012.
83. Grzelczak A., *Ergonomia w organizacji pracy. Analiza wybranych aspektów na przykładzie Metody Ruchów Elementarnych*, „Zeszyt Naukowy Politechniki Poznańskiej. Organizacja i Zarządzanie” 2014, nr 63, s. 77–89.
84. GUS, 2022. Mały Rocznik Statystyczny Polski 2022, <Główny Urząd Statystyczny/Obszary tematyczne/Roczniki statystyczne/Roczniki Statystyczne/Mały Rocznik Statystyczny Polski 2022>, 13.07.2022.
85. Halicka K., *Humanoidy poprawiające jakość życia osób starszych: przypadek Polski*, [w]: K. Arai, *Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC)*, Volume 3. FTC 2022, notatki z wykładów w Networks and Systems, tom 561.
86. Halicka K., *Prospektywna analiza technologii-metodologia i procedury badawcze*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2016.
87. Hartung P., *Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz im Büro*, Weka, München 2004.

88. Hasle P., Bojesen A., Jensen P., Bramming P., *Lean and the working environment: a review of the literature*, „International Journal of Operations & Production Management” 2012, 32.7, s. 829–849.
89. Helgeson B., Bernie D.P., *Assembly Line Balancing Using Ranked Positional Weight Technique*, „Journal of Industrial Engineering” 1961, vol. 12, nr 6.
90. Helgeson W. B., Birnie D. P., *Wyważanie linii montażowej przy użyciu techniki ważenia pozycyjnego*, „Journal of Industrial Engineering” 1961, 12, s. 394–398,
<https://www.scirp.org/%28S%28lz5mqp453edsnp55rrgjt55%29%29/reference/referencepapers.aspx?referenceid=1780890>, 15.06.2016.
91. Hoffmann Group, *Ergonomiczne miejsca pracy – w trosce o zdrowie Twoich pracowników*, <https://www.hoffmann-group.com/PL/pl/perp/wiedza-techniczna/przewodniki-online/przewodnik-po-wyposazeniu-warsztatow/ergonomia-miejsca-pracy/e/61057/>, 1.06.2021.
92. Horst W. M., Horst N., *Ergonomia z elementami bezpieczeństwa i ochrony zdrowia w pracy. Wprowadzenie*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2011.
93. <http://www.noonee.com>, 5.01.2019.
94. <https://www.gov.pl/web/gis/czynniki-rakotworcze-wystepujace-w-miejscu-pracy>, 24.07.2012
95. Imai M., *Gemba Kaizen*, MT Biznes, Warszawa 2006, s. 115.
96. Imai M., *Gemba Kaizen. Zdroworozsądkowe, niskokosztowe podejście do zarządzania*, MT Biznes, Warszawa 2006.
97. Instytut Analiz Rynku Pracy Sp. z o.o., *Starzenie się społeczeństwa – wyzwanie dla rynku pracy, aktywizacja pracowników 50+*,
https://www.parp.gov.pl/storage/publications/pdf/Starzenie_sie_spoleczenstw.pdf, 23.12.2020.
98. Jackson J. R., *A computing procedure for a line balancing problem*, „Management Science” 1956, 2, s. 261–271.
99. *Jak robot ułatwi życie osobom starszym i niepełnosprawnym*, 2016,
<https://www.pw.edu.pl/Badania-i-nauka/Badania-Innowacje-Technologie-BIT-PW/Jak-robot-ulatwi-zycie-osobom-starszym-i-niepelnosprawnym>, 28.10.2016.

100. Janosik E., Kułagowska E., Marzec S., Mazur-Kajta K., *Wpływ fizycznych czynników środowiska pracy na obciążenia pracą monotypową*, „Zeszyty Naukowe Małopolskiej Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Tarnowie” 2018, t. 38, nr 2, s. 122–137.
101. Jasiak A., Swereda D., *Ergonomia osób niepełnosprawnych*, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009.
102. Jastrzębowski W., *Rys ergonomii, czyli nauki o pracy, opartej o prawach poczerpniętych z nauki przyrody*, „Ergonomia” 1979, t. 2, nr 1.
103. Jaturanonda C., Nanthavanij S., Das S. K., *Heuristic procedure for the assembly line balancing problem with postural load smoothness*, „International Journal of Occupational Safety and Ergonomics” 2013, 19, s. 531–541.
104. Jaturanonda C., Nanthavanij S., *Heuristic procedure for two-criterion assembly line balancing problem*, „Industrial Engineering Er Management Systems” 2006, 5, s. 84–96.
105. Jensen P. L., *Human factors and ergonomics in the planning of production*, „International Journal of Industrial Ergonomics” 2002, 29, s. 121–131.
106. Jensen P. L., *Human factors and ergonomics in the planning of production*, „International Journal of Industrial Ergonomics” 2002, 29, s. 121–131
107. Kalokerinos E., Hippel C. von, Henry J. D., *Job attitudes are differentially associated with bridge employment and phased retirement among older Australian employees*, „Work, Aging and Retirement”, 2015, 1 (2), s. 190–201.
108. Kampkoetter P., Harbring C., Sliwka D., *Job rotation and employee performance – evidence from a longitudinal study in the financial services industry*, „International Journal of Human Resource Management” 2018, nr 9–10, s. 1709–1735.
109. Kao E., *A Preference Order Dynamic Program for Stochastic Assembly Line Balancing*, „Management Science” 1976, 22, s. 1097–1104.
110. Kara Y., Atasagun Y., Gökçen H., Hezer S., Demirel N., *An integrated model to incorporate ergonomics and resource restrictions into assembly line balancing*, „International Journal of Computer Integrated Manufacturing” 2014, 27, s. 997–1007.
111. Kawecka-Endler A., *Humanizacja a nowe formy pracy*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Organizacja i Zarządzanie” 2014, nr 63, s. 116.
112. Kilbridge M., Wester L., *A heuristic method of assembly line balancing*, „Journal of Industrial Engineering” 1961, 12, s. 292–298.

