

10. PROGNOZA ZMIAN STANU TECHNICZNEGO BUDYNKÓW MIESZKALNYCH W PEŁNYM OKRESIE ICH UŻYTKOWANIA

Beata Nowogońska¹

10.1. WPROWADZENIE

Proces starzenia jest naturalnym zjawiskiem zmian właściwości każdego materiału, zachodzącym wraz z upływem czasu. Każdy budynek podczas kolejnych lat użytkowania ulega zużyciu, jego stan techniczny stale pogarsza się. W miarę upływu czasu następuje obniżanie właściwości użytkowych budynku, a częściowe przywrócenie następuje w wyniku napraw.

Zgodnie z zaleceniami normowymi PN-ISO 7162:1999 należy dokonać oceny właściwości użytkowych budynku, a także należy przewidzieć zmiany tych właściwości w czasie opracowując metody symulujące przewidywaną degradację wyrobu z upływem czasu. Zespólnorm PN-ISO „Planowanie okresu użytkowania” podaje ogólne wytyczne dotyczące zagadnień przewidywania okresu użytkowania budynku. Normy te zawierają wprowadzenie do przewidywania właściwości użytkowych, jednak bez szczegółów prognozowania. Podkreślają trudności we wskazywaniu degradacji nawet podobnych budynków, ponieważ w praktyce występuje wiele zmiennych wpływających na okresy użytkowania. Różnorodność budynków, środowisk, jakości prac budowlanych i przyszłe warunki utrzymania powodują niepewność w prognozowaniu okresu użytkowania. W jednej z norm występuje zapis, że rozkład prawdopodobieństwa okresu użytkowania jest zbliżony do rozkładu Weibulla z możliwymi jego modyfikacjami.

¹Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska,
e-mail: b.nowogonska@ib.uz.zgra.pl

Według wymogów norm dotyczących planowania okresu użytkowania budynku, należy opracować program ekspozycji starzenia uwzględniający najbardziej istotne mechanizmy degradacji. Model degradacji w rozumieniu PSLDC (Predicted Service Life of a Component), czyli rozkład przewidywanego użytkowania komponentu, należy ustalić uwzględniając zależność: właściwości użytkowe – czas, stosując syntezywanie, modelowanie lub interpolację/ekstrapolację. PSLDC powinien być wyliczony z zależności: właściwości użytkowe – czas w wyniku przedstawienia określonych liczbowo wymagań użytkowych, wyrażonych w postaci cech właściwości użytkowych lub wskaźników degradacji. Wartość PSLDC jest określona zależnością: właściwości użytkowe – czas dla krytycznej właściwości, uznanej za graniczną właściwość krytyczną. Zależność ta jest, wg normy, nieliniową funkcją czasu.

Klasyfikacje metod przewidywania okresu użytkowania obiektów budowlanych PSLDC opracowali Sobotka i Bucoń (2005). Są to metody deterministyczne, probabilistyczne i symulacyjne. Metody deterministyczne oparte na normach dają wyniki jedynie przybliżone. Natomiast metody probabilistyczne, bazujące na wyznaczaniu zmiennych modelu użytkowania jako wielkości losowych o znanym rozkładzie prawdopodobieństwa, są pracochłonne. Drugą grupą metod probabilistycznych do opisu przebiegu procesu niszczenia są metody zawierające łańcuchy Markowa. Łańcuchy Markowa stosowane są często do opisu procesów niszczenia mostów i infrastruktury technicznej. Prowadzone są również badania w zakresie sprawdzenia możliwości ich stosowania dla budynków, np. proces użytkowania obiektu budowlanego przedstawiony jest jako cykl zawierający osiem stanów eksploatacyjnych (Kasprowicz, 2010). Innym przykładem zastosowania dyskretnych łańcuchów Markowa jest opis procesu niszczenia budynku mieszkalnego ujętego w czterech stanach (Bucoń i Sobotka, 2006).

Metodami kompromisowymi do określania czasu użytkowania budynku, pomiędzy niezbyt dokładnymi metodami deterministycznymi a probabilistycznymi wymagającymi wielu danych, są metody symulacyjne (Sobotka i Bucoń, 2005), które polegają na opracowaniu modelu matematycznego używając rozkładów prawdopodobieństwa do określania poszczególnych parametrów modelu. Dotychczasowe badania związane z utratą zdolności użytkowych budynku (Olearczuk, 1999) dały wynik w postaci liniowej funkcji zmian zdolności użytkowej budynku.

Do oceny właściwości użytkowych w określonym terminie użytkowania można zastosować metodę macierzową (Owczarek, Orłowski, Szklennik, 2006), opartą na następujących kryteriach: bezpieczeństwo obiektu, bezpieczeństwo ekologicznego i ergonomicznego użytkowania, warunki techniczne użytkowania, jakość użytkowania, satysfakcja eksploatacyjna właściciela, efektywność realizacyjna i eksploatacyjna.

W wyniku analiz zagrożeń, awarii i katastrof obiektów budowlanych (Runkiewicz, 2002) można stwierdzić, że najwięcej ich występuje w konstrukcjach mурowanych (44%) spośród wszystkich technologii oraz w obiektach budownictwa mieszkaniowego (41%) spośród wszystkich innych rodzajów obiektów.

Na rosnące potrzeby remontowe w budownictwie mieszkaniowym zwraca się uwagę w wielu publikacjach naukowych (m.in. Biliński, 2001, Czapliński, Marcinkowska, 1998, Skarzyński, 2000). Istnieje zatem potrzeba opracowania prognoz zmian właściwości użytkowych budynku w pełnym czasie jego użytkowania.

10.2. CEL I ZAŁOŻENIA METODY PROGNOZOWANIA STANU TECHNICZNEGO

Głównym celem opracowania prognozy procesu starzenia się budynku jest przewidywanie terminów powstawania uszkodzeń w budynku, co pozwoli na optymalne planowanie przedsięwzięć remontowych. W opracowaniu modelu zmian stanu technicznego budynku, oprócz identyfikacji aktualnego stanu, należy również rozwiązać zadanie prognozowania stanu technicznego polegające na przewidywaniu zmian, które zaistnieją w przyszłości w chwilach $tp \geq td$ (td – termin diagnozy, tp – jedna z chwil w przyszłości). Zgodnie z zasadami ekonometrii procesy prognozowania obejmują sposób przetworzenia informacji o przeszłości zjawiska oraz sposób przejścia od informacji przetworzonej do prognozy (np. Galanc, 1993). Przewidywanie składa się z dwóch faz: fazy diagnozowania przeszłości i fazy określania przyszłości. Dane i informacje są retrospektywne, dotyczą przeszłości zjawiska i prospektywne, dotyczące przyszłości zjawiska. Diagnostyka przeszłości odbywa się przez budowę modelu, który odwzorowuje zachowanie rzeczywistego obiektu w celach poznawczych. Sposób przejścia od informacji przetworzonej do prognozy jest definiowany regułą prognozy. Jedną z trzech głównych reguł jest reguła podstawowa, a jej szczególny przypadek to reguła prognozy nieobciążonej. Reguła ta jest używana, gdy przyjmuje się stochastyczne założenia o mechanizmie generującym informacje. Wymaga się również, aby model trafnie opisujący przeszłość był również aktualny w czasie, dla którego wyznacza się prognozę. Reguła ta jest użyteczna dla prognozowanych zjawisk o dużej inercji, z powolnymi zmianami ilościowymi. W przypadku prognozy stanu technicznego budynku reguła ta wydaje się najbardziej prawidłową.

