

Marek DŹWIAREK

Central Institute for Labour Protection (Centralny Instytut Ochrony Pracy – PIB)

WDRAŻANIE PROCEDUR LOCKOUT/TAGOUT W SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH PRZEMYSŁU 4.0

Application of lockout/tagout procedures in production systems of Industry 4.0

Streszczenie: *Celem badań było opracowanie wytycznych i materiałów szkoleniowych wspomagających wdrażanie procedur LOTO w przemyśle 4.0. Przeprowadzone analizy systemów wytwórczych Przemysłu 4.0 wykazały, że wymagania dotyczące procedur LOTO różnią się od procedur stosowanych w systemach klasycznych. Opracowane wytyczne i materiały szkoleniowe zostały zweryfikowane podczas szkolenia pilotażowego. Średnia wartość liczby punktów w skali Likerta przekracza 4,4 wskaźnik I-CVI przeważnie przyjmuje wartość 1, a najmniejsza jego wartość to 0,86. Analiza statystyczna z wykorzystaniem testu t – studenta potwierdziła, że wytyczne i materiały szkoleniowe mają doskonałą trafność merytoryczną na poziomie ufności 0,05. Dotyczy to ich zawartości, użyteczności oraz kompleksowości i kompletności.*

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo maszyn, Przemysł 4.0, LOTO

Abstract: *The aim of the research was to develop guidelines and training materials to support the implementation of LOTO procedures in Industry 4.0. The analysis of manufacturing systems of Industry 4.0 showed that the requirements for LOTO procedures differ from those used in classical systems. The developed guidelines and training materials were verified during the pilot training. The mean value of the Likert scale score exceeds 4.4. The I-CVI index is mostly 1 and the lowest value is 0.86. Statistical analysis using Student's t-test confirmed that the guidelines and training materials have excellent content validity at the 0.05 confidence level. This applies to their content, usefulness, comprehensiveness and completeness.*

Keywords: Safety of machinery, Industry 4.0, LOTO

1. Wstęp

1.1. Systemy LockOut/TagOut (LOTO)

Według danych GUS w latach 2005–2015 przy wykonywaniu prac serwisowych (Proces pracy – kod 51, 52) corocznie miało miejsce ok. 50 wypadków śmiertelnych, ok. 100 wypadków ciężkich i ok. 10 tys. wypadków lekkich. Systemy Lockout/Tagout (LOTO) to zestaw specjalnych procedur i praktyk mających na celu ochronę pracowników przed energią uwalnianą przez obsługiwane maszyny lub zagrożeniami występującymi podczas bieżących czynności konserwacyjnych i utrzymania ruchu [23]. Wdrożenie systemu LOTO nie jest trudne, ale często przemysł ma problemy z jego wdrożeniem. Problemy, które pojawiają się głównie z powodu błędów ludzkich w prowadzeniu procedury, prowadzą do awarii pracy systemu [8, 9, 11, 22].

Procedury LOTO mają za zadanie zapewnienie bezpieczeństwa pracowników wykonujących prace serwisowe. Procedury te są obowiązkowe w USA i Kanadzie. Według dostępnych danych OSHA w 2014 r. odnotowano w USA 3 254 przypadki naruszeń w systemach typu LOTO, co oznacza, że jest to szósty najczęściej naruszany przepis. Przyczynami naruszeń były najczęściej:

- brak opracowania, udokumentowania lub wykorzystania procedur kontroli energii sprzętu,
- nieprzestrzeganie okresowych procedur kontroli,
- brak ustanowienia i wdrożenia pisemnego programu LOTO,
- brak szkolenia,
- brak technicznych możliwości blokowania urządzeń odłączających energię.

Badania w dziedzinie stosowania systemów LOTO dotyczą głównie analiz wypadków spowodowanych przez niewłaściwe zastosowanie tych procedur, analiz wdrożenia systemu LOTO oraz optymalizacji systemów produkcyjnych wykorzystujących mechanizm LOTO [11]. Dewi i Zebua [11] skupili się na przypadkach awarii systemu LOTO w energetyce elektrycznej. Celem badań była analiza incydentów spowodowanych przez awarie systemu. W wyniku badania wykazano, że pierwotne przyczyny awarii systemu LOTO były spowodowane czynnikami osobistymi, zawodowymi i zarządczymi. Podobną tematyką zajmowali się Badiane i in. W pracy [4] stwierdzają oni, że optymalizacja produkcji wymaga przeglądu polityki utrzymania obiektu. Wypadki podczas czynności konserwacyjnych są częste, czasami śmiertelne i często związane z wadliwym lub nieobecny LOTO maszyn. LOTO jest często omijany w celu uniknięcia tego, co może być postrzegane jako niepotrzebne opóźnienia i zwiększone koszty produkcji. Aby zmniejszyć zagrożenia związane z taką praktyką, zaproponowali strategię produkcji, która przewiduje LOTO maszyn przy jednoczesnej maksymalizacji dostępności systemu produkcyjnego i minimalizacji kosztów. Wykazano również, że optymalizacja procedur LOTO jest szczególnie ważna, gdy urządzenia są stosunkowo nowe, a poziom zapasów jest minimalny. Natomiast Ravi i in. zajmowali się problematyką implementacji LOTO w przemyśle papierniczym. W pozycji [26] zidentyfikowali wiele procesów o niebezpiecznych energiach w ramach elektrycznych i mechanicznych prac konserwacyjnych. Stwierdzili, że niebezpieczne energie, takie jak energia elektryczna, chemiczna, grawitacyjna, termiczna, hydrauliczna, ciśnieniowa itp. powinny być monitorowane ze