113. Kinney G. F., Wiruth A. D., *Practical Risk Analysis for Safety Management*, US Naval Postgraduate School, Security Department China Lake, Kalifornia 1976.
114. Kołodziejczyk-Olczak I., *Wpływ zarządzania wiekiem na zatrudnialność dojrzałych pracowników*, „Edukacja ekonomistów i menedżerów”, 2015, 1 (35), s. 75–93.
115. Korulczyk M., *Funkcjonowanie człowieka w środowisku pracy – wybrane aspekty*, „Postępy Nauki i Techniki” 2011, (8), s. 218–225.
116. Kosieradzka A., Smagowicz J., *Analiza porównawcza modeli dojrzałości organizacji*, 2016, s. 283–296, http://konceptcje.uek.krakow.pl/wp-content/uploads/2017/01/20_2016.pdf, 3.01.2017.
117. Kosieradzka A., Smagowicz J., *Model dojrzałości organizacji w obszarze publicznego zarządzania kryzysowego*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Organizacja i Zarządzanie” 2018, z. 128.
118. Kostera M., *Zarządzanie personelem*, Warszawa 2010, s. 43.
119. Kottas J. F., Lau H. S., *A cost-oriented approach to stochastic line balancing*, „AIIE Trans.” 1973, 5, s. 164–171.
120. Kottas J., Lau H., *A Cost-oriented Approach to Stochastic Line Balancing*, „AIIE Transactions” 1973, 5, s. 164–171.
121. Kożak-Siara T., Olak A., *Organizowanie pracy zasobów ludzkich w zwinnym przedsiębiorstwie*, „Współczesne Problemy Zarządzania” 2021, 2, s. 23.
122. Kuijer P. P. F. M., Vries W. H. K., Beek A. J., Dieën J. H. van, Visser B., Frings-Dresen M. H. W., *Effect of job rotation on work demands, workload and recovery of refuse truck drivers and collectors*, „Human Factors” 2004, 46 (3), s. 437–448.
123. Kujawa M., Mikła D., *MTM – podstawa do optymalizacji procesów logistycznych*, [w:] *Różne oblicza logistyki. Zbiór prac studentów*, 2018, s. 59-69.
124. Lachiewicz S., Łuczka T., Stawasz E., *Znaczenie i obszary badań nad innowacyjnością i konkurencyjnością małych i średnich przedsiębiorstw w Polsce*, „Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie”, 2010, 46 (1091), s. 5–16.
125. Liker J. K., Hoseus M., *Kultura Toyoty. Serce i dusza filozofii Toyoty*, MT Biznes, Warszawa 2008.
126. Liker M., Meier D. P., *Droga Toyoty. Fieldbook*, MT Biznes, Warszawa 2011.

127. Liker M., Meier D. P., *Toyota Talent. Developing Your People The Toyota Way*, McGraw-Hill, eBook, 2007.
128. Lisiecka K., Burka I., *Lean Service w teorii i praktyce*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice 2016.
129. Liwiński J., *Opis dobrych praktyk dotyczących zarządzania wiekiem w przedsiębiorstwach polskich oraz innych krajów UE*, PARP, https://www.parp.gov.pl/storage/publications/pdf/2010_dobre_praktyki_zarzadzania_wiekciem.pdf, 6.06.2010.
130. Liwiński J., Sztanderska U., *Wstępne standardy zarządzania wiekiem w przedsiębiorstwach*, Warszawa 2010, s. 65–68.
131. Liwiński J., Sztanderska U., *Zarządzanie wiekiem w przedsiębiorstwie*, https://www.researchgate.net/publication/267773462_Zarzadzanie_wiekciem_w_przedsiębiorstwie, 1.01.2016.
132. Lodree Jr. E. J., Geiger C. D., Jiang X., *Taxonomy for integrating scheduling theory and human factors: Review and research opportunities*, „International Journal of Industrial Ergonomics” 2009, 39, s. 39–51.
133. Looy A., *Business Process Maturity: A Comparative Study on a Sample of Business Process Maturity Model*, Springer 2014.
134. Łastowiecka-Moras E., Bugajska J., *Problemy zawodowe pracowników starszych; przy opracowywaniu wytycznych wykorzystano wyniki badań przeprowadzonych w projekcie PCZ 21-21 Aktywność zawodowa w aspekcie starzejącego się społeczeństwa oraz raport WHO Aging and Working Capacity (Report of a WHO Study Group. WHO, Geneva 1993)*, https://m.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/mobi?nfpb=true&pageLabel=P39200118761482245057910&html_tresc_root_id=300005867&html_tresc_id=300005863&html_klucz=300004753&html_klucz_spis=, 9.11.2013.
135. Macaskill J., *Production-line Balances for Mixed-model Lines*, „Management Science” 1972, 19, s. 423–434.
136. Macdonald J. L., Levy S. R., *Ageism in the Workplace: The Role of Psychosocial Factors in Predicting Job Satisfaction, Commitment and Engagement*, „Journal of Social Issues”, 2016, 72 (1), s. 169–190.

137. Mager G., *Optymalne oświetlenie wspiera efektywną produkcję*, <https://automatykaonline.pl/Artykuly/Inne/Optymalne-oswietlenie-wspiera-efektywna-produkcje>, 23.06.2017.
138. Majer R., Lesner D., *Pracodawca musi analizować wszystkie szkodliwe czynniki środowiska pracy*, <https://www.prawo.pl/kadry/czynniki-niebezpieczne-w-srodowisku-pracy,188913.html>, 28.11.2022.
139. Majewska M., S. Samol, *Rozwój elastycznego rynku pracy: uwarunkowania prawno-ekonomiczne*, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Seria Prawo, Poznań 2016.
140. Maliszewski A., Batogowska A., *Ergonomia dla każdego*, Sorus, Warszawa 1997.
141. Mathiassen S. E., *Diversity and variation in biomechanical exposure: what is it, and why would we like to know?*, „Appl. Ergon.” 2006, 37 (4), s. 419–427.
142. McAtamney L., Nigel Corlett E., *RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders*, „Appl. Ergon.” 1993, vol. 24, no. 2, s. 91–99.
143. Meepradit P. i in., *The Application of NIOSH Lifting Equation to Prevent Musculoskeletal Disorder Risks*, „Journal of Biosciences and Medicines”, 2015, vol. 03, no. 03, s. 39–44.
144. Melo D. J., 2014, *Utilização do método MTM-UAS como ferramenta de análise e aumento de produtividade*, XIV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial, wrzesień 2014, Salvador, Ba/Brasil.
145. Michalos G., Karvouniari A., Dimitropoulos N., Toggias T., Makris S., *Workplace analysis and design using virtual reality techniques*, „CIRP Ann-Manuf Technol” 2018, 67 (1), s. 141–144.
146. Mnerie D., Patalau A., Szasz A. F., Popet D. E., Mnerie G., *Elements of optimization of the visual signaling of safety and health in the workplace, in the prophylaxis of occupational diseases*, http://www.rizik.vtsns.edu.rs/RSE_2020/radovi/01/RIZIK_01_8.pdf, 16.01.2020.
147. Moore J. S., Garg S. K., *The Strain Index: a proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders*, „American Industrial Hygiene Association Journal”, 1995, vol. 56, no. 5, s. 443–58.

