

Wielokryterialna ocena projektów modernizacji zakładu przemysłowego – studium przypadku

Dr hab. inż. Zygmunt Orłowski prof. AGH

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

Artykuł dotyczy problemów występujących podczas modernizacji zakładów produkcyjnych. Projektując obiekt budowlany, zakładamy jego okres użytkowania, tj. przedział czasu, w którym konstrukcja ma być użytkowana zgodnie z zamierzonym przeznaczeniem i przewidywanym utrzymaniem, bez potrzeby dużych napraw [6, 7]. W Eurokodzie *Podstawy projektowania konstrukcji* orientacyjny projektowy okres użytkowania dla tzw. 4. kategorii projektowanego okresu użytkowania (konstrukcje

budynków i inne konstrukcje zwykłe) wynosi 50 lat. W przypadku budynków przemysłowych często zdarza się, że po kilkunastu latach eksploatacji (a bywa, że i po kilku latach) zachodzi potrzeba modernizacji danego budynku. Jest to wynik specyfiki funkcji użytkowej jakie one pełnią. Modernizacja budynków przemysłowych często nie jest wynikiem zużycia technicznego budynku, lecz następstwem zużycia funkcjonalnego.

Współczesny przemysł charakteryzuje się dużą dynamiką. Postęp techniczny w niektórych gałęziach przemysłu jest bardzo intensywny. Właściciel (zarządca) zakładu produkcyjnego, aby utrzymać się na trudnym, konkurencyjnym rynku jest zmuszony do ciągłych poszukiwań nowych rozwiązań technologicznych. Wytwarzanie udoskonalonego produktu, często wymaga wymiany pojedynczych stanowisk na bardziej nowoczesne, a w szczególnych przypadkach wymiany całych linii technologicznych. Nowe urządzenia powodują inne oddziaływania na konstrukcję, niż te, które przyjęto w projekcie, na przykład mają większą masę, wymagają specjalnego posadowienia na stropie.

SPECYFIKA MODERNIZACJI ZAKŁADÓW PRZEMYSŁOWYCH

Proces modernizacji linii technologicznych w budynkach przemysłowych bardzo często połączony jest także z robotami budowlanymi, polegającymi na: wzmocnieniu konstrukcji, zmianie usytuowania ścianek działowych, wymianie posadzek, itp. Zdarza się, że podczas montażu urządzeń o znacznych gabarytach należy, na czas montażu, wyburzyć część ścian zewnętrznych [4]. Proces modernizacji często powoduje utrudnienia organizacyjne, zakłócenia w funkcjonowaniu zakładu produkcyjnego. Z tego też względu prace modernizacyjne planowane są w okresie urlopu załogi, w skrajnych przypadkach, kiedy prace przedłużają się, załoga jest wysyłana na „wymuszone urlopy”. Jednym z głównych warunków, jaki stawia inwestor (użytkownik) przed projektantami modernizacji i wykonawcą tych prac jest minimalna ingerencja w istniejące rozwiązania konstrukcyjne budynku i krótki czas realizacji robót [1, 2, 5]. Następne ograniczenie stanowi wysokość kosztów związanych z wykonywaniem prac. Kwota ta jest wynikiem analizy biznesplanu - dokumentu służącego ocenie opłacalności przedsięwzięcia inwestycyjnego. Ponadto, proponowane rozwiązanie projektu modernizacji, tj. sposób prowadzenia robót, powinny charakteryzować się minimalnym ryzykiem uszkodzenia maszyn i urządzeń istniejącej linii technologicznej.

Jak widać modernizacja zakładów przemysłowych jest zadaniem trudnym; często następuje ingerencja w rozwiązanie konstrukcyjno-budowlane przyjęte w projekcie budowlanym, wymagana jest ścisła koordynacja wielu branż. Stopień utrudnienia wykonania tych robót bywa bardzo duży. Opracowanie racjonalnego projektu wymaga od projektantów odpowiednich kwalifikacji i dużego doświadczenia. Wybór zadawalającego rozwiązania następuje w wyniku rozpatrzenia kilku wariantów propozycji. Przedstawione zagadnienie jest typowym zadaniem wielokryterialnym. Wymienione uwarunkowania stwarzają potrzebę opracowania modeli do przeprowadzenia ocen zaprezentowanych wariantów projektów. Podany poniżej algorytm wykorzystuje w swoich podstawach znane elementy w naukach społeczno-ekonomicznych metod taksonomicznych [3, 8]. Każdy z wariantowych projektów charakteryzuje się zbiorem wspólnych cech. Optymalizacja w rozpatrywanym przypadku polega na wyborze najbardziej istotnych (z punktu widzenia oceniającego) cech, nazywanych kryteriami, i uporządkowania analizowanych projektów według ustalonych zasad.