szczególnością uwagę. Przeanalizowali także wpływ błędów ludzkich podczas konserwacji prewencyjnej na optymalny poziom bezpieczeństwa. Dzięki udanemu wdrożeniu systemu LOTO zmniejszono koszty utrzymania ruchu, koszty zapasów oraz koszty awarii fabrycznych, a także częstotliwość i poziom ciężkości wypadków. Zhang i Liu przeanalizowali zdarzenia, których przyczyną było nieoczekiwane uwolnienie energii podczas produkcji i utrzymania w przemyśle kopalni węgla [37]. Wykazali, w jaki sposób kultura „zero w wypadkach” w przemyśle węglowym może być stosowana i utrzymywana poprzez przyjęcie systemu LOTO. Samuel i in. opracowali listę kontrolną LOTO do zastosowania w przedsiębiorstwach produkcyjnych [29]. Została ona sprawdzona pod względem rzetelności i dokładności międzybranżowej z wykorzystaniem odpowiedzi pracowników przedsiębiorstw i audytorów zewnętrznych. Wyniki wskazują, że lista kontrolna LOTO będzie przydatna w działaniach firm produkcyjnych zmierzających do oceny i doskonalenia ich programów LOTO. Ponadto wiarygodne narzędzie do autokontroli eliminuje potrzebę wizyt audytorów zewnętrznych w miejscach pracy, zwiększając tym samym możliwość dotarcia do odbiorców i interwencji przy jednoczesnej minimalizacji kosztów.

Zaprezentowane powyżej sposoby podejścia do problematyki LOTO obejmują szeroki obszar kwestii związanych ze stosowaniem tych systemów. W oczywisty sposób dotyczą one klasycznych systemów wytwórczych. Brak jest natomiast doniesień o pracach dotyczących problematyki LOTO w przemyśle 4.0.

1.2. Przemysł 4.0

Koncepcja Przemysłu 4.0 to nowa rzeczywistość współczesnej gospodarki, gdyż postępy w transformacji cyfrowej i rosnące wzajemne połączenia stanowią nowe wyzwania dla wielu organizacji [31]. Została początkowo zaproponowana w Niemczech w 2011 r. 28,34. Jej cechy charakterystyczne to wykorzystanie systemów cyber-fizycznych (CPS), opartych na heterogenicznej integracji danych i wiedzy. Zgodnie z Consortium II, Fact Sheet [10], Przemysł 4.0 to „integracja złożonych fizycznych maszyn i urządzeń z czujnikami i oprogramowaniem sieciowym, używanych do przewidywania, kontroli i planowania lepszych wyników biznesowych i społecznych”. Hermann i in. [16] definiują Przemysł 4.0 jako „zbiorcze określenie technologii i koncepcji organizacji łańcucha wartości”. Zauważają, że w ramach modułowej struktury inteligentnej fabryki w Przemysle 4.0, CPS monitoruje procesy fizyczne, tworzy wirtualną kopię świata fizycznego i podejmuje zdecentralizowane decyzje. Zwracają uwagę, że za pośrednictwem Internetu Rzeczy (IoT), CPS komunikuje się i współdziała ze sobą i z ludźmi w czasie rzeczywistym, a Internet Usług (IoS), zarówno wewnętrzny, jak i międzyorganizacyjny, jest oferowany i wykorzystywany przez uczestników łańcucha wartości. Jak dotąd nie ma jednomyślnie przyjętej definicji Przemysłu 4.0. Możemy jednak wskazać jego najistotniejsze komponenty, odróżniające od nadal jeszcze powszechnych zautomatyzowanych systemów produkcyjnych (3. rewolucja przemysłowa w latach 1980–1985). Według [16] są to:

- systemy cyber-fizyczne,
- Internet Rzeczy,
- Internet Usług,
- inteligentna fabryka.