148. Morka M., *Czynniki wpływające na stan bezpieczeństwa pracy na placu budowy*, „Budownictwo i Inżynieria Środowiska”, 2011, 2, s. 605–609.
149. Mrugalska B., Sławińska M., *Narzędzia makroergonomii w sterowaniu bezpieczeństwem procesów pracy*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Organizacja i Zarządzanie” 2014, (63), s. 131–139.
150. MTM – Metoda podstawowa, Deutsche MTM-Vereinigung e.V., Hamburg 2004.
151. Mukund Nilakantan J., Ponnambalam S.G., Nielsen P., *Chapter 13 - Application of Particle Swarm Optimization to Solve Robotic Assembly Line Balancing Problems*, https://www.researchgate.net/publication/318644692_Chapter_13_Application_of_Particle_Swarm_Optimization_to_Solve_Robotic_Assembly_Line_Balancing_Problems, 1.01.2017.
152. Mutlu Ö., Özgörmüş E., *A fuzzy assembly line balancing problem with physical workload constraints*, „International Journal of Production Research” 2012, 50, s. 5281–5291.
153. Najder-Gawlik M., Wiszniewska M., Lipińska-Ojrzanowska A., *A dancer, a groomer, a folk artist and a viola player – case reports of occupational musculoskeletal and peripheral nervous system diseases*, „Medycyna Pracy” 2022, 73 (1), s. 71–78.
154. Nakase N., Yamada T., Matsui M., *A Management Design Approach to Assembly Line Systems*, „International Journal of Production Economics” 2002, 76, s. 281–292.
155. *Negatywny wpływ miejsca pracy na zdrowie*, <https://zdrowiewpracy.pl/prawo/negatywne-zjawiska-w-miejscu-pracy/>, 27.11.2019.
156. Neumann W. P., Dul J., *Human factors: Spanning the gap between OM and HRM*, „International Journal of Operations and Production Management” 2010, 30, s. 923–950.
157. Neumann W. P., Village J., *Ergonomics actions research II: A framework for integrating HF into work system design*, „Ergonomics” 2012, 55, s. 1140–1156.
158. *Niepełnosprawność w UE: fakty i liczby – infografika*, <https://www.consilium.europa.eu/pl/infographics/disability-eu-facts-figures/>, 4.07.2022.
159. Nissen R., *Job rotation*, [hasło w:] Gablerwirtschaftslexikon, <https://wirtschaftslexikon.gabler.de>, 1.06.2023.
160. Nkasu M., Leung K. H., *Computer Integrated Manufacturing Assembly System Design*, „Integrated Manufacturing Systems” 1995, 6, 6, s. 4–14.

161. Otto A., Battaia O., *Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: a survey*, „Computers & Industrial Engineering” 2017, 111, s. 467–480.
162. Otto A., Schol A., *Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing*, „European Journal of Operational Research” 2011, 212, s. 277–285.
163. Pachghare V., Dalu R. S., *Assembly Line Balancing Methods – A Case Study*, „International Journal of Science and Research” (IJSR) 2012, ISSN, s. 2319–7064.
164. Pacholski L. (red.), *Ergonomia*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1986, s. 110.
165. Pacholski L., Jasiak A., *Makroergonomia*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2011, s. 149–150.
166. Petrillo A., Di Bona G., Forcina A., Silvestri A., *Building excellence through the Agile Reengineering Performance Model (ARPM): A strategic business model for organizations*, „Business Process Management Journal” 2017, 24 (1), s. 128–157.
167. Petrillo A., Felice F. De, Zomparelli F., *Performance measurement for world-class manufacturing: a model for the Italian automotive industry*, „Total Quality Management and Business Excellence” 2019, Tom 30, nr 7-8, s. 908-935.
168. Pfeiffer S., *Produktivkraft konkret. Vom schweren Start der Leichtbauroboter: Marx und die Roboter, Vernetzte Produktion, Künstliche Inteligenz und lebendige Arbeit*, Dietz, Berlin, 2019, s. 156–177.
169. Pizoń J., Gola A., *Human–Machine Relationship – Perspective and Future Roadmap for Industry 5.0 Solutions*, „Machines” 2023, 11 (2), s. 203.
170. PN-EN ISO 10218-1:2011.
171. Pochtowski A., *Zarządzanie zasobami ludzkimi*, Warszawa 2003, s. 110.
172. Podręcznik MTM-1. Dokument podstawowego kursu nauki, niemieckie stowarzyszenie MTM, 2017, Hamburg.
173. *Polska w czołówce branży automotive*, <https://www.goldenline.pl/centrumkariery/polska-w-czolowce-branzy-automotive>, 27.06.2022.
174. Polskie Stowarzyszenie MTM, MTM-1, 2017, *Rozwój historyczny Systemu Podstawowego MTM aż po System Bloków Procesu MTM*, 9.10.2017, Wrocław.

175. Prędką E., *Rotacja stanowisk*, „Personel Plus” 2016, nr 10 (107), s. 8–12.
176. Pulat B. M., Pulat P. K., *A workstation assessor for crew operations – WOSTAS*, „International Journal of Man-Machine Studies” styczeń 1985, t. 22, nr 1, s. 103–126.
177. Rakowska A., Juana-Espinosa S., Mendryk I., *Well-being and job satisfaction of employees aged 50+, perceived organizational support for development and innovation*, „Argumenta Oeconomica”, 2020, No 1 (44), s. 143–172.
178. Rao D., *Single and Mixed-model Assembly Line Balancing Methods for both Deterministic and Normally Distributed Work Element Times*, M.S. Thesis, Industrial Engineering Department, Oregon State University, 1971.
179. Raouf A., Tsui C.L., *A new method for assembly line balancing having stochastic work elements*, „Computers & Industrial Engineering” 1982, vol. 6, nr 2, s. 131–148.
180. REFA Group, 2003, Standardowo metody organizacji. Moduł 3210336, s. 2, 15.04.2008, Poznań.
181. Reifur B., Król P., *Narzędzia programowe w ergonomicznej ocenie stanowiska montażowego jako moduł systemu doradczego*, „Technologia i Automatyzacja Montażu”, vol. nr 3, 2012, s. 28–32.
182. Roberts S., Villa C., *On a Multiproduct Assembly Line Balancing Problem*, „AIIE Transactions” 1970, 2, s. 361–364.
183. Rohmert W., *Arbeitswissenschaft. Umdruck zur Vorlesung*, Institut für Arbeitswissenschaft der technischen Hochschule Darmstadt, 1989.
184. Rohmert W., *Formen menschlicher Arbeit*, [w:] w. Rohmert, J. Rutenfranz (Hrsg.), *Praktische Arbeitsphysiologie*, Georg Thieme, Stuttgart–New York 1983.
185. Roman-Liu D., Tokarski T., *Ocena obciążenia statycznego z zastosowaniem metody OWAS*, „Bezpieczeństwo Pracy: nauka i praktyka”, vol. nr 7/8, 2010, s. 28–31.
186. Rostek M., Knosala R., *Badanie produktywności procesów logistycznych w przedsiębiorstwie produkcyjnym*, „Zarządzanie Przedsiębiorstwem” 2014, vol. 17, nr 1, s. 41–48, <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-4481f468-8f02-4c93-a6a1-24e688e8e8e8>, 2014.
187. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z 6 czerwca 2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia

- w środowisku pracy (Dz. U. z 2018 r. poz. 1286); Ustawa z 25 lutego 2011 r. o substancjach chemicznych i ich mieszaninach (Dz. U. z 2018 r. poz. 143, z późn. zm.).
188. Rzeszotarska-Wyrwicka M., *Organizowanie systemów pracy*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
189. Sabadka D. i in., *Optimization of Production Processes Using the Yamazumi Method*, „Advances in Science and Technology. Research Journal”, 2017, 11.4, s. 175–182, <https://doi.org/10.12913/22998624/80921>, <http://www.astrj.com/Optimization-of-Production-Processes-Using-the-Yamazumi-Method,80921,0,2.html>, 5.12.2017.
190. Sadowski J., *Kształtowanie klimatu akustycznego środowiska i jego ochrona przed hałasem i drganiami*, „Prace Instytutu Techniki Budowlanej” 1999, 28.2-3, s. 50–61.
191. Salveson M. E., *The assembly line balancing problem*, „The Journal of Industrial Engineering” 1955, 6, s. 18–25.
192. Salveson M. E., *The assembly line balancing problem*, „The Journal of Industrial Engineering” 1955, vol. 6, s. 18–25.
193. Sameh M., Mike D. B., *Comprehensive Simulation Analysis of a Flexible Hybrid Assembly System*, „Integrated Manufacturing Systems” 1998, 9, 3, s. 156–167.
194. Samui P., Sekhar S., Balas V. E., *Handbook of Neural Computation*, „Academic Press” 2017, s. 239–267.
195. Sasin M., *O wskaźnikach (KPI) i dashboardach w zarządzaniu*, Akademia Rozwoju Kompetencji, <https://www.ark-doradztwo.pl/czytelnia/o-wskaznikach-kpi-i-dashboardach-w-zarzadzaniu/>, 5.06.2019
196. Sato T. O., Coury H. J., *Evaluation of musculoskeletal health outcomes in the context of job rotation and multifunctional jobs*, „Appl. Ergon.” 2009, 40 (4), s. 707–712.
197. Schofield N. A., *Wyważanie linii montażowych i zastosowanie technik komputerowych*, „Komputery i inżynieria przemysłowa” 1979, t. 3, nr 1, s. 53–69.
198. Scholl A., *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*, Physica-Springer Verlag, Heidelberg 1999.
199. Scholl A., Becker C., *State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing*, „European Journal of Operational Research” 2006, 168, s. 666–693.

200. Scholl A., Becker C., *State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing*, „European Journal of Operational Research” 2006, 168, s. 666–693.
201. Scholl A., Klein R., *Balancing assembly lines effectively – A computational comparison*, „European Journal of Operational Research” 1999, 114, s. 50–58.
202. Scholl A., Klein R., *SALOME: A bidirectional branch and bound procedure for assembly line balancing*. *INFORMS*, „Journal on Computing” 1997, 9, s. 319–334.
203. Schreibers K. B. J., Groot J. P. De, Tuil W. Van, *Jak zaprojektować zadania rotacyjne w ramach zadań*, [w]: R. N. Pikaar, E. Koningsveld, P. Settels (red.), *Meeting Diversity in Ergonomics*, Elsevier Science, Amsterdam 2006.
204. Sidor-Rządowska M., *Intermentoring, jako forma dialogu międzypokoleniowego we współczesnych organizacjach*, „Edukacja Ekonomistów i Menedżerów”, 2017, 1 (43), s. 71-82.
205. Sławińska M., Butlewski M., *Efficient control tool of work system resources in the macro-ergonomic context*, „Advances in social and organizational factors” 2014, s. 226–234.
206. Sniedovich M., *Analysis of a Preference Order Assembly Line Problem*, „Management Science” 1981, 27, s. 1067–1080.
207. Sobaszek Ł., Gola A., Świć A., *Kierunki rozwoju robotyki w aspekcie projektowania współczesnych systemów produkcyjnych*, „Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji”, 2017, 1, s. 460-471.
208. Sphicas G., Silverman F., *Deterministic Equivalents for Stochastic Assembly Line Balancing*, „AIIE Transactions” 1976, 8, s. 280–282.
209. Staníc M. H. W., *Fahrzeugendmontage – Herausforderung für den demografischen Wandel*, „Sträter” 2010, Band 8, University Press, Kassel 2010.
210. Stegmann J., *Leistungsphysiologie: Physiologische Grundlagen der Arbeit und des Sports. 4. überarbeitete Auflage*, Thieme, Stuttgart–New York 1991.
211. Sternatz J., *Enhanced multi-Hoffmann heuristic for efficiently solving real-world assembly line balancing problems in automotive industry*, „European Journal of Operational Research” 2014, 235, s. 740–754.
212. Stoller A., *Lean CEO. W drodze do doskonałości*, MT Biznes, Warszawa 2015.

213. Streichert T., Traub M., *Elektrik/Elektronik-Architekturen im Kraftfahrzeug*, Springer, Heidelberg 2012.
214. Suszyński M., *Mechanical Assembly Sequence Determination Using Artificial Neural Networks Based on Selected DFA Rating Factors*, „Symmetry” 2022, vol. 14, nr 5, s. 1013–1–1013–13.
215. Ślęzok G., *Hałas w środowisku pracy. Badania, pomiary, szkolenia bhp*, <http://bhpspec.com/2015/06/halas-w-srodowisku-pracy-badania-pomiary-szkolenia-bhp/>, 8.06.2015.
216. Thimsen J. S., *Czwarta rewolucja przemysłowa*, <https://polskiprzemysl.com.pl/zarzadzanie/czwarta-rewolucja-przemyslowa/>, 8.09.2014.
217. Thommen J.-P., Achleitner A.-K., *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 7. voll-ständig überarbeitete Auflage*, Gabler, Springer, Wiesbaden 2012.
218. Thomopoulos N., *Mixed Model Line Balancing with Smoothed Station Assignments*, „Management Science” 1970, 16, s. 593–603.
219. Tonge D. P., *A heuristic program for assembly line balancing*, Prentice-Hall Inc., 1961.
220. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*, 2015, <https://sdgs.un.org/2030agenda>, 27.09.2015.
221. Trommnau J., Frommknecht A., Siegert J., Wößner J., Bauernhansl T., *Design for Automatic Assembly: A new Approach to Classify Limp Components*, „Procedia CIRP” 2020, 91, s. 49–54.
222. *Trudna przyszłość branży moto w Polsce*, <https://filarybiznesu.pl/trudna-przyszlosc-branzy-moto-w-polsce/a15584>, 7.06.2022.
223. Trzecieliński S., Włodarkiewicz-Klimek H., Pawłowski K., *Współczesne koncepcje zarządzania*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013.
224. Tucker P., Sytnik N., Macdonald I., Folkard S., *Temporaldeterminants of accident risk: the ‘2–4 h shiftphenomenon’*, [w:] Hornberger S., Knauth P., Costa G., Folkard S., *Shiftwork in the 21st Century*, Peter Lang, Frankfurt, 2000, s. 99–105, https://www.researchgate.net/publication/8001985_Shiftwork_Safety_Sleepiness_and_Sleep, 1.02.2005.
225. Tucker P., *The impact of rest breaks upon accident risk, fatigue and performance: a review*, „Work & Stress”, 2003, 17 (2), s. 123–137.