Podstawą wyboru metody prognozowania są przesłanki prognostyczne oraz właściwości metod. Przesłanki prognostyczne obejmują hipotezy badawcze określające wstępnie mechanizm rozwojowy prognozowanego zjawiska. W prognozowaniu ekonometrycznym stosowane są różne metody prognozowania m.in. szeregi czasowe (Galanc, 1993). Szereg czasowy jest realizacją procesu stochastycznego, którego dziedziną jest czas, jest ciągiem informacji uporządkowanych w czasie. Głównym jego założeniem jest korzystanie w diagnozowaniu przyszłości zjawiska z informacji o dotychczasowym kształtowaniu się zmiennej prognozowanej. Informacje mogą mieć postać jedno- lub wielowymiarowego szeregu czasowego. W modelach tych czas reprezentuje wszystkie czynniki wpływające na zmienną zależną. Prognoza może być wyznaczana na okres lub moment następujący bez-

pośrednio po ostatniej chwili obserwacji, na wybraną chwilę późniejszą lub na wszystkie chwile. Główną przesłanką prognozowania dla szeregów czasowych jest wyznaczenie prognozy przy założeniu, że charakter zjawisk z przeszłości będzie taki jak w przyszłości, czyli nie nastąpią zmiany.

Zarówno cechy stanu technicznego jak i sygnały diagnostyczne tego stanu zmieniają się w sposób ciągły w czasie, jedynie w przypadku wykonania robót remontowych zmiana jest skokowa. Czasowa historia zmienności cech jest dana w postaci uporządkowanych w czasie ciągów wartości liczbowych określonych dla kolejnych terminów szeregu czasowego. Podstawą ustalenia kolejności jest liczba lat użytkowania budynku. Wymaganiem dla szeregu czasowego jest żądanie stałej wielkości tzw. kroku czasowego w tym szeregu.

Stany techniczne, w których może znaleźć się budynek, tworzą zbiór $W = \{wk, k = 1, 2, \dots, K\}$, a konkretny stan wk jest wyznaczony przez niezależne cechy stanu zj (np. stopień zużycia). Liczba stanów obiektu może być dowolna, lecz ze względu na obowiązujące oceny stanu technicznego (Winniczek, 1993), przyjęto 5 stanów budynku (dobry, zadowolający, średni, mierny, zły). Stan wk będzie znany jeśli będą znane cechy stanu $zj, j = 1, 2, \dots, J$.

Stan techniczny wszystkich elementów budynków mieszkalnych zmienia się w czasie jego użytkowania. Zmiany te, dla pojedynczego elementu budynku np. ścian zewnętrznych, opisane jako jednowymiarowy szereg czasowy zmiennej zj uporządkowane są według wartości zmiennej czasowej j ($j = 1, \dots, J$).

Przyjęto 100-letni okres użytkowania budynku jako horyzont prognozy oraz zmiany stanu technicznego – skok czasowy – określane w 5-letnich odstępach czasu (0, 5, 10, 15, ..., 100 rok użytkowania).

Reguła prognozowania została ustalona w oparciu o modele opisujące zmiany niezawodności urządzeń technicznych.

10.3. MODEL PROGNOZY PROCESU STARZENIA BUDYNKU

10.3.1. ZASADY STOSOWANE DLA OBIEKTÓW TECHNICZNYCH

Problem zapewnienia odpowiedniego poziomu stanu technicznego budynku występuje w całym okresie jego użytkowania. W celu predykcji zmian właściwości użytkowych budynku mieszkalnego proponuje się wykorzystać algorytmy określania zmian niezawodności w urządzeniach technicznych. Prognoza niekorzystnych procesów pozwoli na określenie przedziału czasowego, w którym stan techniczny budynku będzie w przyszłości niezadowolający i tym samym wymagającym przeprowadzenia prac remontowych. Miarą niezawodności urządzeń technicznych jest funkcja $R(t)$ nazywana także funkcją przeżycia lub przetrwania (np. Niziński, 2001) następującej postaci:

$$R(t) = P(T \geq t) = 1 - F(t), \quad (1)$$

gdzie $F(t)$ to dystrybuanta zmiennej losowej oznaczającej czas zdatności obiektów.

Funkcją zawodności obiektu $F(t)$, określaną często prawdopodobieństwem uszkodzenia, definiuje się prawdopodobieństwo wystąpienia co najmniej jednego uszkodzenia w ustalonym przedziale czasu przy określonych warunkach eksploatacyjnych.

Niesprawność i bezawaryjna praca są zdarzeniami przeciwnymi i wyłączającymi się, czyli:

$$F(t) = 1 - R(t). \quad (2)$$

Funkcja niezawodności opisywana jest także wzorem Wienera (Niziński, 2001):

$$R(t) = \exp \left(- \int_0^t \lambda(t) dt \right), \quad (3)$$

który uściśla zależność pomiędzy niezawodnością a intensywnością uszkodzeń.

Często (m.in. Sotskow, 1973; Prażewska, 1987) podawana jest inna definicja intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$, określaną jako prędkość z jaką rośnie zawodność $F(t)$ w stosunku do niezawodności $R(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{dF(t)}{dt} \frac{1}{R(t)}. \quad (4)$$

Niezawodność obiektu definiowana jest jako zdolność do wykonywania zadania wynikającego z przeznaczenia obiektu podczas jego eksploatacji. Oznacza to żądanie od obiektu spełnienia przez określony czas t określonej funkcji w określonych warunkach pracy. Przyjmuje się, że miarą niezawodności obiektu względem danego zadania jest prawdopodobieństwo wykonania tego zadania. Określona w ten sposób miara niezawodności jest funkcją czasu poprawnej pracy obiektu i nazywana jest funkcją niezawodności. Stanowi ilościową charakterystykę niezawodności (m.in. Prażewska, 1987).

10.3.2. MATEMATYCZNY OPIS PROCESU STARZENIA

Najczęściej wykorzystywanym modelem matematycznym rozkładu cechy mierzalnej (długość, kąt itp.) dowolnego wyrobu jest rozkład normalny. Jednak w przypadku, kiedy cechy mierzalne przyjmują tylko wartości dodatnie, rozkład normalny może być jedynie modelem przybliżonym, a dokładniejszych modeli należy szukać w klasie rozkładów zmiennych o wartościach dodatnich (Firkowicz, 1997). Do modelowania sytuacji w analizie przeżycia, gdy prawdopodobieństwo awarii zmienia się w czasie, jako rozkład zmiennej losowej czasu zdatności obiektów stosuje się rozkład Weibulla. Rozkład ten należy do rodziny asymetrycznych rozkładów gamma. Rozkład Weibulla jest od wielu lat stosowany, jako rozkład wytrzymałości oraz jako rozkład czasu poprawnej pracy i trwałości badanych wyrobów (Walpole, Myers 1985; Cordeiro, Ortega, 2013; Firkowicz, 1997; Niziński, 2001; Sotskow, 1973).

Funkcja gęstości $f(t)$ tego rozkładu określona jest zależnością:

$$f(t) = \alpha\beta^\alpha t^{\alpha-1} \exp(-(\beta t)^\alpha) \quad \text{dla } t \geq 0, \quad (5)$$

gdzie

t – okres użytkowania,

α – parametr skali (liczba rzeczywista), $\alpha > 0$,

β – parametr kształtu (liczba rzeczywista), $\beta > 0$.