Natomiast komunikacja maszyna–maszyna (M2M) i inteligentne produkty nie są niezależnymi komponentami Przemysłu 4.0, gdyż M2M jest elementem Internetu Rzeczy, a Inteligentne Produkty są elementem CPS. Podobnie zgodnie z Kagermannem [17] data mining i przetwarzanie w chmurze należy traktować jako usługi dla systemów, które wykorzystują dane generowane we wdrożeniach Przemysłu 4.0, ale nie jako jego niezależne komponenty. Przemysł 4.0 zwiększa komputeryzację produkcji za pomocą CPS, w którym połączone sieci ludzi i maszyn współdziałają i współpracują ze współdzielonymi i analizowanymi informacjami, wspieranymi przez duże zbiory dane i przetwarzanie w chmurze wzdłuż całych łańcuchów wartości [36]. W przemyśle 4.0 produkcja staje się bardziej elastyczna i efektywna [12, 16, 19, 20]. Przemysł 4.0 zwiększa efektywność kosztową i czasową oraz poprawia jakość produkcji poprzez stosowanie nowoczesnych technologii, metod i narzędzi wspomagających [3]. W rezultacie przemysł 4.0 przyspieszy rozwój, umożliwiając osiągnięcie bezprecedensowego poziomu efektywności operacyjnej i wzrostu wydajności [12, 16, 32]. Można założyć, że niebawem pojawią się nowe rodzaje zaawansowanych procesów produkcyjnych i przemysłowych opartych na współpracy między maszynami i ludźmi oraz symbiotycznej realizacji produktów.

1.3. Bezpieczeństwo pracy w przemyśle 4.0

Przemysł 4.0 obiecuje wzrost wydajności poprzez integrację cyfrowych systemów produkcji z analizą i komunikacją wszystkich danych generowanych w inteligentnym środowisku. Komunikacja w czasie rzeczywistym, duże zbiory danych, współpraca człowiek–maszyna, teledetekcja, monitoring i sterowanie procesem, autonomiczne urządzenia i połączenia międzysystemowe stają się głównymi atutami nowoczesnego przemysłu. Jako że czwarta rewolucja przemysłowa, czyli Przemysł 4.0, staje się dominującą rzeczywistością, przyniesie nowe zmiany paradygmatu, które będą miały wpływ na zarządzanie bezpieczeństwem i higieną pracy (BHP) [5]. Przemysł zaczyna wykorzystywać pozytywny wpływ na zdolność reagowania, autonomię i elastyczność zakładów produkcyjnych. Jednak żadna modyfikacja przemysłowego systemu produkcji nie powinna być rozważana bez szczegółowego omówienia potencjalnych skutków dla zdrowia i bezpieczeństwa pracowników. Przedsiębiorstwa, które wdrażają inteligentne fabryki, dążą do ograniczenia ryzyka związanego z planowaniem, określenia skutków, jakie nowa instalacja będzie miała dla pracowników, uniknięcia konieczności przeprojektowania sprzętu, zoptymalizowania wykorzystania zasobów, wyeliminowania marnotrawstwa oraz zwiększenia wydajności i elastyczności [1, 6, 30]. Analizy te nie muszą oznaczać korzyści w zakresie BHP, zwłaszcza w przypadku radykalnej zmiany organizacji pracy [7, 19, 27, 33]. Zaawansowane procesy produkcyjne mogą generować nowe zagrożenia w zakresie BHP, ale konwencjonalne narzędzia analizy ryzyka zawodowego wydają się niezdolne do identyfikacji tych pojawiających się zagrożeń. Często produkcja w przemyśle 4.0 jest klasyfikowana jako krytyczna pod względem bezpieczeństwa, na przykład ze względu na interakcje pomiędzy autonomicznymi maszynami a substancjami niebezpiecznymi, które mogą spowodować obrażenia lub śmierć człowieka, uszkodzenie maszyn, mienia lub środowiska. W celu wykazania dopuszczalnego bezpieczeństwa operacji produkcyjnych, kwestie bezpieczeństwa powinny być rozważane tak, aby zapewnić kompleksowe, logiczne i dające się obronić uzasadnienie bezpieczeństwa systemu produkcyjnego dla danego zastosowania w uprzednio zdefiniowanym środowisku pracy. Jednak budowa i utrzymanie