W celu zapewnienia sprawnej, a także niezawodnej realizacji robót, proces niezbędnych wzmocnień i montażu (według przyjętego wariantu) powinien być poprzedzony bardzo starannym

przygotowaniem, włącznie z symulacją pewnych operacji, a także montażem próbnym przeprowadzonym na placu budowy.

Przedmiotem rozważań jest modernizacja linii technologicznej w zakładzie przemysłu spożywczego.

PROCEDURA OCENY PROJEKTÓW MODERNIZACJI (REMONTU) OBIEKTU

Schemat rozpatrywanego algorytmu służącego do oceny wielokryterialnego zadania obejmuje:

- wybór cech (kryteriów) branych pod uwagę przy ocenie proponowanego rozwiązania modernizacji obiektu,
- ustalenie wartości ocenianych cech,
- kodowanie cech,
- ustalenie hierarchii ważności cech,
- agregacja unormowanych zmiennych.

Wybór kryteriów polega na wyodrębnieniu tych cech przedstawionego projektu modernizacji, które w procesie oceny mają istotne znaczenie, które stanowią podstawę wyboru. W rozpatrywanym zadaniu wyodrębniono następujące rodzaje kryteriów:

- techniczne – dotyczą one przyjęcia określonego rozwiązania konstrukcyjnego, użycia określonych materiałów, zastosowania odpowiedniej technologii i sprzętu do wykonania robót,
- ekonomiczne – najczęściej dotyczą kosztów użytych materiałów, robocizny, sprzętu, utrzymania,
- eksploatacyjne – określają łatwość w użytkowaniu obiektu, w konserwacji, dostępność do elementów podczas napraw, itp.,
- ryzyka – dotyczy dotrzymania terminów robót, jakości wykonania robót, uszkodzenia istniejących elementów linii technologicznych podczas prac modernizacyjnych, itp.

Z powyższego zestawienia ocenianych kryteriów można zauważyć, że są to cechy, które możemy ocenić jako mierzalne (ilościowe, kwantytatywne) i cechy niemierzalne (jakościowe, kwalitatywne).

Kodowanie, w rozważanym przypadku, polega na zamianie wartości miary cząstkowej (mianowanej) na wartość liczbową (niemianowaną) z przedziału (0, 1) lub $<0, 1>$ [8].

Każdemu z kryteriów przypisano wagę, tak aby móc określić, jakie znaczenie przy ocenianiu będzie miało dane kryterium. Miarami uporządkowania kryteriów są ich wagi.

Aggregacja stanowi finalny etap analizy rozpatrywanych rozwiązań, prowadzący bezpośrednio do uzyskania zmiennej syntetycznej. W rozpatrywanym przypadku ma ona charakter rangi opisującej wartość rozpatrywanego wariantu sposobu modernizacji obiektu. Zmienna jest agregowana według modelu addytywnego ważenia (*simpl additive weighting*, SAW). Budujemy zmienną syntetyczną, wyrażającą preferencję względem rozpatrywanych wariantów decyzji.

Ocenę (wartość liczbową) poszczególnych rozwiązań projektowych przedstawia następująca funkcja agregująca:

$$\mathbf{o}_i = \begin{bmatrix} o_1 \\ o_2 \\ \vdots \\ o_n \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

gdzie:

ω_i – wartość funkcji agregującej wyznaczonej dla i -tego rozwiązania.

Funkcja agregująca ma następującą postać:

$$o_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} \omega_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

gdzie:

a_{ij} – wartość i -tej oceny (kryterium) j -tego wariantu,

ω_j – wartość wagi j -tego wariantu.