Parametr α rozkładu określa zachowanie prawdopodobieństwa awarii w czasie:

- dla $\alpha < 1$ prawdopodobieństwo awarii maleje z czasem, w przypadku modelowania awarii obiektu sugeruje to, że egzemplarze mogą posiadać wady fabryczne i powoli wypadają z populacji,
- dla $\alpha = 1$ (rozkład wykładniczy) prawdopodobieństwo jest stałe, wskazuje na fakt, że awarie mają charakter zewnętrznych zdarzeń losowych,
- dla $\alpha > 1$ prawdopodobieństwo rośnie z czasem, sugeruje to zużycie części z upływem czasu, jako główną przyczynę awaryjności,
- dla $\alpha = 2$ (rozkład Rayleigha) prawdopodobieństwo rośnie liniowo z czasem.

Parametr rozkładu β jest współczynnikiem charakteryzującym prędkość zanikania niezawodności, zgodnie z zależnością:

$$\beta = \frac{1}{T_R}, \quad (6)$$

gdzie T_R – okres trwałości obiektu.

Dystrybuenta rozkładu nazywana jest w literaturze prawdopodobieństwem uszkodzenia, funkcją nieprzetwania, awaryjnością lub funkcją zawodności obiektu i określana jest zależnością:

$$F(t) = P(t \leq T_R) = 1 - R(t), \quad (7)$$

gdzie $R(t)$ – funkcja niezawodności, nazywana również prawdopodobieństwem poprawnej pracy lub funkcją przetrwania.

Rozkład Weibulla (dla różnych parametrów) tworzy klasę rozkładów obejmującą rozkład wykładniczy oraz rozkłady o monotonicznie rosnącej lub malejącej funkcji intensywności uszkodzeń.

Szczególne znaczenie w praktyce w badaniu wyrobów (Firkowicz, 1997) ma rozkład wykładniczy. Rozkład ten jest szczególnym przypadkiem rozkładu Weibulla, gdzie parametr kształtu $\alpha = 1$. Rozkład wykładniczy stosuje się bardzo często (np. Cordeiro, Ortega, 2013; Firkowicz, 1997; Niziński, 2001; Sotkow, 1973; Walpole, Myers, 1985) do badania rozkładu czasu poprawnej pracy, jednak wykładniczy model rozkładu niezawodności nie występuje w rzeczywistości.

W rozkładzie wykładniczym przyjmuje się spore przybliżenie, zakłada się pomijalny wpływ procesów zużycia. Cechą charakterystyczną dla rozkładu wykładniczego jest stała intensywność uszkodzeń przez cały okres użytkowania obiektu:

$$\lambda(t) = \text{const} = \lambda. \quad (8)$$

Najczęściej stosowanym opisem zmian niezawodności urządzeń technicznych są zależności oparte właśnie na tym rozkładzie.

Funkcja gęstości $f(t)$ w rozkładzie wykładniczym wyrażona jest zależnością:

$$f(t) = \lambda \exp(-(\lambda t)) \quad \text{dla } t \geq 0. \quad (9)$$

Dystrybuanta $F(t)$ rozkładu wykładniczego ma postać:

$$F(t) = 1 - \exp(-(\lambda t)). \quad (10)$$

Funkcja niezawodności $R(t)$ dla $\lambda = \text{const}$ przyjmuje następującą postać:

$$R(t) = \exp(-(\lambda t)). \quad (11)$$

Innym szczególnym przypadkiem rozkładu Weibulla, gdzie parametr kształtu jest $\alpha = 2$, jest rozkład Rayleigha (np. Firkowicz, 1997). Rozkład ten jest rozkładem jednoparametrycznym, występuje wtedy, kiedy zużycie obiektu z upływem czasu jest główną przyczyną awaryjności.

Zdaniem autorki wybór rozkładu Rayleigha do modelowania procesu starzenia obiektów budowlanych wydaje się najbardziej trafnym. Wszystkie budynki i ich elementy składowe podczas eksploatacji ulegają zużyciu, a rozkład Rayleigha stosuje się właśnie w przypadkach, gdy zużycie obiektu rośnie wraz z upływem czasu użytkowania. W literaturze podaje się również (Sotskow, 1973), że rozkład Rayleigha stosowany jest w przypadku obiektów złożonych do opisu zmienności procesów degradacji obiektów złożonych.

10.3.3. MODEL PRRD (PREDICTION OF RELIABILITY ACCORDING TO RAYLEIGH DISTRIBUTION)

W prognozowaniu zmian właściwości użytkowych budynku niezbędna jest znajomość modeli matematycznych opisujących te procesy. W oparciu o algorytmy stosowane w obiektach technicznych, do rozkładu czasu odpowiedniego stanu technicznego budynków w pełnym okresie ich użytkowania przyjęty został rozkład Weibulla.

Gęstość prawdopodobieństwa dla rozkładu Weibulla $f(t)$ określona jest zależnością (5). Dystrybuanta $F(t)$ dla zmiennej losowej absolutnie ciągłej przedstawiana jest (wg m.in. Walpole, Myers, 1985) w postaci:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt. \quad (12)$$

Całkując wyrażenie (15) przez podstawienie można uzyskać następującą zależność:

$$\begin{aligned} F(t) &= \int_0^t \alpha \beta^\alpha t^{\alpha-1} \exp(-\beta^\alpha t^\alpha) dt \\ &= \int_0^t \alpha \beta^\alpha \frac{1}{\alpha} \exp(-\beta^\alpha u) du. \end{aligned} \quad (13)$$

Zmienne losowe w rozkładzie Weibulla przyjmują wartości nieujemne i dlatego też w równaniu (13) został zastosowany przedział $\langle 0, t \rangle$.

W równaniu (13) zastosowane zostało podstawienie:

$$t^\alpha = u, \quad \text{czyli } t^{\alpha-1} = \frac{1}{\alpha} du. \quad (14)$$

Po przekształceniach ostatecznie można otrzymać wzór (15) określający dystrybuantę dla rozkładu Weibulla:

$$F(t) = 1 - \exp(-(\beta t)^\alpha). \quad (15)$$

Dystrybuanta ta nazywana jest funkcją nieprzetrwania, awaryjnością lub funkcją zawodności obiektu i określana jest zależnością (7). Niesprawność i bezawaryjna praca są zdarzeniami przeciwnymi i wyłączającymi się, dlatego można stosować następujące przekształcenie:

$$R(t) = 1 - F(t). \quad (16)$$

Przekształcając wzory (15) i (16) można uzyskać funkcję $R(t)$ opisującą przebieg procesu zmian właściwości użytkowych w czasie t :

$$R(t) = \exp(-(\beta t)^\alpha). \quad (17)$$

Stosując rozkład wykładniczy zakłada się, że intensywność uszkodzeń jest stała, co jest pewnym uproszczeniem, co zdaniem autorki, nie jest precyzyjne w przypadku obiektów budowlanych. W badaniu zmian właściwości użytkowych budynków mieszkalnych, kiedy zużycie obiektu wraz z upływem czasu jest uznawane za istotną przyczynę awaryjności, bardziej trafnymi zależnościami, wg autorki, są wzory oparte na rozkładzie Rayleigha.

Ogólna postać funkcji opisującej przebieg zmian właściwości użytkowych w czasie t oparta na rozkładzie Weibulla jest wyrażona zależnością (17). W rozkładzie Rayleigha parametry α i β są równe:

$$\alpha = 2, \quad \beta = \frac{1}{T}. \quad (18)$$

Przyjmując powyższe założenia proponuje się, aby proces starzenia budynku i jego elementów określany był modelem PRRD (Prediction of Reliability according to Rayleigh Distribution) – zmian właściwości użytkowych i -tego elementu budynku opartym na rozkładzie Rayleigha. Model ten można zapisać za pomocą następującej relacji (Nowogońska, 2014):

$$R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{T}\right)^2\right). \quad (19)$$

Intensywność uszkodzeń (według rozkładu Rayleigha) będzie określona następująco:

$$\lambda(t) = \frac{2t}{T^2 t^2}. \quad (20)$$

10.4. PROGNOZA ZMIAN WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH ELEMENTÓW BUDYNKU

10.4.1. MODEL PRRD DLA ELEMENTÓW BUDYNKU

Każdy budynek składa się z wielu elementów składowych. Elementy te pełnią różne funkcje, wykonane są z niejednakowych wyrobów budowlanych. Każdy ma inne właściwości, inną strukturę, każdy indywidualnie ulega zużyciu na skutek przebiegu wielu procesów.