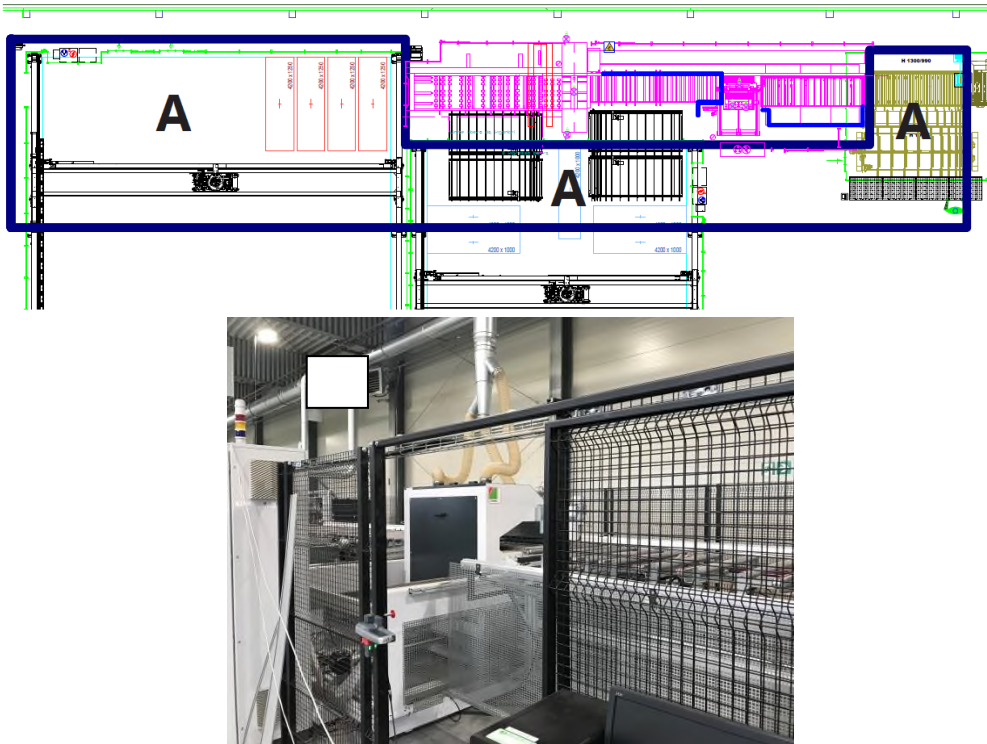
systemów bezpieczeństwa w przedsiębiorstwie Przemysłu 4.0 jest zadaniem złożonym. Do ich budowy, oprócz modułowej, dynamicznej i konfigurowalnej natury Przemysłu 4.0, należy uwzględnić architekturę IoT i chmury obliczeniowej. Kaivo-Oja i in. [18] badali wpływ IoS, Big data i innych kluczowych fal technologicznych czwartej rewolucji (robotyka, sztuczna inteligencja, itp.) na praktyki zarządzania w organizacjach. Autorzy traktują te czynniki technologiczne jako sposób na wzmocnienie produkcji, ale zalecają nowe podejścia do analizy organizacyjnej w celu skuteczniejszego dostosowania swoich praktyk zarządczych, łącznie z tymi związanymi z bezpieczeństwem i higieną pracy. Ostatnio rozwój inteligentnych czujników, IoT, CPS i postępy w informatyce doprowadziły do licznych prób ich zastosowań do BHP. Podgórski i in. 24 ujawniają szeroką gamę środków ochrony osobistej, które wykorzystują te technologie. Dźwiarek w [13, 14, 15]14 przedstawił zastosowania systemów lokalizacji w różnych obszarach BHP. Założenia dotyczące bezpieczeństwa postawione na etapie projektowania i rozwoju systemu mogą okazać się nieaktualne podczas operacji produkcyjnych, co wymaga pewnych środków dynamicznego zapewnienia bezpieczeństwa.

W Przemysle 4.0 ważnym rozwiązaniem jest współpraca człowieka z robotem. Dzięki nowym technologiom i coraz inteligentniejszym systemom sterowania maszynami i robotami, współpraca człowieka z maszyną stała się łatwiejsza. W inteligentnej fabryce przyszłości roboty pracują ramię w ramię z ludźmi i wspierają ich, gdy potrzebna jest ich pomoc. Jednak w praktyce realizacja takich stanowisk pracy opartych na współpracy człowieka z robotem nie jest tak łatwa. Projektowanie miejsc pracy opartych na współpracy stwarza również zupełnie nowe wyzwania w zakresie bezpieczeństwa pracownika. Widzimy więc, że problem bezpieczeństwa w systemach produkcyjnych Przemysłu 4.0 ma charakter wielowymiarowy. Z jednej strony nowe technologie generują nowe rodzaje zagrożeń, ale jednocześnie umożliwiają budowę bardziej efektywnych systemów bezpieczeństwa.

2. Cel i metodyka badań

Celem ogólnym badań było opracowanie wytycznych i materiałów szkoleniowych wspomagających wdrażanie procedur LOTO w Przemysle 4.0. Osiągnięcie celu ogólnego zadania wymagało przeprowadzenia analizy pięciu wybranych inteligentnych systemów wytwórczych Przemysłu 4.0 w celu identyfikacji zagrożeń mogących wystąpić podczas prac konserwacyjno-naprawczych. Były to:

- inteligentny zintegrowany system wytwórczy,
- automatyka przemysłowa sterowana za pośrednictwem IoT (rys. 1),
- roboty współpracujące,
- maszyny z funkcją monitoringu mobilnego,
- maszyny sterowane z wykorzystaniem sztucznej inteligencji.



Rys. 1. Zespół maszyn do cięcia blatów laminowanych, sterowany za pośrednictwem IoT:
A – usytuowanie maszyn, B – pilarka poprzeczna

Analiza miała na celu zidentyfikowanie istotnych źródeł energii w tych systemach wraz z analizą możliwości rozłączenia i rozładowania nagromadzonej energii w sytuacji braku możliwości odseparowania pracowników przez wygradzenia.