226. Ulich E., *Arbeitspsychologie. 6. überarbeitete und erweiterte Auflage*, Schäffer-Poeschel Verlag, Zürich 2005.
227. Vilarinho P., Simaria A., *A Two-stage Heuristic Method for Balancing Mixed-model Assembly Lines with Parallel Workstations*, „International Journal of Production Research” 2002, 40, s. 1405–1420.
228. Vogt J., Lambrecht J., Steudle D., *Pausennahme und psychosomatische Beschwerden bei pädagogischen Mitarbeitern aus Sicht der Betroffenen*, „Zeitschrift für Arbeitswissenschaft“ 2014, 68 (1), s. 27–34.
229. Waclawik Ł., *Zastosowanie wykresu yamazumi w analizie wartości dodanej procesu pracy*, <https://doi.org/10.15678/ZNUEK.2020.0990.0604>, <https://zeszyty-naukowe.uek.krakow.pl/article/view/2082>), 1.01.2020.
230. Walaszczyk A., Koszewska M., *Zarządzanie przedsiębiorstwem wobec współczesnych wyzwań technologicznych, społecznych i środowiskowych*, Łódź 2021.
231. Weise F., Bruder R., 2015, *Investigation of attitude of production workers towards job rotation in automotive industry against the background of demographic change*, ICHFE2015, 17th International Conference on Human Factors and Ergonomics, 13.04.2015, Daventry, <https://www.waset.org/abstracts/29275>, 6.08.2015.
232. Włodarczykiewicz-Klimek H., *Koncepcja i modele zwinnego przedsiębiorstwa*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Organizacja i Zarządzanie” 2016, nr 71, s. 214.
233. Woods D., Fisher D., Andres R., *Minimizing fatigue during repetitive jobs: Optimal work rest schedules*, „Human Factors” 1997, 39, s. 83–101.
234. Wójcik P., *Znaczenie studium przypadku jako metody badawczej w naukach o zarządzaniu*, „E-mentor”, 2013, nr 1(48), www.e-mentor.edu.pl/arttykul/index/numer/48/id/983, 4.03.2015.
235. Wyrwicka M., Jaźwińska D., *Percepcja uwarunkowań rozwoju przedsiębiorstw*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, *Ekonomia i Zarządzanie*, 2014, 6.2, s. 259–275, file:///C:/Users/marek/Downloads/Percepcja_uwarunkowa%C5%84_rozwoju_przed.pdf, 19.02.2014.

236. Xu Z., Ko J., Cochran D. J., Jung M., *Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models*, „Computers & Industrial Engineering” 2012, 62, s. 431–441.
237. Zientek K., *Wykres Yamazumi – jedno z narzędzi wykorzystywanych w firmach motoryzacyjnych*, <https://leanaction.pl/2019/12/17/wykres-yamazumi-jedno-z-narzedzi-wykorzystywanych-w-firmach-motoryzacyjnych/>, 17.12.2019.
238. Żurek J., Ciszak O., Cieślak R., Suszyński M., *Dobór metod badania czasu pracy w procesie montażu*, „Technologia i automatyzacja montażu” 2007, nr 2 i 3, s. 30–35.
239. Żurek J., Ciszak O., Cieślak R., Suszyński M., *Metody badania czasu pracy w procesie montażu*, „Technologia i automatyzacja montażu” 2006, nr 3, s. 43–46.
240. Żurek J., Pastwa M., *Heurystyczny program balansowania linii montażowej*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika” 1992, nr 97, s. 21–27.

Spis tabel

Tabela 1. Porównanie metod używanych w balansowaniu linii, które uwzględniają aspekty ergonomiczne.	42
Tabela 2. Metody oceny (wraz z normami) w zależności od typów obciążeń ciała.	82
Tabela 3. Czynniki w miejscu pracy.	91
Tabela 4. Ranking środków zaradczych w celu redukcji rozrzutu czasu.	111
Tabela 5. Wyniki czynników – ergonomiczne balansowanie (sortowanie według średniej)	
Źródło: opracowanie własne.	114
Tabela 6. Skala z punktacją.	118
Tabela 7. Zestawienie sumy punktów i określenie hierarchii ważności czynników.	119
Tabela 8. Hierarchia czynników i kryteria uwzględnione w modelu ergonomicznego balansowania linii.	123
Tabela 9. Wyniki czynników – organizacja rotacji pracowników (sortowanie według średniej).	125
Tabela 10. Wyniki czynników – partie ciała narażone na obciążenia (sortowanie według średniej).	128
Tabela 11. Proponowany system rotacji. Przydział stanowiska do pracownika.	165
Tabela 12. Obciążenie partii dla obszaru „1”.	167
Tabela 13. Obciążenie partii mięśni dla obszaru „17”.	168
Tabela 14. Przydział pracownika do stacji roboczej.	169
Tabela 15. Rozkład punktów ryzyka ergonomicznego (EAWS).	170
Tabela 16. Rotacja pracowników w wariancie 3.	172
Tabela 17. Karta do kontroli kontrolowania obciążenia poszczególnych partii mięśni.	185
Tabela 18. Gradacja punktów i priorytety.	187
Tabela 19. Gradacja punktów i priorytety dla T1 i T2.	189
Tabela 20. Arkusz do oceny zbalansowania linii montażowej.	190
Tabela 21. Zakresy zbalansowania linii montażowej.	192
Tabela 22. Rotacja pracowników i podział punktów ryzyka ergonomicznego.	199
Tabela 23. Karta kontrolna rotacji pracy z podziałem obciążenia poszczególnych partii mięśni.	200

Tabela 24. Wynik punktacji z balansowania linii przed zastosowaniem modelu.	201
Tabela 25. Wynik punktacji z balansowania linii po zastosowaniu modelu.	202

Spis rysunków

Rysunek 1. Umieszczenie luki badawczej w analizowanych zagadnieniach	18
Rysunek 2. Schemat badawczy	21
Rysunek 3. Struktura realizacji rozprawy.	24
Rysunek 4. Schemat blokowy algorytmu Kottasa–Lau.	36
Rysunek 5. Schemat blokowy algorytmu mrówek.....	39
Rysunek 6. Systemy produktywności	59
Rysunek 7. Przykład wykresu Yamazumi.....	69
Rysunek 8. Operator w pozycji siedzącej w urządzeniu Chairless Chair.	95
Rysunek 9. Robot współpracujący z człowiekiem w fabryce Volkswagena.	97
Rysunek 10. Rozrzut czasu. Źródło: opracowanie własne.	105
Rysunek 11. Rozrzut czasu. Źródło: opracowanie własne.	106
Rysunek 12. Rodzaje karoserii.....	107
Rysunek 13. Przykładowa karta stanowiska pracy z subiektywną oceną.	153
Rysunek 14. Przykładowa karta pracownika	154
Rysunek 15. Layout, zespół 1.	156
Rysunek 16. Dane wejściowe dla scenariusza 1	161
Rysunek 17. Przykładowa karta stanowiska pracy	162
Rysunek 18. Przykładowa karta pracownika.	163
Rysunek 19. Widok środowiska PyCharm Community.....	164
Rysunek 20. Zmienna odpowiadająca rozproszeniu średnich dziennych obciążeń pracą.	171
Rysunek 21. Wariant 1 i wariant 2.	172
Rysunek 22. Poziomy potrzeb w celu otrzymania i zachowania proergonomicznego zbalansowania linii montażowej	175
Rysunek 23. Model ergonomicznego balansowania linii montażowej.	184
Rysunek 24. Kryteria do oceny zbalansowania linii produkcyjnej.	186