Elementy składowe budynku charakteryzują się swoimi okresami trwałości. Badania dotyczące okresów trwałości elementów składowych budynku wykonanych z różnorodnych wyrobów budowlanych były przeprowadzane w wielu ośrodkach naukowych. W wyniku analizy danych literaturowych, dotyczących okresów trwałości (zebranych w Nowogońska, 2003), ustalone zostały wartości minimalne $T_{R\text{MIN}}$, maksymalne $T_{R\text{MAX}}$ oraz średnie $T_{R\text{SR}}$. Wartości te podane są w tabeli 1.

Elementy budynku poddano analizie prognostycznej. Zbadane zostały zmiany właściwości użytkowych elementów składowych budynku w czasie 100-letniego okresu użytkowania zgodnie z zależnościami modelu PRRD:

$$R_{Ri\text{MIN}}(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{T_{Ri\text{MIN}}}\right)^2\right), \quad (21)$$

$$R_{Ri\text{MAX}}(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{T_{Ri\text{MAX}}}\right)^2\right), \quad (22)$$

$$R_{Ri\text{SR}}(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{T_{Ri\text{SR}}}\right)^2\right), \quad (23)$$

gdzie:

$R_{Ri\text{MIN}}(t)$ – zmiany właściwości użytkowych i -tego elementu budynku wg modelu PRRD dla okresów trwałości najkrótszych $T_{R\text{MIN}}$ podawanych w literaturze,

$R_{Ri\text{MAX}}(t)$ – zmiany właściwości użytkowych i -tego elementu budynku wg modelu PRRD dla okresów trwałości najdłuższych $T_{R\text{MAX}}$ podawanych w literaturze,

$R_{Ri\text{SR}}(t)$ – zmiany właściwości użytkowych i -tego elementu budynku wg mo-

Tabela 1.

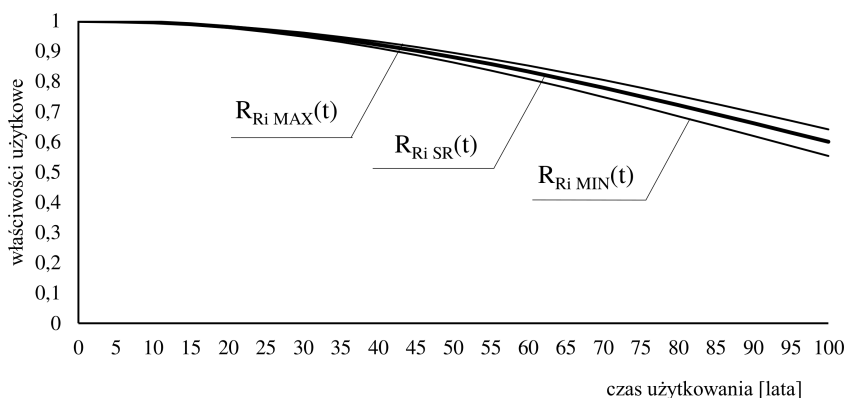
Okresy trwałości elementów budynku dla przyjętych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych.
Źródło: opracowanie własne.

LP	NAZWA ELEMENTU i	OKRESY TRWAŁOŚCI T_{Ri}		
		$T_{Ri\text{MIN}}$	$T_{Ri\text{MAX}}$	$T_{Ri\text{SR}}$
1	fundamenty ceglane	70	150	110
2	ściany murowane z cegły pełnej	130	150	140
3	Ścianki działowe murowane z cegły	70	130	100
4	stropy drewniane belkowe	60	80	70
5	schody drewniane	20	50	35
6	wieżba dachowa	60	100	80
7	pokrycie dachówką ceramiczną	40	100	70
8	rynny i rury spustowe z blachy stalowej ocynk.	10	25	17,5
9	tynki wewnętrzne	50	60	55
10	tynki zewnętrzne	30	60	45
11	stolarka okienna	20	80	50
12	stolarka drzwiowa	80	100	90
13	oszklenie	20	60	40
14	podłogi drewniane (tarcica iglasta)	40	60	50
15	powłoki malarskie ścian i sufitów	3	5	4
16	powłoki malarskie olejne stolarki	3	7	5
17	trzony kuchenne ceramiczne	20	50	35
18	piece kaflowe	40	50	45
19	przewody c.o. (stal)	20	50	35
20	kotły i grzejniki c.o.	20	80	50
21	przewody wod-kan (stal ocynk.)	15	60	37,5
22	armatura wod-kan	20	40	30
23	przewody gazowe (stal ocynk.)	15	60	37,5
24	przewody instalacji elektrycznych (podtynkowe)	40	80	60
25	osprzęt instalacji elektrycznych	15	30	22,5

delu PRRD dla średnich okresów trwałości $T_{R_{SR}}$ podawanych w literaturze.

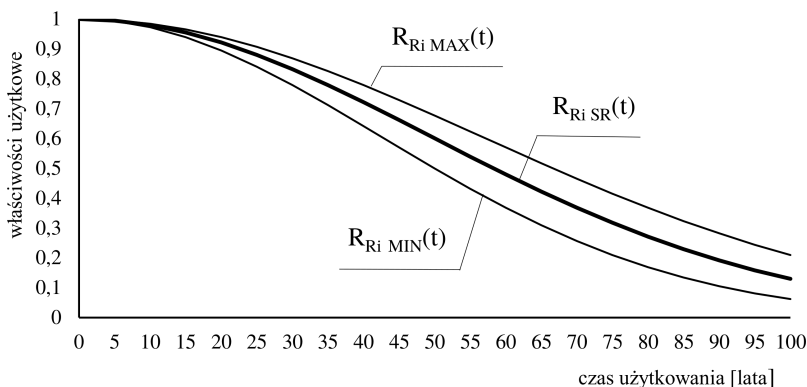
10.4.2. PROGNOZA ZMIAN WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH

Okres trwałości ścian murowanych z cegły pełnej na zaprawie cementowo-wapiennej podawany jest od 130 do 150 lat. Na rysunku 1 przedstawione są wykresy zmian właściwości użytkowych ścian z cegły w przyjętym 100-letnim okresie ich użytkowania wg modelu PRRD.



Rys. 1. Zmiany właściwości użytkowych ścian murowanych z cegły wg modelu PRRD.
Źródło: opracowanie własne.

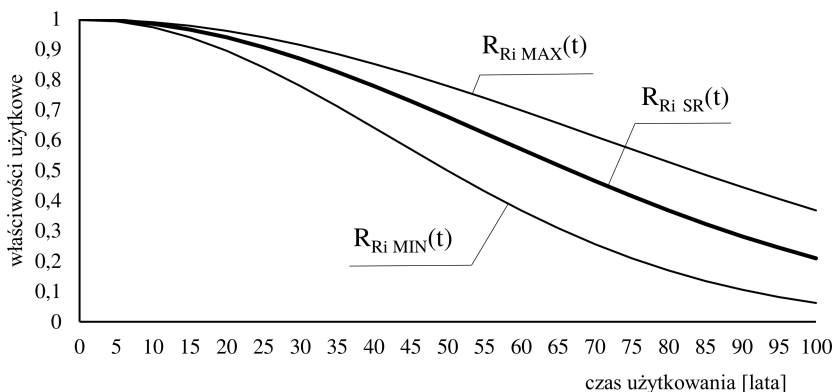
Właściwości użytkowe ścian murowanych z cegły dla minimalnych i maksymalnych okresów trwałości w 100-letnim okresie użytkowania w modelu PRRD różnią się między sobą niewiele, najwięcej 9% w 90. roku użytkowania.