Wyniki przeprowadzonych analiz zostały zebrane w postaci wytycznych dotyczących stosowania procedur LOTO w systemach wytwórczych Przemysłu 4.0. Następnie opracowano materiały szkoleniowe dla służb utrzymania ruchu. Materiały te ukierunkowane są na szkolenia okresowe pracowników służb utrzymania ruchu. Opracowane wytyczne i materiały szkoleniowe zostały zweryfikowane podczas szkolenia pilotażowego. Wśród uczestników szkolenia przeprowadzono badania ankietowe dotyczące zaprezentowanych wytycznych i materiałów szkoleniowych. Ankiety dotyczące „Wytycznych” i materiałów szkoleniowych zawierały stwierdzenia w zakresie ich:

- zawartości,
- użyteczności oraz
- kompleksowości i kompletności.

W ankiecie zastosowano 5-stopniową skalę Likerta [2]. Następnie oceniono wskaźnik trafności merytorycznej (content validity index - CVI) [21] poprzez wyznaczenie:

- wskaźnika trafności merytorycznej dla pozycji (content validity index for items I_CVI) [21],

- wskaźnika trafności treści dla skali (S_CVI) [35].

Wskaźnik I_CVI wyznaczono dla każdego stwierdzenia zawartego w ankiecie poprzez określenie, jaka część ekspertów uznała je za trafne lub bardzo trafne według wzoru (1):

$$I_CVI = \frac{n_a}{n} \quad (1)$$

gdzie:

n_a – liczba ocen 4 lub 5 pkt.,

n – liczba ankiet.

Natomiast wskaźnik S_CVI wyznaczono jako wartość średnią wskaźnika I_CVI. Zazwyczaj przyjmuje się, że wartości I_CVI większe od 0,78 i S_CVI większe od 0,9 potwierdzają doskonałą trafność merytoryczną ocenianych materiałów [25]. Do oceny istotności statystycznej wyników ankiety wybrano test parametryczny wartości średniej jednej zmiennej z prawostronną hipotezą alternatywną. Zmienną losową była liczba odpowiedzi o określonej wartości w skali Likerta. Ponieważ grupa testowa była mała (mniejsza niż 30), więc zastosowano test *t-studenta*. W teście tym wartość statystyki testowej wyznacza się wg wzoru (2).

$$z = \frac{I_CVI - m_0}{\sigma} \sqrt{n} \quad (2)$$

gdzie:

Z – wartość statystyki testowej,

m_0 – wartość graniczna I_CVI = 0,78 i S_CVI = 0,9,

σ – odchylenie średnie standardowe liczby odpowiedzi wskazujących 4 lub 5 pkt.

n – liczba ankiet.

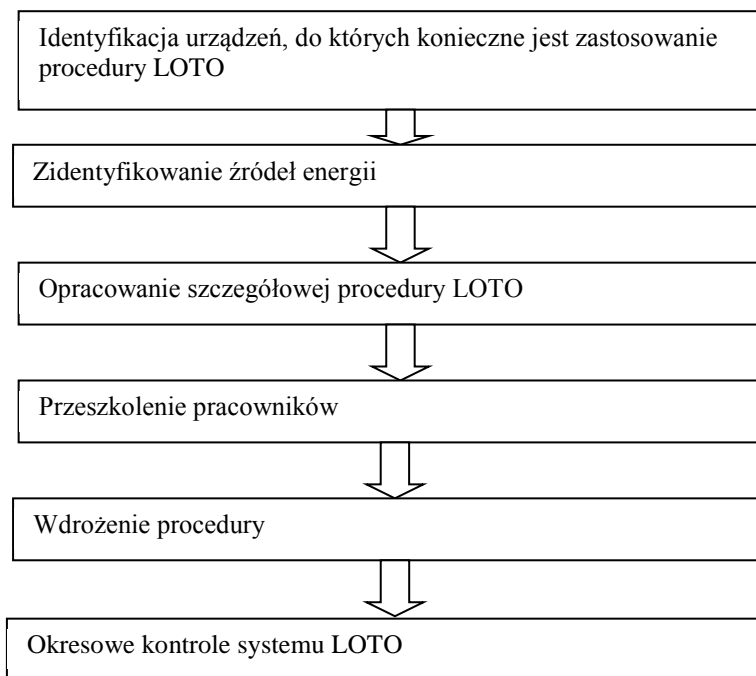
Wyznaczono także prawdopodobieństwo testowe *p-value*, określające prawdopodobieństwo nieprawidłowego odrzucenia hipotezy zerowej i przyjęcia hipotezy alternatywnej:

H_1 – wartość I-CVI jest większa od wartości granicznej, równej 0,78 dla danego stwierdzenia.

H_2 – wartość S-CVI jest większa od wartości granicznej, równej 0,9 dla danego stwierdzenia.

3. Uzyskane rezultaty

Przeprowadzone analizy systemów wytwórczych Przemysłu 4.0 wykazały, że wymagania dotyczące procedur LOTO różnią się od procedur stosowanych w systemach klasycznych. Różnice polegają głównie na wprowadzeniu dodatkowych kroków, wynikających ze specyfiki systemów cyber-fizycznych. Zastosowanie systemu lokalizacji RFID w inteligentnym zintegrowanym systemie produkcyjnym umożliwia precyzyjne monitorowanie osób przebywających w jego obszarze. W przypadku maszyny sterowanej za pośrednictwem IoT należy, przed wyłączeniem, dodatkowo pamiętać o jej przełączeniu w tryb sterowania lokalnego. Roboty współpracujące i AVG wyposażone w AI pozwalają na odstępianie od procedur LOTO, jeśli nie wymagają wyłączenia maszyn. Natomiast w przypadku maszyny z funkcją monitorowania mobilnego, przed przystąpieniem do wykonywania procedury LOTO należy uzyskać akceptację osoby monitorującej maszynę.



