Original research paper (Oryginalny artykuł naukowy)
MATERIAŁY BUDOWLANE SCIENCE
materialybudowlane.info.pl/science

mgr inż. Aleksandra Kurowska-Rajchel[1)*)]
ORCID: 009-003-5257-5535
dr hab. inż. Beata Nowogońska, prof UZ[2)]
ORCID: 0000-0003-6343-4840

Influence of modernization projects on the performance characteristics of residential units

Wpływ przedsięwzięć modernizacyjnych na właściwości użytkowe lokali mieszkalnych

DOI: 10.15199/33.2026.08.08

Abstract: This article presents the influence of modernization work on the performance characteristics of apartments in multi-family residential buildings. The study adopted the PRRD (Prediction of Reliability according to Rayleigh Distribution) method for predicting building aging, which enables the modeling of the degradation of building components. The approach used demonstrated that properly executed modernization works, similar to renovation works, have a positive impact on the technical condition of residential units. They serve as a factor limiting the progression of degradation processes and contribute to extending the service life of the apartments. The analysis confirms the validity of undertaking modernization projects from both a technical and functional perspective. This constitutes a key element of a long-term strategy for the management of housing stock.

Keywords: modernization projects; living comfort; technical condition; performance characteristics.

Streszczenie: W artykule omówiono wpływ przeprowadzenia robót modernizacyjnych na właściwości użytkowe mieszkań w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych. W badaniach zaadaptowano metodę predykcji procesu starzenia budynków PRRD (Prediction of Reliability according to Rayleigh Distribution), umożliwiającą modelowanie degradacji elementów składowych budynku. Wykorzystane podejście pozwoliło na udowodnienie, że prawidłowo przeprowadzone prace modernizacyjne, podobnie jak roboty remontowe, korzystnie wpływają na stan techniczny lokali mieszkalnych. Są one czynnikiem ograniczającym postęp procesów degradacyjnych i przyczyniają się do wydłużenia okresu użytkowania mieszkań. Przeprowadzona analiza potwierdza zasadność podejmowania działań modernizacyjnych zarówno pod względem technicznym, jak i użytkowym. Stanowi to istotny element długoterminowej strategii eksploatacji zasobów mieszkaniowych.

Słowa kluczowe: przedsięwzięcia modernizacyjne; komfort użytkowania; stan techniczny; właściwości użytkowe.

The management of multi-family residential buildings is a complex task due to the large number of occupants with diverse requirements, preferences, and lifestyles, all of which evolve over time [1, 2]. It becomes necessary to consider not only the current needs of residents but also to adopt a holistic approach encompassing planning conditions and directions of urban development [3, 4].

In multi-family buildings, two zones can be distinguished: common areas and residential units. For common areas, requirements related to safety of use, accessibility (including for people with limited mobility) [5], and the maintenance of appropriate aesthetics and technical condition are of key importance; these are often regulated by law, including fire safety regulations. In the case of residential units, occupants have considerable freedom to shape the space, adapting it to their individual expectations and requirements [6, 7]. The same floor area can be used in different ways, including for residential, recreational, or remote work purposes. The functional characteristics of a residential unit are therefore a combination of its technical features, the way it is laid out, and its furnishings, all of which enhance the comfort of use [8, 9].

Zarządzanie budynkami wielorodzinnymi jest skomplikowane, co wynika z dużej liczby użytkowników o różnych wymaganiach, preferencjach oraz stylu życia, które dodatkowo ulegają zmianom w czasie [1, 2]. Konieczne staje się uwzględnianie nie tylko bieżących potrzeb mieszkańców, lecz także holistyczne podejście obejmujące uwarunkowania planistyczne oraz kierunki rozwoju przestrzeni miejskiej [3, 4]. W budynkach wielorodzinnych można wyróżnić dwie strefy: części wspólne oraz lokale mieszkalne. W przypadku części wspólnych kluczowe znaczenie mają wymagania związane z bezpieczeństwem użytkowania, dostępnością (w tym osób o ograniczonej ruchomości) [5], a także utrzymaniem odpowiedniej estetyki i stanu technicznego, co często regulują przepisy prawa, w tym przeciwpożarowe. W przypadku lokali mieszkalnych użytkownicy posiadają dużą swobodę kształtowania przestrzeni, dostosowując ją do indywidualnych oczekiwań i wymagań [6, 7]. Ta sama powierzchnia lokalu może być wykorzystywana w odmienny sposób, obejmując m.in. funkcje mieszkalne, rekreacyjne czy związane z pracą zdalną. Właściwości użytkowe lokalu mieszkalnego są zatem wypadkową jego cech technicznych i sposobu jego zagospodarowania oraz wyposażenia, zwiększających komfort użytkowania [8, 9].