Rys. 2. Zmiany właściwości użytkowych stropów drewnianych wg modelu PRRD.
Źródło: opracowanie własne.

Okres trwałości stropów drewnianych podaje się w granicach 60–80 lat. Na rysunku 2 pokazane są zmiany właściwości użytkowych stropów drewnianych w pełnym przyjętym 100-letnim okresie ich użytkowania.

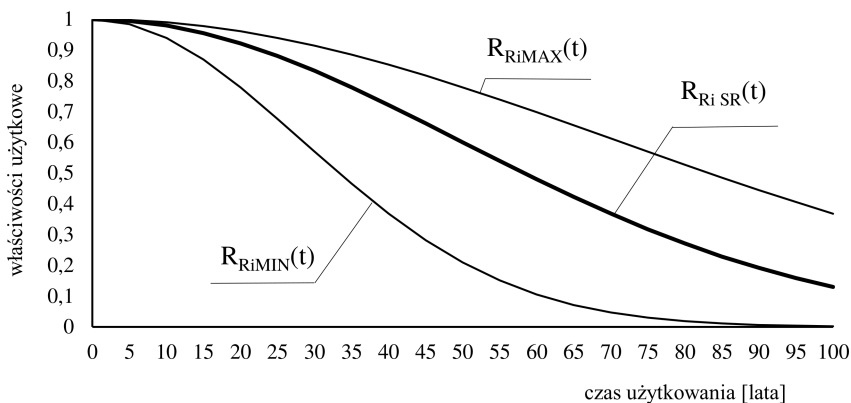
Na rysunku 3 przedstawione są wykresy zmian właściwości użytkowych drewnianej konstrukcji więźby dachowej.



Rys. 3. Zmiany właściwości użytkowych drewnianej więźby dachowej wg modelu PRRD.
Źródło: opracowanie własne.

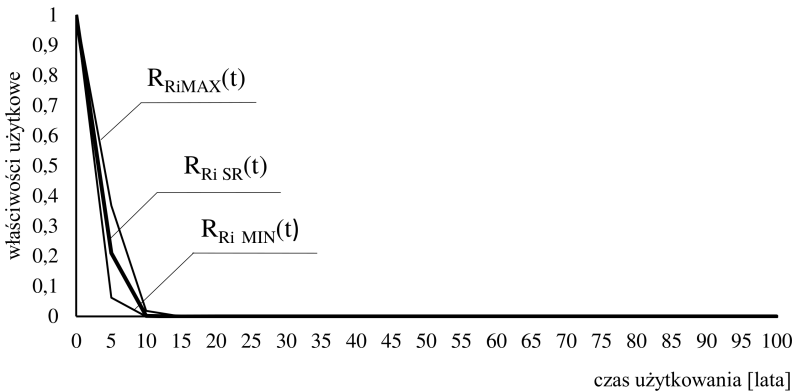
10.4.3. PROGNOZA ZMIAN WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH ELEMENTÓW WYKOŃCZENIOWYCH

Okres trwałości dachówki ceramicznej podawany jest od 40 do 100 lat. Na rysunku 4 pokazane są zmiany właściwości użytkowych dachówki karpiówki.

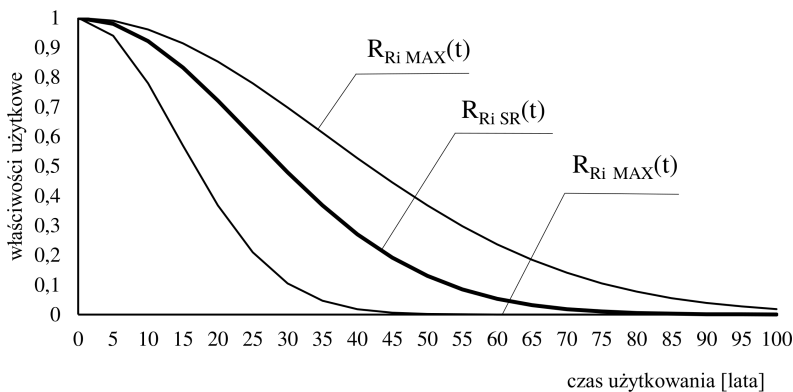


Rys. 4. Zmiany właściwości użytkowych pokrycia dachówką karpiówką wg modelu PRRD.
Źródło: opracowanie własne.

Zmiany właściwości użytkowych innych przykładowych elementów budynku przedstawione są na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Zmiany właściwości użytkowych powłok malarskich ścian i sufitów wg modelu PRRD.
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6. Zmiany właściwości użytkowych przewodów c.o. wg modelu PRRD.
Źródło: opracowanie własne.

10.4.4. OCENA DOKŁADNOŚCI PROGNOZY

Walidacja zaproponowanej metody PRRD została przeprowadzona w oparciu o wyniki kontroli okresowych istniejących, aktualnie użytkowanych budynków mieszkalnych w liczbie 340 obiektów, zlokalizowanych w miejscowości Żary w woj. lubuskim. Wszystkie budynki objęte analizą wykonane są w technologii tradycyjnej, ściany badanych obiektów zbudowano z cegły pełnej, stropy są drewniane belkowe, schody oraz więźba drewniane, pokrycie dachu dachówką ceramiczną. Budynki zostały podzielone na grupy badawcze zależne od wieku obiektów, tzn. na grupę budynków 5-letnich, 10-letnich, 15-letnich, 20-letnich itd.

Budynki poddane zostały ocenie stanu technicznego w roku 2005, a później ponownie w roku 2010 i 2015. Zostały określone stopnie zużycia technicznego elementów składowych budynków, między innymi ścian nośnych.

Średnie wartości stopnia zużycia ścian w budynkach uporządkowane zostały w ciąg wartości zmiennej czasu, która oznacza długość użytkowania budynków. Wartości stopnia zużycia technicznego stanowią zbiór obserwacji statystycznych charakteryzujących zmiany poziomu zjawiska w czasie. Zmiany te, dla pojedynczego elementu, opisane jako jednowymiarowy szereg czasowy zmiennej $S_Z(t)$ ($S_Z(t)$ – stopień zużycia elementu) uporządkowane są według wartości zmiennej czasowej t ($t = 1, \dots, n$).

W analizie zmian niezawodności urządzeń (Prażewska, 1987) stopień zużycia $S_Z(t)$ uzależniany jest od intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ w następujący sposób:

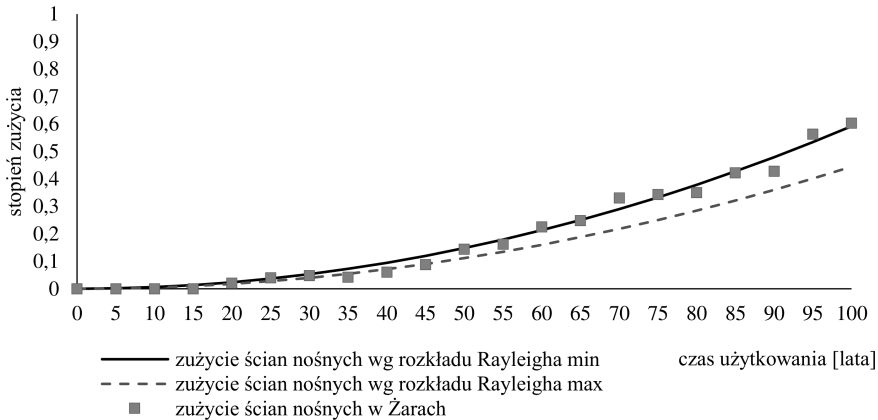
$$S_Z(t) = \int_0^t \lambda(t) dt. \quad (24)$$

Intensywność uszkodzeń $\lambda(t)$ dla modelu PRRD jest określona zależnością (20).