$\omega_j \in [0, 1]$ oraz $\sum_{j=1}^m \omega_j = 1$

PRZYKŁAD

W zakładach przemysłu spożywczego zlokalizowanych na terenie Białegostoku modernizacji poddano budynek produkcyjny, który jest użytkowany od 1996 r. Jest to obiekt dwukondygnacyjny, niepodpiwniczony o żelbetowej, prefabrykowanej konstrukcji ramowej. Linia produkcyjna znajduje się na stropie nad parterem. Konstrukcję stropu stanowią płyty kanałowe prefabrykowane oparte na prefabrykowanych ryglach. W poziomie parteru siatka słupów podpierających konstrukcję stropu wynosi: 600×600 cm. Widok linii technologicznej przedstawiono na rys. 1. Rozpatrywana modernizacja była już drugą w ciągu 15 lat eksploatacji budynku. Obecna modernizacja linii technologicznej polegała na wymianie podstawowych urządzeń: etykieciarki, pakowarki i monobloku na nowe, bardziej nowoczesne (rys. 1). Ciężar nowej etykieciarki wynosił 75 kN i był większy od poprzedniej o +15 kN, pakowarki 60 kN (+25 kN), natomiast nowy monoblok był lżejszy od poprzedniego – wynosił 50,00 kN (-15,00 kN) [4]. Wymiana etykieciarki wymagała wzmocnienia konstrukcji istniejącego stropu.

Rozpatrzono trzy warianty W_i ($i = 1, 2, 3$) wzmocnień konstrukcji:

- W_1 – wariant ten polegał na zastosowaniu konstrukcji monolitycznej: usunięciu w wyznaczonym obszarze warstw posadzkowych i wykonaniu płyty żelbetowej podwójnie zbrojonej, współpracującej z istniejącymi elementami żelbetowymi. Podczas robót wzmocniających, do transportu wewnętrznego mieszanki betonowej, przewidziano pompę samochodową z przedłużonym rurociągiem poziomym.
- W_2 – zaproponowane rozwiązanie pod względem konstrukcyjnym jest identyczne jak W_1 , różni się natomiast sposobem wykonania. Do transportu wewnętrznego mieszanki betonowej przewidziano transport ręczny: szyb przyścienny i taczki.
- W_3 – w wariantcie tym przyjęto, że wzmocnienie będzie stanowił ruszt stalowy, wykonany z dwuteowników.

Przyjęto 4 kryteria oceny rozwiązań:

- k_1 – czas wykonania,
- k_2 – koszt wykonania,
- k_3 – warunki eksploatacyjne,
- k_4 – ryzyko uszkodzenia, podczas realizacji robót modernizacyjnych istniejącej zautomatyzowanej instalacji linii technologicznej.

Wielkości parametrów charakteryzujących poszczególne rozwiązania (projekty) przedstawiono w tabl. 1.

Kryterium k_3 należy do kryteriów niewymiernych, podlega kwantyfikacji przez stopniowanie. Najczęściej przyjmuje się



Rys. 1. Widok modernizowanej linii technologicznej

Tabl. 1. Parametry kryteriów k_j charakteryzujące poszczególne warianty rozwiązań W_i

Warianty rozwiązań	Kryteria ocen			
	k_1 – koszt wykonania [tys. zł]	k_2 – czas wykonania [dni]	k_3 – warunki eksploatacji	k_4 – ryzyko uszkodzenia
W_1	74	12	1	0,2
W_2	76	12	1	0,02
W_3	53	10	0,7	0,02

Wartości kryteriów k_3 i k_4 ustalono wykorzystując wiedzę specjalistów.

skalę stopniowania od 1 do 0. W proponowanych wariantach W_1 i W_2 płyta wzmocniająca nie wystaje ponad poziom istniejącej posadzki – nie będzie pogarszać warunków eksploatacji hali. Z tego też względu eksperci nadali wartość 1 (najwyższą) stopniowi spełnienia preferencji (warunki eksploatacji) w wyżej wymienionych wariantach. Realizacja wzmocnienia według W_3 (ruszt stalowy) spowoduje wystawianie elementów stalowych około 15 cm ponad posadzkę – co pogorszy warunki eksploatacji. Z tego też względu stopniowi spełnienia przez W_3 preferencji użytkownika – k_3 eksperci nadali wartość 0,7.

Kryterium k_4 – ryzyko uszkodzenia, sprowadza się do stworzenia tzw. mapy ryzyka, bazującej na dwóch parametrach: skutek i prawdopodobieństwo. Roboty wzmocniające odbywają się w centralnym obszarze istniejącej zautomatyzowanej linii technologicznej. Wartość linii produkcyjnej wynosi około 2 mln zł. Uszkodzenie maszyn czy urządzeń, powstałe podczas transportu materiałów do wzmocnienia konstrukcji, może spowodować ogromne straty finansowe. Maksymalna możliwa strata PML (Possible Maximum Loss) nastąpić może podczas pompowego transportu mieszanki. Transport mieszanki odbywa się wewnątrz hali na poziomie pierwszego piętra na odległość około 20 m. Użytkownik ma złe doświadczenia w tego rodzaju pracach prowadzonych w zakładzie w przeszłości. Ekspertzy ustalili wartość progową dla PML równą 0,2 – dotyczy to wariantu wzmocnienia W_1 , natomiast w wariantach W_2 i W_3 wartość ryzyka przyjęto 0,02.