Wraz z upływem czasu następuje pogorszenie stanu technicznego elementów budynku, co prowadzi do pogorszeina właściwości użytkowych lokali [10]. Brak odpowiednich działań,

[1)] Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Technicznych Uniwersytetu Zielonogórskiego
[2)] Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Budownictwa
[*)] Adres do korespondencji: a.kurowska@stud.uz.zgora.pl

Over time, the technical condition of a building's components deteriorates, leading to a decline in the performance characteristics of the premises [10]. A lack of appropriate measures – including maintenance, repairs, and modernization – can result in a condition that prevents further use of the building. Maintaining proper technical condition therefore requires a deliberate policy that includes restoration and modernization efforts [11].

To assess the impact of renovation and modernization projects on the functional characteristics of residential units, an analysis was conducted of 42 multi-family residential buildings located in Zielona Gora, which constitute the social housing stock intended for rent. Residential units are handed over to tenants in a condition suitable for occupancy, in accordance with applicable regulations. In practice, tenants often supplemented the furnishings themselves, which serves as a starting point for further changes and modernization of the living space.

Additional fixtures and modifications to the layout and standard of the dwelling not only improved comfort but may also affect the technical condition of the building's components [12]. This provided the basis for conducting research on a quantitative assessment of the impact of modernization projects on the functional characteristics of residential units.

Categories of modernization projects

An analysis of the operational phase of 42 multi-family residential buildings over a 10-year period was conducted, which identified 19 categories of modernization work (Table 1), including changes to the functional layout of units, replacement of fixtures, and modifications to building systems. The table also includes modernization factors reflecting the positive or neutral impact of each category of work on the technical condition of the residential unit.

Renovation projects are often complex in nature, as they involve several categories of work carried out simultaneously. This is because improvements typically affect entire rooms (bathrooms, kitchens, bedrooms, hallways, or even the entire apartment). This necessitates the coordination of work related to finishing, installations, and furnishings. Such complexity gives rise to various implementation risks, which should be taken into account during the planning and execution phases [13÷15]; however, their presence does not constitute a significant barrier for users who decide to undertake a renovation project. It is worth noting that a total of 3,035 modernization projects were completed during the analyzed 10-year period.

Analysis of the impact of modernization on the functional properties of residential units

Building components age, leading to a gradual deterioration of their performance characteristics [16]. According to the terminology of the PN-ISO 15686–1 standard, performance characteristics are defined as the quality level of a building's features that determine its ability to fulfill the required functions at a specific point in its service life [17]. These properties

w tym konserwacji, remontów i modernizacji, może skutkować stanem uniemożliwiającym dalsze użytkowanie obiektu. Utrzymanie właściwego stanu technicznego wymaga zatem prowadzenia świadomej polityki obejmującej działania odtworzeniowe i modernizacyjne [11].

W celu oceny wpływu przedsięwzięć remontowych i modernizacyjnych na właściwości użytkowe lokali mieszkalnych przeprowadzono analizę 42 budynków mieszkalnych wielorodzinnych zlokalizowanych w Zielonej Górze, stanowiących zasób budownictwa społecznego przeznaczonego na wynajem. Lokale mieszkalne przekazywano użytkownikom w standardzie umożliwiającym zamieszkanie, zgodnie z obowiązującymi przepisami. W praktyce wyposażenie często było uzupełniane przez najemców, co stanowi punkt wyjścia do dalszych zmian i modernizacji przestrzeni mieszkalnej. Dodatkowe wyposażenie oraz modyfikacja układu i standardu lokalu nie tylko poprawiały komfort użytkowania, lecz również mogły wpływać na stan techniczny elementów budynku [12]. Stanowiło to podstawę do podjęcia badań nad ilościowym wpływem przedsięwzięć modernizacyjnych na właściwości użytkowe lokali mieszkalnych.