Rys. 2. Procedura postępowania przy wdrażaniu systemu LOTO

Wyniki przeprowadzonych analiz stanowiły podstawę do określenia procedur LOTO krok po kroku oraz list kontrolnych do stosowania przez służby utrzymania ruchu. Na rys. 2 pokazany jest schemat ogólnej procedury wdrażania systemów LOTO w przedsiębiorstwie. W każdym przypadku należy pamiętać o konieczności dokumentowania wykonania procedury LOTO. Pomocne w tym mogą być opracowane listy kontrolne i wzory dokumentów. Wyniki przeprowadzonych analiz stanowiły podstawę do określenia procedur LOTO krok po kroku oraz list kontrolnych do stosowania przez służby utrzymania ruchu.

Następnie uzyskane rezultaty zostały zebrane w postaci wytycznych dotyczących stosowania procedur LOTO w systemach wytwórczych przemysłu 4.0. Wytyczne uwzględniają wskazanie specyfiki zagrożeń występujących w inteligentnych systemach wytwórczych Przemysłu 4.0. Zostały one opracowane w odniesieniu do klasycznych systemów LOTO, ze wskazaniem różnic i obszarów wspólnych. W wytycznych wskazano techniczne środki zapewnienia bezpieczeństwa podczas prac konserwacyjno-naprawczych w odniesieniu do specyfiki rozwiązań Przemysłu 4.0. Wskazano także zalecenia dotyczące zarządzania bezpieczeństwem podczas takich prac, ze szczególnym uwzględnieniem środków organizacyjnych, takich jak dopuszczenia do pracy, praca w zespołach, szkolenia. Opracowane wytyczne mają 44 strony tekstu podzielonego na 8 rozdz., w tym 22 rysunki i 24 pozycje bibliograficzne. Zasady przedstawione w „Wytycznych” stanowiły podstawę do opracowania materiałów szkoleniowych dla służb utrzymania ruchu. Materiały te ukierunkowane są na szkolenia okresowe pracowników. Mają one postać prezentacji

przeznaczoną do omówienia w trakcie szkolenia. W materiałach uwzględniono problematykę:

- Czym są systemy LOTO,
- Urządzenia LOTO,
- Wdrażanie systemu LOTO w przedsiębiorstwie,
- Szczegółowa procedura postępowania LOTO,
- Przykłady procedur LOTO w Przemysłu 4.0.

Informacja o szkoleniu pilotażowym, mającym na celu weryfikację opracowanych materiałów i wytycznych, została przesłana do członków sieci ekspertów BHP certyfikowanych przez CIOP-PIB. Są to eksperci z dużym, potwierdzonym certyfikatem, doświadczeniem w obszarze BHP. Udzielają się zawodowo w dużej grupie przedsiębiorstw o bardzo zróżnicowanym profilu. Zainteresowanie wytycznymi zgłosiło ponad 90 osób z różnych przedsiębiorstw w całej Polsce. Natomiast w szkoleniu uczestniczyły 52 osoby reprezentujące ponad 40 przedsiębiorstw. Wśród uczestników szkolenia znajdowali się eksperci BHP, pracownicy służb utrzymania ruchu, projektanci maszyn i systemów produkcyjnych Przemysłu 4.0.

Zarówno wytyczne, jak i materiały szkoleniowe, ocenione zostały bardzo wysoko. W przypadku wytycznych średnia wartość liczby punktów w skali Likerta przekraczała 4,4 przy każdej pozycji. Wskaźnik I-CVI przeważnie przyjmował wartość 1, a najmniejsza jego wartość to 0,92, znacznie większa od wartości granicznej 0,78. Także wskaźniki statystyczne potwierdziły wysoką ocenę wytycznych. Wartość statystyki testowej *t-studenta* w każdym przypadku przekraczała wartość krytyczną testu, a prawdopodobieństwo testowe było mniejsze niż 0,01. Natomiast wskaźnik S-CVI miał wartość 0,99, przy $t = 9,00$, $p\text{-value} = 0,0006$.