Macierz miar wariantowych rozwiązań według przyjętych kryteriów ma następującą postać:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 74 & 12 & 1 & 0,2 \\ 76 & 12 & 1 & 0,02 \\ 53 & 10 & 0,7 & 0,02 \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie:

x_{ij} – miara cząstkowa i -tego wariantu według kryterium j -tego.

Każdy z wierszy macierzy dotyczy i -tego wariantu, a każda kolumna j -tego kryterium.

Kodowanie miar wariantów według przyjętych kryteriów przeprowadzono metodą Neumana-Morgensterna [8].

Wykonując kodowanie według wyżej wymienionej metody, wyznaczono wartości macierzy ocen rozpatrywanych wariantów:

$$W = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdzie:

a_{ij} – ocena j -tej cechy (kryterium) w i -tym wariantcie.

Każdemu z kryteriów przypisano wagę, tak aby móc określić, jakie znaczenie przy ocenianiu będzie miało dane kryterium. Wagi wyznaczyło grono sześciu ekspertów, w którego skład wchodził pracownicy wykonawcy, inwestora (użytkownika) oraz uczelni wyższej. Korelację nadawanych przez ekspertów wag kryteriom sprawdzono współczynnikiem zgodności W-Kendalla (dokładniej wariancją S), której wartość po porównaniu z wartością krytyczną S_{kr} , nie dała podstaw do odrzucenia hipotezy zgodności ocen respondentów (a więc sędziów kompetentnych).

Wektor wag poszczególnych cech:

$$\omega_i = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,2 \\ 0,1 \\ 0,4 \\ 0,3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Wektor rang wariantów projektów wzmocnienia określony według (1) – (2):

$$\mathbf{O}_i = \begin{bmatrix} 0,6 \\ 0,7 \\ 0,6 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Z powyższego zestawienia widać, że najlepsze rozwiązanie stanowi proponowany projekt wzmocnienia według wariantu W_2 .

Modernizacja zakładów przemysłowych jest procesem złożonym, w tego rodzaju projektach bierze udział wielu specjalistów, z kilku branż. Często, oprócz ulepszeń technologicznych polegających na udoskonaleniu linii produkcyjnej, niezbędne są ingerencje w rozwiązania konstrukcyjne obiektu. Montaż urządzeń, jak i towarzyszące roboty budowlane wykonywane są w warunkach dużego utrudnienia. Przedstawione problemy modernizacyjne zakładów produkcyjnych stanowią typowe zagadnienia wielokryterialne. W rozpatrywanym przypadku duży wpływ na wybór W_2 wariantu projektu wzmocnienia miało ryzyko uszkodzenia istniejącej zautomatyzowanej linii technologicznej. Rozważany przykład należy do prostych zagadnień, jednakże przedstawiony algorytm z powodzeniem może być wykorzystany do bardziej złożonych zadań praktycznych.

LITERATURA

1. Concrete Repair. A practical guide. Edited by M. G. Grantham, Taylor and Francis, London 2011.
2. Czarnecki L., Emmons P. H.: Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Polski Cement. Kraków 2002.
3. Dytczak M.: Wybrane metody rozwiązywania wielokryterialnych problemów decyzyjnych w budownictwie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2010.
4. Orłowski Z.: Problemy modernizacji obiektów przemysłowych na przykładzie budynku przemysłu spożywczego. Problemy przygotowania i realizacji inwestycji budowlanych. Warsztaty Inżynierów Budownictwa, Puławy, 22-24.10 2008 r.
5. Orłowski Z., Chyży T., Orłowski M.: Określenie nośności stropu nad parterem w Rozlewni Eksportowej Przedsiębiorstwa „Polmos” Białystok S.A w związku z modernizacją linii. Białystok 2011.
6. PN-EN 1990. Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji.
7. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 grudnia 1999 r. w sprawie Polskiej Klasyfikacji Obiektów Budowlanych (PKOB).
8. Szwabowski J., Deszcz J.: Metody wielokryterialnej analizy porównawczej. Podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań w budownictwie. Wydawnictwa Politechniki Śląskiej. Gliwice 2001.