Kategorie robót modernizacyjnych

Przeprowadzona została analiza etapu użytkowania 42 budynków mieszkalnych wielorodzinnych w okresie 10 lat, dzięki której zidentyfikowano 19 kategorii robót modernizacyjnych (tabela), obejmujących zmiany układu funkcjonalnego lokali, wymianę elementów wyposażenia oraz ingerencje w instalacje. Tabela zawiera również współczynniki modernizacji odzwierciedlające pozytywny lub neutralny wpływ kategorii prac na stan techniczny lokalu mieszkalnego.

Przedsięwzięcia modernizacyjne nierzadko mają charakter złożony, ponieważ obejmują równocześnie kilka kategorii robót. Wynika to z faktu, że wprowadzanie ulepszeń dotyczy zazwyczaj całych pomieszczeń (łazienek, kuchni, pokoi, przedpokoi lub nawet całego mieszkania). Pociąga to konieczność syntezy prac dotyczących wykończenia, instalacji i wyposażenia. Taka złożoność sprzyja występowaniu różnych ryzyk realizacyjnych, które powinny być brane pod uwagę na etapie planowania i prowadzenia robót [13÷15], jednak ich obecność nie stanowi istotnej bariery dla użytkowników, którzy decydują się na podjęcie przedsięwzięcia modernizacyjnego. Warto podkreślić, że w analizowanym 10-letnim okresie wykonano łącznie 3035 prac modernizacyjnych.

Analiza wpływu przeprowadzania modernizacji na właściwości użytkowe lokali

Elementy budynków ulegają starzeniu, co prowadzi do stopniowego pogarszania się ich właściwości użytkowych [16]. Zgodnie z terminologią normy PN-ISO 15686-1, właściwości użytkowe rozumiane są jako poziom jakościowy cech budynku decydujących o możliwości spełniania przez niego wymaganych funkcji w określonym momencie eksploatacji [17]. Nie mają one charakteru stałego, lecz zmieniają się wraz z upływem

are not static but change over time as a result of aging processes, operational impacts, and maintenance activities, including modernization [17, 18, 19]. The concept of **performance characteristics** should be distinguished from **the technical condition of a building**, which refers to the level of technical quality of building components, reflects the degree of their wear and tear, and indicates their ability to meet technical requirements at a given point in time during use [20]. In contrast, performance characteristics result from the building's operation over time and are influenced by both the technical condition of its components and maintenance, repair, and modernization activities. A deterioration in technical condition leads to a gradual decline in performance characteristics, while modernization activities can contribute to their improvement [18].

Categories of modernization projects
Kategorie robót modernizacyjnych

Category of Modernization Projects/ Kategoria robót modernizacyjnych	Modernization Factor/ Współczynnik modernizacji
Combining Rooms Połączenie pomieszczeń	1.05
Dividing Rooms/Wydzielenie pomieszczeń	1.03
Replacement of Residential Equipment/ Wymiana urządzeń wyposażenia lokalu mieszkalnego	1.30
Replacing a Bathtub with a Shower Enclosure/ Wymiana wanny na kabinę prysznicową	1.09
Replacing a Shower Enclosure with a Bathtub/ Wymiana kabiny prysznicowej na wannę	1.00
Replacing the Ceiling Finish Layer/ Zmiana warstwy wykończeniowej sufitu	1.04
Replacing the Floor Finishing Layer/ Zmiana warstwy wykończeniowej podłóg	1.27
Replacing Wall Cladding/Zmiana okładzin ścian	1.24
Furniture Installation/ Wykonanie zabudowy meblowej	1.12
Replacement of Door Frames/ Wymiana stolarki drzwiowej	1.14
Implementation of Electrical Modifications/ Wprowadzenie zmian elektrycznych	1.09
Installation of a TV and Radio Antenna/ Montaż anteny RTV	1.03
Replacement of Window Frames/ Wymiana stolarki okiennej	1.03
Installation of window blinds/Montaż rolet okiennych	1.06
Air Conditioning System Installation/ Montaż systemu klimatyzacji	1.03
Installation of advertising elements/ Montaż elementów reklamowych	1.00
Improving the Sound Insulation of Interior Partitions/ Poprawa izolacyjności akustycznej przegród wewnętrznych	1.00
Smart Home System Installation/ Instalacja systemu typu inteligentny dom	1.00
Installation of an Exterior Safety Net (for a balcony)/ Montaż zewnętrznej siatki zabezpieczającej (balkonowej)	1.02

It is unacceptable to allow building components to suffer excessive damage due to the risk to the life and health of occupants; hence, it is so important to forecast changes in performance characteristics [17, 18]. It is generally accepted that multi-family residential buildings are designed to last 50 years [20]. A corresponding period has been adopted as the time horizon for forecasting the aging process of residential units.