W oparciu o powyższe zależności, stopień zużycia w modelu PRRD jest funkcją zależną od czasu:

$$S_Z(t) = \frac{t^2}{T_R^2}. \quad (25)$$

Zgodnie z zależnością (25) zostały wyznaczone zmiany zużycia ścian murowanych z cegły w pełnym okresie ich użytkowania. Okres trwałości ścian T_R przyjęto taki, jaki jest podawany w literaturze (wg tabeli 1), czyli dla ścian murowanych z cegły od 130 do 150 lat.



Rys. 7. Zmiany stopnia zużycia ścian murowanych wg PRRD oraz uśrednione wyniki oceny stanu technicznego ścian budynków w Żarach. Źródło: opracowanie własne.

Wartość prognostyczna metody może być określona ex ante, czyli w chwili wyznaczania prognozy, lub ex post, czyli po upływie czasu, na który prognoza była wyznaczona. Błąd prognozy ex ante jest różnicą między rzeczywistą wartością

zmiennej S_z w chwili t a prognozą na tę chwilę. Błąd V_t jest funkcją różnicy między rzeczywistą wielkością y_t a prognozą y_t^* , V_t oznacza progową wartość błędu zadaną np. przez odbiorcę prognozy:

$$V_t = f(y_t - y_t^*) \leq V_t^*. \quad (26)$$

Wartości stopnia zużycia ścian wg rozkładu Rayleigha zostały poddane weryfikacji. Wartości błędu prognozy V_t zawarte są w tabeli 2. Maksymalny błąd wynosi 6,56%. W prognozowaniu gospodarczym (Galanc, 1993) stosowane są kryteria dopuszczalności prognoz. Przyjmuje się, że jeżeli miernik dokładności predykcji ex ante (lub ex post) spełnia nierówność:

- $V_t \leq 3\%$, to prognozy są bardzo dokładne,
- $3\% \leq V_t \leq 5\%$, to prognozy uznawane są za dokładne,
- $5\% < V_t \leq 10\%$, to prognozy mogą być dopuszczalne,
- $V_t > 10\%$, to prognozy są niedopuszczalne.

Tabela 2.

Średnie wartości zużycia ścian nośnych budynków w Żarach oraz prognozowane wartości stopnia zużycia technicznego ścian nośnych. Źródło: opracowanie własne.

Lata użytkowania	Stopień zużycia ścian Wartości średnie			Predykcje stopnia zużycia wg modelu PRRD			Błąd prognozy V_t
	2005	2010	2015	min	max	średnio	
0	bd	bd	bd	0	0	0,0000	–
5	0,0000	bd	bd	0,0011	0,0015	0,0013	–0,0013
10	0,0020	0,0018	bd	0,0044	0,0059	0,0052	–0,0033
15	0,0120	0,0124	0,0128	0,0100	0,0133	0,0117	0,0007
20	0,0240	0,0238	0,0242	0,0178	0,0237	0,0208	0,0032
25	0,0420	0,0303	0,0400	0,0278	0,0370	0,0324	0,0050
30	0,0460	0,0462	0,0464	0,0400	0,0533	0,0467	–0,0005
35	0,0660	0,0664	0,0662	0,0544	0,0725	0,0635	0,0027
40	0,0840	0,0842	0,0844	0,0711	0,0947	0,0829	0,0013
45	0,0910	0,0884	0,0888	0,0900	0,1198	0,1049	–0,0155
50	0,1550	0,1255	0,1226	0,1111	0,1479	0,1295	0,0049
55	0,1880	0,1662	0,1802	0,1344	0,1790	0,1567	0,0214
60	0,2220	0,2002	0,2224	0,1600	0,2130	0,1865	0,0284
65	bd	0,2888	0,2992	0,1878	0,2500	0,2189	0,466
70	bd	bd	0,3166	0,2178	0,2899	0,2539	0,0627
75	0,3220	bd	bd	0,2500	0,3328	0,2914	0,0306
80	0,3280	0,3422	bd	0,2844	0,3787	0,3316	0,0656
85	0,4200	0,4664	0,4288	0,3211	0,4275	0,3743	0,0641
90	0,4200	0,4222	0,4262	0,3600	0,4793	0,4197	0,0031
95	0,4620	0,4488	0,4642	0,4011	0,5340	0,4676	–0,0093
100	0,5290	0,6002	0,5882	0,4444	0,5917	0,5181	0,0544

W przypadku zaproponowanego modelu predykcji stopnia zużycia ścian nośnych (gdzie $5\% < Vt \leq 10\%$), prognozę należy więc uznać za dopuszczalną.

O praktycznej przydatności danego rozkładu jako matematycznego modelu badania ewolucji stanu technicznego decyduje zgodność tego rozkładu z rozkładem empirycznym dla danych doświadczalnych. Wyniki oceny stanu technicznego budynków w Żarach potwierdzają skuteczność zaproponowanej metody badania procesu starzenia budynku wykonanego w technologii tradycyjnej przez zastosowanie zależności opartych na modelu PRRD.

10.5. PROGNOZA ZMIAN WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH CAŁEGO BUDYNKU

Budynek składa się z wzajemnie związanych ze sobą elementów składowych. Każdy element w budynku ma swoje zadanie. Najbardziej istotny wpływ na czas użytkowania mają elementy pełniące funkcje konstrukcyjne. Inne elementy pomocnicze wpływają w mniejszym stopniu na właściwości użytkowe obiektu, a ich wpływ wynika przede wszystkim z faktu, że uszkodzenia elementów pomocniczych mogą powodować zmiany parametrów elementów podstawowych. W wyznaczaniu właściwości użytkowych całego budynku, który jest zbiorem m elementów składowych, uwzględnione zostały intensywności wpływu właściwości użytkowych elementów składowych w postaci wag A_i poszczególnych elementów. Ich wartość ustala się stosując skalę służącą do oceny jakości budynku (Arendarski, 1978).

Zmiany właściwości użytkowych budynku $R_B(t)$ w czasie t określone są zależnością:

$$R_B(t) = \sum_{i=1}^m A_i R_{RiSR}(t), \quad (27)$$

gdzie:

$R_B(t)$ – zmiany właściwości użytkowych całego budynku w czasie t wg modelu PRRD,

A_i – waga i -tego elementu,

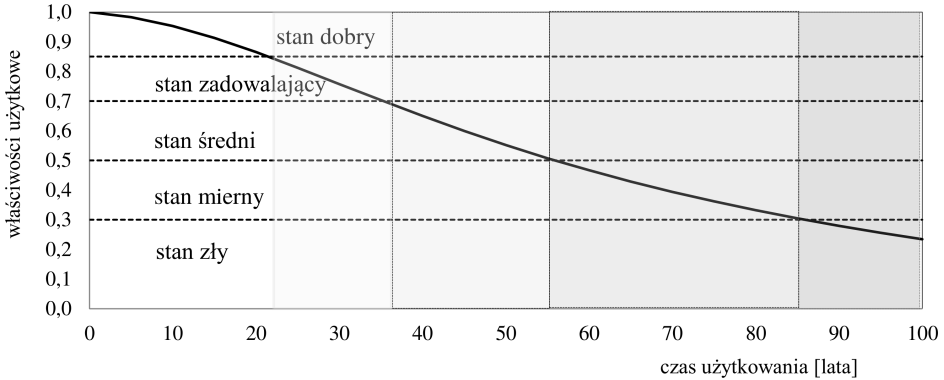
$R_{RiSR}(t)$ – zmiany właściwości użytkowych elementu i w czasie t wg modelu PRRD,

i – numer elementu budynku,

m – liczba wszystkich elementów.