Rysunek 25. Kryteria do ergonomicznego balansowania linii. Podział kryteriów dotyczących marnotrawstwa.	188
Rysunek 26. Zastosowanie wykresu Yamazumi do wizualizacji obciążenia poszczególnych partii mięśni na danym stanowisku pracy.	195
Rysunek 27. Rotacja pracowników przed zastosowaniem algorytmu dla ergonomicznej rotacji, scenariusz 2.	197
Rysunek 28. Rotacja dla wybranego pracownika z uwzględnieniem propozycji ergonomicznej rotacji, scenariusz 2.	198
Rysunek 29. Zastosowanie modelu.	205

Spis wykresów

Wykres 1. Zastosowanie metody do redukcji rozrzutu czasu.	107
Wykres 2. Wyniki czynników – ergonomiczne balansowanie	115
Wykres 3. Analiza gradacyjna wraz z analizą skupień	116
Wykres 4. Wyniki czynników – organizacja rotacji pracowników.....	126
Wykres 5. Analiza gradacyjna wraz z analizą skupień.	127
Wykres 6. Wyniki czynników – partie ciała narażone na obciążenia	129
Wykres 7. Analiza gradacyjna wraz z analizą skupień..	130
Wykres 8. Rotacja pracowników, pytanie 1.....	131
Wykres 9. Rotacja pracowników, pytanie 2.....	132
Wykres 10. Rotacja pracowników, pytanie 3.....	132
Wykres 11. Rotacja pracowników, pytanie 4.....	133
Wykres 12. Rotacja pracowników, pytanie 5.....	133
Wykres 13. Rotacja pracowników, pytanie 6.....	134
Wykres 14. Rotacja pracowników, pytanie 7.....	134
Wykres 15. Rotacja pracowników, pytanie 9.....	135
Wykres 16. Rotacja pracowników, pytanie 10.....	135
Wykres 17. Rotacja pracowników, pytanie 11.....	136
Wykres 18. Rotacja pracowników, pytanie 12.....	136
Wykres 19. Rotacja pracowników, pytanie 13.....	137
Wykres 20. Rotacja pracowników, pytanie 14.....	138
Wykres 21. Rotacja pracowników, pytanie 15.....	138
Wykres 22. Rotacja pracowników, pytanie 16.....	139
Wykres 23. Rotacja pracowników, pytanie 17.....	139
Wykres 24. Rotacja pracowników, pytanie 18.....	140
Wykres 25. Rotacja pracowników, pytanie 19.....	140
Wykres 26. Rotacja pracowników, pytanie 20.....	141
Wykres 27. Rotacja pracowników, pytanie 21.....	141
Wykres 28. Rotacja pracowników, pytanie 22.....	142
Wykres 29. Rotacja pracowników, pytanie 23.....	142

Wykres 30. Rotacja pracowników, pytanie 24.....	143
Wykres 31. Rotacja pracowników, pytanie 25.....	143
Wykres 32. Wyniki ankiety dotyczącej pracy z Chairless Chair	148
Wykres 33. Wykres obciążenia pracą za pomocą MTM oraz EAWS.	198

Spis załączników

Załącznik 1. Arkusz do obserwacji rozrzutu czasu na linii montażowej.	243
Załącznik 2. Kwestionariusz badań ankietowych – ocena czynników ergonomicznego balansowania.	244
Załącznik 3. Kwestionariusz badań ankietowych – ocena czynników przy rotacji pracowników, ocena obciążenia części ciała.	249
Załącznik 4. Scenariusz wywiadów – ocena czynników przy rotacji pracowników	251

Załącznik 1. Arkusz do obserwacji rozrzutu czasu na linii montażowej.

Obserwacje prowadzone w latach 2019–2022.

Lp.	Linia montażowa:	Data:		Data:		Data:		Data:											
		tak	nie	Uwagi	tak	nie	Uwagi	tak	nie	Uwagi									
	Zastosowana metoda redukcji czasu																		
	Środki zaradcze planowane																		
1.	Dostosowywanie tempa pracy																		
2.	Dostosowane ustawienie materiału																		
3.	Sekwencjonowanie wariantów																		
4.	Floater (skoczek)																		
5.	Pomoc brygadzysty																		
6.	Stanowiska z podmontażem części																		
7.	Bufory z podmontowanymi częściami																		
	Środki zaradcze nie planowane																		
8.	Zatrzymanie linii montażowej																		
9.	Przekanie czynności na linię poprawek																		
10.	Inne																		

Załącznik 2. Kwestionariusz badań ankietowych – ocena czynników ergonomicznego balansowania.

Ankieta 20.05.2022

Ocena ważności czynników podczas ergonomicznego balansowania linii montażowej – badanie eksperckie.

Nazywam się Marek Szkudlarek, pracuje jako Industrial Engineer i jestem doktorantem na Politechnice Poznańskiej. Moja praca doktorska dotyczy balansowania obciążeń ergonomicznych, jej temat to: "**Model ergonomicznego balansowania linii montażowej w produkcji pojazdów użytkowych**".

Poniżej znajduje się arkusz z pytaniami przeznaczony dla ekspertów z działów przygotowania produkcji (IE/planowanie). Celem przeprowadzenia badania jest pozyskanie informacji na temat ergonomicznego balansowania linii produkcyjnej w kontekście zakończenia tego przedsięwzięcia z sukcesem. Ankieta składa się z dwóch części: 10 pytań ogólnych oraz 30 pytań dotyczących ważności czynników podczas balansowania linii produkcyjnej. Badanie jest całkowicie anonimowe, a jego wypełnienie zajmie Państwu nie więcej niż 10 minut.

Dziękuję za poświęcony czas.

Część I, Pytania ogólne:

Pytanie 1: Wiek:

- a) < 25
- b) 26-35
- c) 36-45
- d) 46-55
- e) 56-65
- f) > 65

Pytanie 2: Płeć:

- e) kobieta
- f) mężczyzna
- g) divers

Pytanie 3: Staż pracy:

- e) < 1
- f) 1-3 lat
- g) 4-6 lat
- h) 7-10 lat
- i) 11-15 lat
- j) > 15 lat

Pytanie 4: Stanowisko w pracy:

- f) praktykant, stażysta
- g) specjalista (doświadczenie < 5 lat w dziedzinie ergonomii i planowania procesów)
- h) expert (doświadczenie > 5 lat w dziedzinie ergonomii i planowania procesów)
- i) stanowisko kierownicze
- j) inne

Pytanie 5: Dział w jakim Pani/Pan pracuje:

- f) produkcja
- g) personalny
- h) IE
- i) planowanie
- j) inny

Pytanie 6: Wielkość zakładu pracy:

- e) poniżej 50 zatrudnionych
- f) od 50 do 250 zatrudnionych
- g) od 250 do 1000 zatrudnionych
- h) > 1000 zatrudnionych

Pytanie 7: Branża

- a) przemysł samochodowy
- b) inna

Pytanie 8: W jakim kraju znajduje się przedsiębiorstwo?

- a) Niemcy
- b) Polska
- c) inne

Pytanie 9: Czy w firmie znajduje się dział/zespół ds. ulepszania procesów produkcyjnych?

- a) tak
- b) nie

Pytanie 10: Czy w firmie znajduje się dział/zespół ds. ergonomii?