To determine the impact of the renovations on the performance characteristics of residential units, *the Prediction of Reliability according to Rayleigh Distribution (PRRD)* model [21] was adopted; this model is based on the Rayleigh distribution, which is a special case of the Weibull distribution. This mathematical model distinguishes between:

- the scale parameter a = 2, which describes the trend in failure probability. In the case under analysis, the failure probability increases linearly over time. Component wear over the years is the main cause of its failure rate. This is a case of aging-related wear;
- the shape parameter b = 1/T, which determines the rate at which reliability declines, i.e., the degradation process.

czasu wskutek procesów starzenia, oddziaływań eksploatacyjnych oraz działań podejmowanych w ramach utrzymania obiektu, w tym modernizacji [17, 18, 19]. Pojęcie **właściwości użytkowych** należy odróżnić od **stanu technicznego budynku**, który odnosi się do poziomu jakości technicznej elementów budowlanych i odzwierciedla stopień ich zużycia oraz zdolność do spełniania wymagań technicznych w danej chwili użytkowania [20]. Natomiast właściwości użytkowe stanowią efekt funkcjonowania obiektu w czasie i pozostają pod wpływem zarówno stanu technicznego jego elementów, jak i działań konserwacyjnych, remontowych oraz modernizacyjnych. Pogarszanie stanu technicznego prowadzi do stopniowego pogarszania właściwości użytkowych, a działania modernizacyjne mogą przyczyniać się do ich poprawienia [18].

Niedopuszczalne jest doprowadzenie do nadmiernego uszkodzenia komponentów budynku ze względu na zagrożenie życia i zdrowia użytkowników, stąd tak ważne jest prognozowanie zmian właściwości użytkowych [17, 18]. Przyjmuje się, że wielorodzinne budynki mieszkalne projektuje się na 50 lat [20]. Analogiczny okres został przyjęty jako horyzont czasowy prognozy procesu starzenia lokali mieszkalnych.

W celu określenia wpływu przeprowadzonych modernizacji na właściwości użytkowe lokali mieszkalnych zaadaptowano model predykcyjny *Prediction of Reliability according to Rayleigh Distribution (PRRD)* [21], bazujący na rozkładzie Rayleigha, stanowiący szczególny przypadek rozkładu Weibulla. Ten model matematyczny wyróżnia:

- **parametr skali α = 2**, określający przebieg zmian prawdopodobieństwa awarii. W analizowanym przypadku prawdopodobieństwo awarii wzrasta liniowo z upływem czasu. Zużycie komponentu z biegiem lat jest główną przyczyną jego awaryjności. Mamy do czynienia ze zużyciem starzeniowym;
- **parametr kształtu β = 1/T**, określający prędkość zanikania niezawodności, czyli procesu degradacji.

In the model, the changes in the performance characteristics of the i-th building element that occur at time *t*, are defined by the following formula:

$$R_i(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{T_{Ri}}\right)^2\right] \quad (1)$$

where:

R_i (t) – changes in the performance characteristics of a building component during the service life *t*,

t – service life of the building [years],

T_{Ri} – service life of the i-th building component [years].

Treating a residential unit as a set of integrated elements, following Arendarski [22], appropriate weighting factors a_i were adopted for each i-th component. Hence, the reliability function of the entire building R_A (t) takes the form:

$$R_A(t) = \sum a_i R_i(t) \quad (2)$$

The impact of modernization projects was taken into account using modernization factors assigned to specific categories of work. These factors were determined based on a quantitative analysis of changes made to residential units over a 10-year period of operation of 42 multi-family residential buildings located in Zielona Gora.