Na rysunku 8 przedstawiony jest prognozowany proces starzenia w postaci predykcji zmian właściwości użytkowych budynku mieszkalnego wykonanego w technologii tradycyjnej o rozwiązaniach materiałowych wskazanych w tabeli 1. Przyjęto między innymi, że ściany nośne i ścianki działowe tego budynku są murowane z cegły pełnej na zaprawie cementowo-wapiennej, więźba dachowa, stropy

i schody, stolarka, podłogi są drewniane z drewna sosnowego, pokrycie dachu dachówką ceramiczną, instalacje gazowe, przewody wod-kan ze stali ocynkowanej.



Rys. 8. Zmiany właściwości użytkowych całego budynku $R_B(t)$ wg modelu PRRD.
Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 8 dodatkowo zaznaczone zostały granice poszczególnych stanów technicznych, określone przez obszar stanów technicznych – dobry, zadowalający, średni, mierny, zły. Wartości graniczne stanów technicznych zostały przyjęte zgodnie z wartościami odpowiadającymi stopniom zużycia technicznego. Wykres zmian właściwości użytkowych budynku pozwala na określenie terminów osiągnięcia stanów technicznych przez budynek podczas jego użytkowania. Przy założeniu zaniechania przedsięwzięć remontowych budynku, stan techniczny dobry zmienia się na zadowalający w 22-tym roku użytkowania, na średni w 35-tym roku, na mierny w 55-tym roku, na zły w 85-tym roku.

10.6. ZASTOSOWANIE MODELU PRRD W PLANOWANIU PRZEDSIĘWZIĘĆ REMONTOWYCH

10.6.1. MODEL PRRD DLA BUDYNKÓW REMONTOWANYCH

Zapewnienie właściwego stanu technicznego budynku w okresie jego użytkowania można jedynie uzyskać przez prawidłowo prowadzoną działalność remontową. Zaproponowany model PRRD można zastosować do modelowania sytuacji w analizie zmian właściwości użytkowych budynku remontowanego. Metoda prognozy zmian właściwości użytkowych PRRD może być wspomaganie działań, których celem jest unikanie nieodpowiedniego stanu technicznego budynku. Trafne przewidywanie niekorzystnych zmian oraz prewencyjne naprawy i remonty pozwolą na zapewnienie właściwego stanu technicznego obiektu.

Efektywna eksploatacja budynku powinna być oparta na utrzymaniu odpowiedniego poziomu właściwości użytkowych budynku, a realizacją tego zadania

są procesy remontowe. Wszelkie rodzaje przedsięwzięć remontowych mają istotny wpływ na stan techniczny obiektu w czasie dalszej jego eksploatacji. Pełna charakterystyka obiektu remontowanego musi uwzględniać stan początkowy i zakres robót remontowych. Na tej podstawie można określić przebieg zmian właściwości użytkowych w czasie, przed i po remoncie.

Prognoza zmian właściwości użytkowych $R_M(t)$ budynku naprawianego, gdzie t_p jest terminem remontu, jest wyrażona wzorem (28):

$$R_M(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{m-r} A_i \exp\left(-\left(\frac{t}{T_{Ri}}\right)^2\right) & \text{jeżeli } t \in (0, t_{pi}), \\ \sum_{i=1}^r A_i \exp\left(-\left(\frac{t-t_{pi}}{T_{Ri}}\right)^2\right) & \text{jeżeli } t \in (t_{pi}, T), \end{cases} \quad (28)$$

gdzie:

- r – liczba elementów remontowanych w danym cyklu międzynaaprawczym,
- m – liczba wszystkich elementów,
- A_i – waga i -tego elementu,
- t_{pi} – termin przeprowadzenia remontu elementu i ,
- T_{Ri} – okres trwałości i -tego elementu.

10.6.2. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA PRRD

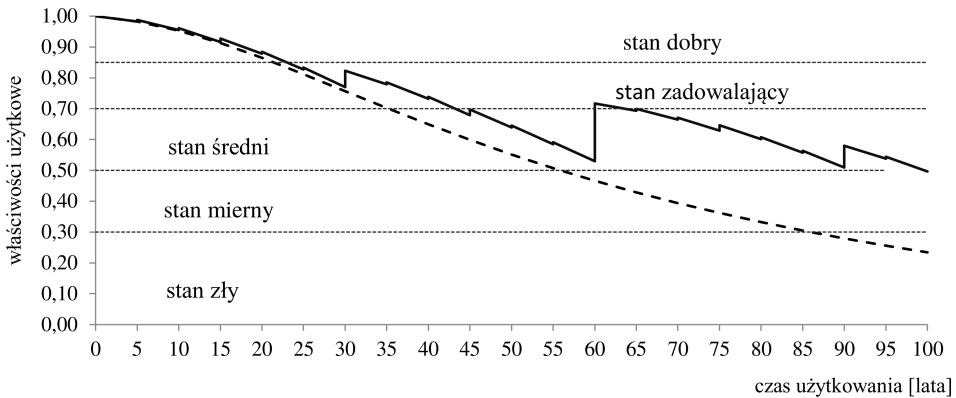
Przyjęto następujące założenia:

1. Budynek jest wykonany w technologii tradycyjnej a rozwiązania materiałowo-konstrukcyjne przyjęto z tabeli 1.
2. Częstotliwości remontów dla elementów budynku wynoszą:
 - $c_1 = 5$ cykl 5-letni – obejmujący powłoki malarskie ścian i sufitów, powłoki malarskie olejne stolarki,
 - $c_2 = 15$ rynny i rury spustowe, osprzęt instalacji elektrycznych,
 - $c_3 = 30$ schody drewniane, przewody wod-kan, armatura wod-kan, przewody gazowe,
 - $c_4 = 60$ stropy drewniane, więźba dachowa, pokrycie dachówką ceramiczną, tynki zewnętrzne, stolarka okienna i drzwiowa, oszklenie, podłogi i posadzki, tynki wewnętrzne, kotły i grzejniki c.o., przewody instalacji elektrycznych.
3. Terminy prac remontowych elementów składowych budynku wynikają z kończących się okresów trwałości tych elementów.

Propozycję terminów wykonywania remontów planowo-zapobiegawczych określono wstępnie na podstawie doświadczeń oraz kończących się okresów trwałości

elementów składowych budynku. Proponowane prace remontowe mają na celu utrzymanie budynku w dobrym, zadowalającym lub średnim stanie technicznym, polegają na profilaktycznym działaniu i zapobiegają przed przedwczesnym powstawaniem niekorzystnych zmian.

Uzyskane wyniki predykcji zmian właściwości użytkowych remontowanego budynku wg reguły (28) dla przyjętych wcześniej założeń przedstawione są na rysunku 9. W celach porównawczych na rysunku tym linią przerywaną przedstawione są również zmiany właściwości użytkowych podczas eksploatacji budynku nieremontowanego.