- a) tak
- b) nie

Część II

Proszę o określenie Pani/Pana opinii o ważności wymienionych czynników podczas balansowania linii montażowej w kontekście zakończenia tych przedsięwzięć z sukcesem. Poniżej zostały zdefiniowane trzy obszary (**ogólne procesy optymalizacji**, ergonomia, produktywność), które mają znaczenie dla osiągnięcia równowagi linii montażowej.

Skala oceny ważności czynnika:

1 – bardzo mała ważność; 2 – mała ważność, 3 – średnia ważność, 4 – duża ważność, 5 – bardzo duża ważność.

Pytania ogólne dotyczące ergonomicznego balansowania linii montażowej:

Lp.	Czynnik:	Ocena ważności:				
		1	2	3	4	5
1.	Wyznaczenie metody i sposoby pracy (np. zdefiniowanie pozycji chwytania).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.	Wyznaczenie najbardziej korzystnego przydziału operacji do stanowisk w trakcie montażu w celu minimalizacji rozrzutów czasu.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.	Zapewnienie braków postojów na stacjach roboczych.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4.	Wyznaczenie i tworzenie stanowisk dla pracowników z niepełnosprawnością ruchową, pracowników o mniejszej wydajności.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5.	Wspomaganie pracownika środkami techniki (manipulatory).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6.	Wyznaczenie harmonogramu realizacji przedsięwzięcia w celu skrócenia czasu wykonywania poszczególnych czynności.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7.	Wyznaczenie/planowanie budżetu przedsięwzięcia (skrócenie czasu wykonywania czynności montażowych).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8.	Powołanie kompetentnego zespołu realizującego przedsięwzięcie (skrócenie czasu wykonywania czynności montażowych).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9.	Dobór kompetentnych członków zespołu ds. optymalizacji procesów.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10.	Zapewnienie pełnego wsparcia najwyższego kierownictwa w działalność komórki ds. optymalizacji procesów.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ergonomia:

Proszę o określenie Pani/Pana opinii o ważności wymienionych czynników podczas balansowania linii montażowej w kontekście zakończenia tych przedsięwzięć z sukcesem. Poniżej zostały zdefiniowane trzy obszary (ogólne procesy optymalizacji, **ergonomia**, produktywność), które mają znaczenie dla osiągnięcia równowagi linii montażowej.

Skala oceny ważności czynnika:

1 – bardzo mała ważność; 2 – mała ważność, 3 – średnia ważność, 4 – duża ważność, 5 – bardzo duża ważność.

Lp.	Czynnik:	Ocena ważności:				
		1	2	3	4	5
11.	Zapewnienie minimalizacji narażenia pracownika na urazy wynikające z wykonywania zadań.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12.	Mapowanie stanowisk o najwyższym stopniu zagrożeń biomechanicznych.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13.	Wyznaczenie rotacji na stanowiskach, która zbalansuje obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14.	Określenie całościowego wyniku obciążenia na układ mięśniowo- szkieletowego dla danego pracownika.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15.	Określenie całościowego wyniku obciążenia na układ mięśniowo- szkieletowego dla danego stanowiska pracy.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16.	Zapewnienie prawidłowych czynników fizycznych (oświetlenie, hałas) na miejscu pracy.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17.	Skorelowanie stanowisk z antropometrią pracowników.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18.	Dostosowanie biomechanicznego obciążenia pracy do konkretnego pracownika.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19.	Wyznaczenie harmonogramu realizacji przedsięwzięcia w celu poprawy warunków pracy.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20.	Wyznaczenie/planowanie budżetu przedsięwzięcia (poprawa warunków ergonomicznych).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

21.	Powołanie kompetentnego zespołu realizującego przedsięwzięcie (poprawa warunków ergonomicznych).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22.	Dobór kompetentnych członków zespołu ds. ergonomii.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23.	Zapewnienie pełnego wsparcia najwyższego kierownictwa w działalność komórki ds. ergonomii.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24.	Zapewnienie możliwości skorzystania przez dział planowania procesów z doradztwa działu zdrowia, bhp lub z zewnętrznego doradztwa przy projektowaniu stanowisk pracy.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25.	Priorytetowe traktowanie bezpieczeństwa pracowników w przedsiębiorstwie.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Produktywność:

Proszę o określenie Pani/Pana opinii o ważności wymienionych czynników podczas balansowania linii montażowej w kontekście zakończenia tych przedsięwzięć z sukcesem. Poniżej zostały zdefiniowane trzy obszary (ogólne procesy optymalizacji, ergonomia, **produktywność**), które mają znaczenie dla osiągnięcia równowagi linii montażowej.

Skala oceny ważności czynnika:

1 – bardzo mała ważność; 2 – mała ważność, 3 – średnia ważność, 4 – duża ważność, 5 – bardzo duża ważność.

Lp.	Czynnik:	Ocena ważności:				
		1	2	3	4	5
26.	Mapowanie wartości dodanej i marnotrawstw.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
27.	Wprowadzenie pracy zmianowej.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
28.	Dążenia do bezinwestycyjnej racjonalizacji, czyli do polepszania warunków systemów pracy przy stosunkowo małych nakładach inwestycyjnych.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
29.	Zapewnienie kompromisów między celami ekonomicznymi i ergonomicznymi.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
30.	Ustalenie możliwych do monitorowania kryteriów i wskaźników oceny działalności komórek ds. procesów produkcyjnych i ergonomii.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Załącznik 3. Kwestionariusz badań ankietowych – ocena czynników przy rotacji pracowników, ocena obciążenia części ciała.

Ankieta 20.05.2022

Nazywam się Marek Szkudlarek, pracuje jako Industrial Engineer i jestem doktorantem na Politechnice Poznańskiej. Chciałbym serdecznie zachęcić Państwa do wypełnienia poniżej ankiety, dzięki której zgromadzę informacje niezbędne do napisania pracy doktorskiej - "**Model ergonomicznego balansowania linii montażowej w produkcji pojazdów użytkowych**", która dotyczy balansowania obciążeń ergonomicznych. Ankieta dla liderów na montażu odpowiedzialnych za organizację rotacji pracowników. Proszę o odpowiedź na pytania bez uwzględniania ograniczeń nałożonych przez COVID. Wyniki będą wykorzystywane do wygenerowania algorytmu pozwalającego na uzyskanie wygładzenia obciążenia ergonomicznego pracowników. Badanie jest całkowicie anonimowe, a jego wypełnienie zajmie Państwu nie więcej niż 10 minut. Dziękuję za poświęcony czas.

Część I

Proszę o określenie Pani/Pana opinii o ważności wymienionych czynników podczas planowania/wyznaczania rotacji pracowników.

Skala oceny ważności czynnika:

1 – bardzo mała ważność; 2 – mała ważność, 3 – średnia ważność, 4 – duża ważność, 5 – bardzo duża ważność.