W przypadku materiałów szkoleniowych ocena także była bardzo wysoka. Wartość średnia punktacji w skali Likerta przekraczała 4,38, a najmniejsza wartość I-CVI to 0,86. Porównanie otrzymanych wartości t z wartościami krytycznymi potwierdziło, że także w przypadku materiałów szkoleniowych należy odrzucić hipotezę zerową i przyjąć hipotezę alternatywną mówiącą, że wskaźniki I-CVI są większe od wartości granicznej 0,78 w przypadku każdego stwierdzenia. Także wartości $p\text{-value}$ wskazywały, że prawdopodobieństwo błędnego odrzucenia hipotezy zerowej było mniejsze od przyjętego poziomu ufności 0,05. Obliczony wskaźnik S_CVI wyniósł $S_CVI = 0,96$ i znacząco przekraczał wartość graniczną 0,9. Wartość statystyki *t-studenta* i $p\text{-value}$ dla tego wskaźnika, to:

$$t = 3,34, p\text{-value} = 0,0012 \quad (3)$$

Potwierdza to, że wytyczne i materiały szkoleniowe mają doskonałą trafność merytoryczną na poziomie ufności 0,05. Dotyczy to ich zawartości, użyteczności oraz kompleksowości i kompletności.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone analizy systemów wytwórczych Przemysłu 4.0 wykazały, że wymagania dotyczące procedur LOTO różnią się od procedur stosowanych w systemach

klasycznych. W każdym przypadku należy jednak pamiętać o konieczności dokumentowania wykonania procedury LOTO. Pomocne w tym mogą być opracowane listy kontrolne i wzory dokumentów. Podstawowe dokumenty, które powinny być stosowane w przedsiębiorstwie to:

- instrukcja bezpiecznego wyłączania, opracowana dla każdej maszyny lub zespołu maszyn,
- lista osób przeszkolonych i upoważnionych do wykonania procedury LOTO, dotyczy także wykonawców zewnętrznych,
- rejestr wykonywanych prac.

Opracowane „Wytyczne do stosowania procedur LOTO w systemach wytwórczych Przemysłu 4.0” wraz z materiałami szkoleniowymi „Bezpieczeństwo maszyn w Przemysle 4.0 – procedury Lockout/Tagout” stanowią podstawę do wdrażania systemu LOTO w przedsiębiorstwie. Ich wysoka jakość merytoryczna potwierdzona została w trakcie szkolenia pilotażowego. Uczestnicy szkolenia podkreślali, że wytyczne i materiały są użyteczne, ale w przypadku ich wykorzystania w praktyce konieczne jest uwzględnienie uwarunkowań technicznych, organizacyjnych, a także stanu świadomości załogi.

Publikacja opracowana na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2020–2021 w zakresie zadań służb państwowych ze środków ministra właściwego do spraw pracy (zad. 3.SP.09 pt.: Opracowanie metodyki stosowania systemów lockout/tagout w systemach wytwórczych Przemysłu 4.0).

Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

5. Literatura

1. Abersfelder, S., Heyder, A., Franke, J. Optimization of a servo motor manufacturing value stream by use of ‘Industrie 4.0’. In: 2015 5th International Conference on Electric Drives Production, EDPC 2015 – Proceedings 7323216.
2. Alan C. Elliott, Wayne A. Woodward. Statistical analysis quick reference guidebook. With SPSS examples. (2007) DOI: 10.4135/9781412985949.
3. Albers A., Gładysz B., Pinner T., Butenko V., Stürmlinger T. Procedure for defining the system of objectives in the initial phase of an Industry 4.0 project focusing on intelligent quality control systems, Procedia CIRP 52 (2016) 262–267.
4. Badiane, A., Nadeau, S., Kenné, J.P., Polotski, V. Optimizing production while reducing machinery Lockout/Tagout circumvention possibilities. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 22(2), 2014: pp.188-201.
5. Badri, A., Boudreau-Trudel, B., Saâdeddine Souissi, A. Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? Safety Science 109 (2018) 403–411.
6. Brettel, M., Klein, M., Friederichsen, N. The relevance of manufacturing flexibility in the context of Industrie 4.0. In: 48th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2016. Procedia CIRP 41. pp. 105–110.