The modernization factors were determined in three steps. In the first step, statistical data were collected – that is, the number of modernization projects in each category during the analyzed period was determined. Next, based on the collected data, a dimensionless relative index was determined using linear normalization in the range <0; 1>. The purpose of this transformation is to enable an assessment of the degree of implementation of a given modernization category in relative terms. The relative index $w_{wm,\,i}$ is described by the following equation:

$$w_{wm,i} = \frac{m - m_{min}}{m_{max} - m_{min}} \quad (3)$$

where:

m – the number of modernization projects in a given category of work carried out during the 10-year period under review,

m_{min}, m_{max} – the appropriate minimum and maximum number of modernization projects within the set of categories under analysis.

The next step involves transforming the wwm, i index into the range <1;1.30> to obtain the partial modernization factor $w_{m,\,i}$:

$$w_{m,\,i} = g_{min} + w_{wm,\,i} \cdot (g_{max} - g_{min}) \quad (4)$$

The upper limit of the partial modernization factor was set at g_{max} = 1,30. This value was determined based on the analysis in [22], where the following quality variants for buildings were assumed: 85% (low quality), 100% (medium quality), and 115% (high quality). This means that the total range between the extreme quality variants is 30%. This was adopted as the maximum impact of modernization on the analyzed performance characteristics. Adopting the range ⟨1.00; 1.30⟩ allows for a quantitative representation of the varied impact of modernization projects on the performance characteristics of residential units. At the same time, it limits the possibility of overestimating the effects of modernization, while remaining

W modelu zmiany właściwości użytkowych i-tego elementu budynku, które zachodzą w czasie *t*, określone są wzorem:

$$R_i(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{T_{Ri}}\right)^2\right] \quad (1)$$

gdzie:

R_i (t) – zmiany właściwości użytkowych komponentu budynku w czasie eksploatacji *t*;

t – czas eksploatacji budynku [lata];

T_{Ri} – okres trwałości i-tego elementu budynku [lata].

Traktując lokal mieszkalny jako zbiór elementów scalonych, podążając za Arendarskim [22], przyjęto odpowiednie współczynniki ważności a_i w przypadku każdego i-tego komponentu. Stąd funkcja niezawodności całego budynku R_A (t) przyjmuje postać:

$$R_A(t) = \sum a_i R_i(t) \quad (2)$$

Wpływ przedsięwzięć modernizacyjnych uwzględniono za pomocą współczynników modernizacji, przypisanych do poszczególnych kategorii robót. Współczynniki te wyznaczono na podstawie analizy ilościowej zmian wprowadzonych w lokalach mieszkalnych na przestrzeni 10-letniego okresu eksploatacji 42 wielorodzinnych budynków mieszkalnych, zlokalizowanych w Zielonej Górze. Wyznaczanie współczynników modernizacji przeprowadzono w trzech krokach. W pierwszym etapie zgromadzono dane statystyczne, czyli określono liczbę realizacji robót modernizacyjnych w poszczególnych kategoriach w analizowanym okresie. Następnie, na podstawie zgromadzonych danych, wyznaczono bezwymiarowy wskaźnik względny, wykorzystując normalizację liniową w przedziale <0; 1>. Przyjęta transformacja ma na celu umożliwienie oceny stopnia realizacji danej kategorii modernizacji w ujęciu względnym. Wskaźnik względny $w_{wm,i}$ opisany jest zależnością:

$$w_{wm,i} = \frac{m - m_{min}}{m_{max} - m_{min}} \quad (3)$$

gdzie:

m – liczba realizacji robót modernizacyjnych w danej kategorii robót, przeprowadzonych w analizowanym 10-letnim okresie;

m_{min}, m_{max} – odpowiednia minimalna i maksymalna liczba realizacji modernizacji w zbiorze analizowanych kategorii.