Pytania dotyczące

Lp.	Czynnik:	Ocena ważności:				
		1	2	3	4	5
1.	Uwzględnianie ryzyka ergonomicznego za pomocą metody EAWS (punkty ergo)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.	Uwzględnianie ryzyka ergonomicznego za pomocą subiektywnej oceny (przez ergonomistę)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.	Uwzględnianie stanu zdrowia pracownika przez lekarza medycyny pracy	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4.	Uwzględnianie zmiany stanowiska pracy kilka razy w ciągu dnia roboczego	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5.	Uwzględnianie obciążenia poszczególnych partii mięśni podczas rotacji	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6.	Monitorowanie rotacji pracownika w ciągu tygodnia	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7.	Monitorowanie rotacji pracownika w ciągu miesiąca	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8.	Uwzględnianie wieku pracownika	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9.	Uwzględnianie płci pracownika	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10.	Zdrowi pracownicy nie powinni pracować zmianą po zmianie na ciężkim stanowisku (stanowisko krytyczne)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

11.	Pracownik mający problemy z daną grupą mięsi nie powinien pracować na stanowisku obciążające tą partię ciała	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12.	Pracownicy powinni znać wszystkie stanowiska w zespole roboczym	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13.	Nieergonomiczne stanowiska powinny być omawiane i optymalizowane podczas warsztatów optymalizujących produkcje	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Część II

Proszę o określenie

Pytania dotyczące

Proszę o określenie Pani/Pana opinii, które partie ciała są narażone najbardziej na obciążenia podczas wykonywania zadań w twoim zespole?

Skala oceny ważności czynnika:

1 – bardzo niskie obciążenie; 2 – niskie obciążenie, 3 – średnie obciążenie, 4 – duże obciążenie, 5 – bardzo duże obciążenie.

Lp.	Obciążenie partii ciała, mięśnie, postawa podczas pracy:	Ocena obciążenia:				
		1	2	3	4	5
14.	głowa/szyja	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15.	staw barkowy	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16.	biceps	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17.	przedramię	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18.	plecy/kręgosłup	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19.	staw łokciowy	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20.	nadgarstek	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21.	kciuk	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22.	palec wskazujący	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23.	tułów (przy skręcie bocznym)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24.	kolano	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25.	stopa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Załącznik 4. Scenariusz wywiadów – ocena czynników przy rotacji pracowników

Część I. Pytania ogólne:

Pytanie 1: Ilu pracowników pracuje w twoim teamie?

- a) Liczba pracowników netto (bez lidera)...

Pytanie 2: Czy pracownicy znają wszystkie stanowiska pracy w teamie?

- a) pracownicy znają wszystkie stanowiska
b) 80% zespołu zna wszystkie stanowiska
c) 60% zespołu zna wszystkie stanowiska
d) mniej niż 50% osób zna wszystkie stanowiska pracy

Pytanie 3: Jak często pracują pracownicy z innych linii w teamie (skoczki)?

- a) 1–2 dni w miesiącu lub wcale
b) 3–5 dni w miesiącu
c) 6–10 dni w miesiącu
d) więcej, ile...

Pytanie 4: Ile kobiet pracuje w teamie?

- a) Proszę podać liczbę kobiet, które pracują w twoim teamie:...

Pytanie 5: Ile osób w wieku powyżej 50 r. ż. pracuje w teamie?

- a) Proszę podać liczbę osób w tym wieku, które pracują w twoim teamie:...

Pytanie 6: Czy płeć pracownika ma wpływ na przedzielanie stanowiska pracy?

- a) tak
b) nie

Pytanie 7: Czy wiek pracownika ma wpływ na przydzielanie stanowiska pracy?

- a) tak
b) nie

Pytanie 8: Jeżeli tak, to jaki wiek pracownika wpływa na tę decyzję?

- a) nie dotyczy
- b) proszę podać wiek...

Pytanie 9: Na jaki okres ustalany jest harmonogram rotacji?

- a) dla konkretnej zmiany
- b) dla danego dnia
- c) dla danego tygodnia
- d) pracownicy rotują ze stacji na stację bez konkretnego planu rotacji
- e) inna forma

Pytanie 10: Czy podczas ustalania równowagi linii montażowej są brane pod uwagę kwestie związane z ergonomiczną rotacją (np. dyskusje podczas warsztatów KVP)?

- a) tak
- b) nie

Pytanie 11: Liczba punktów ergo jest obliczana przez dział IE. Czy ergonomia stanowisk pracy jest dodatkowo oceniana przez ergonomistę (np. ocena subiektywna) lub dział bezpieczeństwa pracy?

- a) tak
- b) nie

Pytanie 12: Czy w odczuciu pracowników linii produkcyjnej stanowiska żółte (potencjalnie krytyczne) lub zielone (niekrytyczne) są cięższe od tych wycenionych jako czerwone (krytyczne)?

- a) tak
- b) nie

Część II. Pytania o rotację:

Pytanie 13: Ile razy pracownik rotuje w ciągu zmiany roboczej (średnia na team). Zmiana robocza → 8h.

- a) pracownicy nie rotują w ciągu dnia
- b) rotacja na 2 stanowiskach w ciągu zmiany roboczej
- c) rotacja na 3 stanowiskach w ciągu zmiany roboczej
- d) rotacja na 4 stanowiskach w ciągu zmiany roboczej

e) jeżeli częściej, to ile razy...

Pytanie 14: Czy pracownik pracuje przez dwie rotacje teamu po sobie na tym samym stanowisku?

a) tak

b) nie

Pytanie 15: Czy jest kontrolowane, na ilu stanowiskach pracownicy rotują w ciągu tygodnia?

a) tak

b) nie

Pytanie 16: Czy podczas ustalania rotacji bierze się pod uwagę ilość punktów ergo na stanowisku pracy?

a) tak

b) nie

Pytanie 17: Czy podczas ustalania rotacji bierze się pod uwagę, aby pracownik nie pracował zmianą po zmianie na stanowisku krytycznym (czerwonym)?

a) tak

b) nie

c) w moim teamie nie ma stanowisk krytycznych

Pytanie 18: Czy podczas ustalania rotacji bierze się pod uwagę, aby wraz ze zmianą stanowiska dokonywać zmiany obciążenia poszczególnych partii mięśni?

a) tak

b) nie

Część III. Zdrowie pracowników

Pytanie 19: Czy w moim teamie znajdują się osoby, których ograniczenia zdrowotne są potwierdzone przez lekarza medycyny pracy?

a) tak

b) nie

Pytanie 20: Ilu takich pracowników jest w teamie?

a) nie dotyczy

- b) jeden
- c) dwóch
- d) trzech
- e) więcej, ile...

Pytanie 21: Najczęstsze schorzenia, które ograniczają rotacje na stanowiskach, to:

- a) ból kręgosłupa
- b) ból stawów
- c) problemy z kończynami dolnymi
- d) problemy z kończynami górnymi
- e) inne...

Pytanie 22: Czy w zespole istnieją specjalne miejsca pracy dla pracowników z ograniczeniami zdrowotnymi?

- a) tak
- b) nie

Część IV. Urządzenia techniczne

Pytanie 23: Czy pracownicy korzystają z manipulatorów/balanserów?

- a) tak
- b) nie
- c) nie zawsze
- d) w moim teamie nie ma manipulatora/balansera.

Pytanie 24: Czy pracownicy testowali egzoszkielety?

- a) tak
- b) nie

Pytanie 25: Czy pracowałeś na jednym stanowisku z robotem (MRK)?

- a) tak
- b) nie, obawiam się o swoje bezpieczeństwo
- c) nie wiem