7. Bücker, I., Hermann, M., Pentek, T., Otto, B. Towards a methodology for Industrie 4.0 transformation. *Lect. Notes Business Inform. Process.* 2017. 255, 209–221.
8. Bulzacchelli, M.T., Vernick, J.S., Sorock, G.S., Webster, D.W., Lees, P.S.J. Circumstances of fatal Lockout/Tagout-related injuries in manufacturing. *American Journal of Industrial Medicine*, 51, 2008, pp. 728-734.
9. Campbell, T. LOTO remains problematic. *Professional Safety*, Vol 48(3), 2003: pp. 48-51.
10. Consortium II. Fact Sheet, 2013. Dostępne z: http://www.iiconsortium.org/docs/IIC_FACT_SHEET.pdf.
11. Dewi, L., Zebua, E. Investigation of Lockout/Tagout procedure failure in machine maintenance process. *Jurnal Teknik Industri*, Vol. 20, No. 2, 2018: 135 – 140. DOI: 10.9744/jti.20.2.135-140.
12. Drath R., Horch A. Industrie 4.0: hit or hype?, *IEEE Ind. Electron. Mag.* 8 (2) (2014) 56–58.
13. Dźwiarek, M. “Real Time Location Systems for monitoring safety of the machine operators”. *Safety of Industrial Automated Systems 2015*. 18-20.11. 2015, Königswinter, Niemcy. ISBN 987-3-86423-163-6. s. 153 – 156.
14. Dźwiarek, M., Łempiński T., Światowski. M. “Effectiveness investigation of the correlation algorithms applied in a Smart ID Card system to monitor the use of PPE”. in: *Safety and Reliability – Safe Societies in a Changing World*. Stein Haugen at. all (eds.) © Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-351-17466-4, (2018): s.1965 – 1971.
15. Dźwiarek, M., Strawiński, T., Łempiński, T., Światowski, M. „The simulation of the use of personal protective equipment in investigation of Smart ID Card system efficiency”, *Journal of KONBIN*. 43 (2017): s. 163 – 178, DOI 10.1515/jok-2017-0045.
16. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design principles for Industrie 4.0 scenarios, *A Literature Review*, in: 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), IEEE, (2016), pp. 3928–3937.
17. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Securing the future of German manufacturing industry. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0, (2013). Final report of the Industrie 4.0 Working Group.
18. Kaivo-Oja, J., Virtanen, P., Jalonen, H., Stenvall, J. “The effects of the internet of things and big data to organizations and their knowledge management practices”. *Lect. Notes Business Inform. Process.* 224 (2015): s. 495–513.
19. Kiel, D., Arnold, C., Collisi, M., Voigt, K.-I. The impact of the industrial internet of things on established business models. In: 25th International Association for Management of Technology Conference 2016, Proceedings: Technology – Future Thinking. pp. 673–695.
20. Li X., Li D., Wan J., Vasilakos A.V., Lai C.F., Wang S. A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0, *Wireless Networks* 23 (1) (2015) 1–19.
21. Lynn, M.R. Determination and quantification of content validity. *Nurse Research* (1986), Vol. 35, ISSU 6, pp. 382–385.

22. Mehrgani, B.E., Nadeau, S., Kenné, J.P. optimal Lockout/Tagout, preventive maintenance, human error and production policies. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 20(4), 2014: pp.453-470.
23. OSHA. Control of hazardous energy (Lockout/Tagout), U.S. Department of Labor & Occupational Safety and Health Administration, 2002. <https://www.osha.gov/control-hazardous-energy/>
24. Podgórski, D., Majchrzycka, K., Dąbrowska, A., Gralewicz, G., Okrasa, M. "Towards a conceptual framework of OSH risk management in smart working environments based on smart PPE, ambient intelligence and the Internet of Things technologies". *Int. J. Occup. Safe. Ergon.* 23, 1 (2017): s. 1–20.
25. Polit, D.F., Beck, C.T. The content validity index: Are you sure you know what's being reported? Critique and recommendations. *Res. Nurs. Health* 2006, Vol. 29, pp. 489–497.
26. Ravi, M., Sridharan, P., Senthilkumar V.K. Implementation strategy of lock out and tag out (LOTO) electrical systems for paper industry. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 6(1), 2018: 01-10. DOI: 10.30954/2322-0465.1.2018.1.
27. Reuter, M., Oberc, H., Wannöffel, M., Kreimeier, D., Klippert, J., Pawlicki, P., Kuhlenkötter, B. Learning factories 'Trainings as an Enabler of Proactive Workers' Participation Regarding Industrie 4.0. *Procedia Manuf.* 2017, 9, 354–360.
28. Roblek V., Meško M., Krapež A. A complex view of Industry 4.0, *SAGE Open* 6(2). 2016. DOI: 10.1177/2158244016653987.
29. Samuel C. Yamin, L. Parker, Rodney Stanley. Self-audit of lockout/tagout in manufacturing workplaces: A pilot study. *Am J Ind Med.* 2017; 60:504–509.
30. Simons, S., Abé, P., Nesper, S. Learning in the AutFab – The fully automated Industrie 4.0. Learning factory of the University of Applied Sciences Darmstadt. *Procedia Manuf.* 9, 2017, 81–88.
31. Ślusarczyk B. Industry 4.0 – are we ready?. *Polish Journal of Management Studies.* 2018, Vol.17 No.1, 232 – 248.
32. Thames L., Schaefer D. Software-defined cloud manufacturing for Industry 4.0, *Procedia CIRP* 52 (2016) 12–17.
33. Van Lier, B.,. Developing the industrial Internet of Things with a network centric approach: a holistic scientific perspective on smart industries. In: 18th International Conference on System Theory, Control and Computing, 2014, 6982436. pp. 324–329.
34. Vogel-Heuser B., Hess D. Guest editorial Industry 4.0–prerequisites and vi- sions, *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 13 (2) (2016) 411–413.
35. Waltz, C.F.; Strickland, O.L.; Lenz, E.R. *Measurement in Nursing and Health Research*, 3rd ed.; Springer Publishing Company: New York, NY, USA, 2005.
36. Wee D., Kelly R., Cattel J., Breunig M. *Industry 4.0-How to Navigate Digitization of the Manufacturing Sector.* McKinsey & Company, 2015.
37. ZHANG Hongjie, LIU Zhen-tang. Application of Lockout & Tagout System in the Coalmine. *Industry. Procedia Engineering* 26 (2011) 2065 – 2069