Rys. 9. Prognoza zmian stanu technicznego budynku remontowanego oraz budynku nieremontowanego (tzw. krzywa życia). Źródło: opracowanie własne.

Modelowanie różnych możliwych scenariuszy eksploatacyjnych budynku według zaproponowanej metody pozwoli na optymalne planowanie przedsięwzięć remontowych budynku. Przedstawione na rysunku 9 zmiany właściwości użytkowych budynku ilustrują zastosowanie przykładowej strategii działań remontowych wybranych elementów budynku w przyjętych terminach.

Charakterystyki różnych strategii wyboru działań remontowych mają wpływ na kształt krzywej życia budynku. Na podstawie uzyskanych danych możliwa jest analiza porównawcza efektywności niezawodnościowej budynku i wybór najbardziej odpowiedniej dla danych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych.

10.7. PODSUMOWANIE

We wszystkich okresach cyklu życia obiektu technicznego występują potrzeby przewidywania uszkodzeń. Określenie zmian właściwości użytkowych budynków, zgodnie z zaleceniami normowymi, wymaga stosowania krzywych zagrożenia PSLDC (Predicted Service Life of Component) jako narzędzi wspomagających w planowaniu terminów remontów. Zaproponowany model zmian właści-

wości użytkowych budynku mieszkalnego w funkcji czasu PRRD (Prediction of Reliability according to Rayleigh Distribution) wspomaga prognozowanie zmian stanu technicznego budynku.

Prognoza degradacji budynku powinna być pomocna w procesach reagowania na uszkodzenia starzeniowe obiektów, a stosowanie przez zarządców krzywych zagrożenia może być przydatne jako wspomaganie planowanie przedsięwzięć remontowych.

10.8. BIBLIOGRAFIA

- ARENDAŃSKI, J. (1978). *Trwałość i niezawodność budynków mieszkalnych*. Warszawa, Wydawnictwo Arkady.
- BILIŃSKI, T. (2001). Brak szans polepszenia sytuacji mieszkaniowej w Polsce. *Kwartalnik Naukowy Problemy rozwoju budownictwa*, 2, 1–9.
- Bucoń, R., Sobotka, A. (2006). *Niezawodność eksploatacyjna obiektów budowlanych*. Prace naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, nr 87, s. 265–272.
- CORDEIRO, G., ORTEGA, M., LEMONTE, A. (2013). The Exponential-Weibull Lifetime Distribution. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 84(12), 1–15.
- CZAPLIŃSKI, K., MARCINKOWSKA E. (1998). *Typologia starych budynków mieszkalnych ze względu na potrzebę ich odnowy*. Materiały konferencyjne 34 Konferencji Naukowej KILiW PAN i PZITB, Krynica, s. 18–25.
- FIRKOWICZ, S. (1997). *Jednowymiarowe rozkłady cech mierzalnych wyrobów*. Materiały konferencyjne Konferencji Instytutu Badań Systemowych PAN „Metody statystyczne w sterowaniu jakością produkcji”. Wrocław – Warszawa – Kraków – Gdańsk 1977. Wydawnictwo PAN Ossolineum, s. 5–34.
- GALANC, T. (1993). *Metody wspomagania procesu zarządzania. Część II: Decyzyjne modele liniowe i prognozowanie ekonometryczne*. Wrocław, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej.
- KASPROWICZ, T. (2005). *Eksploatacja obiektów budowlanych*. Materiały konferencyjne 51 Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB – Krynica 2005, 171–178.
- KASPROWICZ, T. (2015). *Inżynieria przedsięwzięć budowlanych. Rekomendowane metody i techniki*. Warszawa, Wydawnictwo PAN KILiW.
- KHELASSI, A., THEILLIOL, D., WEBER, P. (2011). Reconfigurability analysis for reliable fault-tolerant control design. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 431–439.
- KUCHARSKA-STASIAK E. (1992). *Ekonomiczne problemy zużycia i remontowania zasobów mieszkaniowych*. Materiały konferencyjne 38 Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB Krynica 1992, s. 81–87.

- NIZIŃSKI, S. (2001). *Elementy diagnostyki obiektów technicznych*. Olsztyn, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego.
- NOWAK, A.S., COLLINS K.R. (2000). *Reliability of Structures*. Mc Graw-Hill Int. Edition.
- NOWAKOWSKI, T. (1999). *Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- NOWOGOŃSKA, B. (2014). Mathematical reliability model of building components by Rayleigh. *Civil Environmental Engineering Reports*, nr 15, 87–97.
- NOWOGOŃSKA B. (2003). *Wybrane czynniki determinujące programowanie działalności remontowej budynków wykonanych w technologii tradycyjnej* (rozprawa doktorska pod kierunkiem A. Skarzyńskiego). Zielona Góra, Uniwersytet Zielonogórski.
- NOWOGOŃSKA, B. (2016). The Life Cycle of a Building as a Technical Object. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 60 (3).
- OLEARCZUK, E. (1999). *Eksploatacja budynków, problemy, prawidłowości, postępowanie*. Warszawa, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji.
- ORŁOWSKI, Z., RADZIEJOWSKA A. (2016). *Ocena socjalnych właściwości użytkowych budynków mieszkalnych*. Materiały budowlane nr 6/2016: 127–129.
- OWCZAREK, S., ORŁOWSKI, Z., SZKLENNIK, N. (2006). *Koncepcja systemowej oceny zużycia budynków*. W Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Wyd. Politechnika Wroclawska, nr 87, 341–346.
- PRAŻEWSKA, M. (1987). *Niezawodność urządzeń elektronicznych*. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- Protokoły okresowej kontroli stanu technicznego budynków mieszkalnych zarządzanych przez Zarządcę Wspólnot Mieszkańczych „Twój Dom” Żary, 2005 r., 2010 r., 2015.
- RUNKIEWICZ, L. (2002). *Zagrożenia obiektów budowlanych a potrzeby remontów i wzmocnień*. Materiały konferencyjne X Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych”, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, 349–360.
- SKARZYŃSKI, A. (2000). *Próba ogólnej systematyki sytuacji kryzysowych oraz wybranych towarzyszących im działań techniczno-organizacyjnych*. Materiały konferencyjne XI Konferencji Inżynierii Wojskowej nt. „Zarządzanie i organizacja działań w sytuacjach kryzysowych” Warszawa. 43–52.
- SOBOTKA, A., BUCOŃ, R. (2005). *Kierunki rozwoju metod przewidywania okresu użytkowania obiektów budowlanych*. Problemy Rozwoju Miast, nr 4/2005, s. 58–67.
- SOTSKOW, B.S. (1973). *Niezawodność elementów i urządzeń automatyki*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- ŚCIŚLEWSKI, Z. (1995). *Trwałość budowli*. Kielce, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej.

- WALPOLE, R.E., MYERS, R.H. (1985). *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. London, Macmillan Publishing Company.
- WINNICZEK, W. (1993). *Wycena budynków i budowli podejściem odtworzeniowym*. Wrocław, CUTOB-PZITB.
- PN-ISO 15686-1: 2005 Budynki i budowle. Planowanie okresu użytkowania. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-ISO 15686-2: 2005 Budynki i budowle. Planowanie okresu użytkowania. Część 2. Procedury związane z przewidywanym okresem użytkowania.
- PN-ISO 15686-7 Budynki i budowle. Planowanie okresu użytkowania. Część 7: Ocena właściwości użytkowych na podstawie danych z praktyki dotyczących okresu użytkowania.
- PN-ISO 7162:1999 Wymagania użytkowe w budownictwie. Treść i układ norm dotyczących oceny właściwości użytkowych.