Kolejny krok polegał na transformacji wskaźnika $w_{wm,i}$ do przedziału <1;1,30>, w celu uzyskania cząstkowego współczynnika modernizacji $w_{m,i}$:

$$w_{m,\,i} = g_{min} + w_{wm,\,i} \cdot (g_{max} - g_{min}) \quad (4)$$

Jako górną granicę cząstkowego współczynnika modernizacji przyjęto g_{max} = 1,30. Wartość tę określono na podstawie analizy [21], gdzie w przypadku różnych wariantów jakościowych budynków przyjęto: 85% (niska jakość), 100% (średnia jakość) oraz 115% (wysoka jakość). Oznacza to, że całkowita rozpiętość pomiędzy skrajnymi wariantami jakości wynosi 30%. Przyjęto to jako maksymalny wpływ modernizacji na analizowane właściwości użytkowe. Przyjęcie przedziału ⟨1,00; 1,30⟩ pozwala na ilościowe odwzorowanie zróżnicowanego wpływu przedsięwzięć modernizacyjnych na właści-

consistent with the range of qualitative changes [22]. As a result, the obtained factors can be interpreted as a relative measure of the improvement in performance resulting from the implemented upgrades.

As a result, 19 partial modernization factors were determined for each category of work: $w_{m,1}$, $w_{m,2}$, $w_{m,3}$, …, $w_{m,19}$. Therefore, for the analyzed data, equation (4) takes the form:

$$w_{m,i} = 1 + w_{wm,i} \cdot (1{,}3-1) \quad (5)$$

$$w_{m,i} = 1 + w_{wm,\,i} \cdot 0{,}3 \quad (6)$$

A value of $w_{m,\,i} = 1$, corresponds to a situation in which no modernization work was carried out, or in which the residents opted for the type of modernization work they chose least frequently during the period under analysis. In contrast, the factor reaches its maximum value of 1.30 for the category of modernization work most frequently performed – i.e., the one prioritized by residents – namely, the replacement of household appliances. The final residential unit modernization factor W_m accounts for the combined impact of all improvements carried out simultaneously. It is defined as the product of the partial modernization factors:

$$W_m = w_{m,1} \cdot w_{m,2} \cdot w_{m,3} \cdot \ldots \cdot w_{m,n} \quad (7)$$

The adoption of the multiplicative model is based on the assumption that the final effect of modernization is the result of the combined impact of the construction work carried out, which affects the functional characteristics of residential units. An increase in the factors value indicates an increase in the beneficial impact of modernization projects on the technical condition of the apartments. Consequently, the functional characteristics of a residential unit, taking into account the impact of modernization measures, can be described mathematically as follows:

$$R_{AM}(t) = R_A(t) \cdot W_m \quad (8)$$

The effect of partial modernization factors on the aging process of a residential unit is shown in Figure 1.

The application of modernization factors shifts the curves toward higher values of performance characteristics, which means an improvement in the quality of use of the premises during its operational life. The best effect is observed in the initial period of use, while over time the differences between the variants gradually decrease. Regardless of the type of modernization, all curves show a downward trend, confirming the dominant influence of aging processes. Compared to the variant without modernization, the period during which higher performance levels (good and satisfactory) are maintained is extended.

Performance values exceeding 1.00 indicate an improvement in a residential unit's ability to fulfill its required functions relative to the adopted reference condition. In the model, the reference condition is defined as an unused residential unit at the time of occupancy. Values greater than one therefore re-

wości użytkowe lokali mieszkalnych. Jednocześnie ogranicza możliwość przeszacowania efektów modernizacji, zachowując zgodność z rozpiętością zmian jakościowych [22]. Dzięki temu uzyskane współczynniki mogą być interpretowane jako względna miara poprawy właściwości użytkowych wynikającej z przeprowadzonych ulepszeń.

W rezultacie wyznaczono 19 cząstkowych współczynników modernizacji w przypadku każdej z kategorii robót: $w_{m,1}$, $w_{m,2}$, $w_{m,3}$, …, $w_{m,19}$. Dlatego wzór (4) w przypadku przeanalizowanych danych przyjmuje postać:

$$w_{m,i} = 1 + w_{wm,i} \cdot (1{,}3-1) \quad (5)$$

$$w_{m,i} = 1 + w_{wm,\,i} \cdot 0{,}3 \quad (6)$$

Wartość współczynnika $w_{m,\,i} = 1$, odpowiada sytuacji, w której roboty modernizacyjne nie były realizowane lub wykonano roboty modernizacyjne, na jakie mieszkańcy w analizowanym okresie decydowali się najrzadziej. Natomiast maksymalną wartość 1,30 osiąga współczynnik w przypadku kategorii modernizacji najczęściej wykonywanych, tj. priorytetowej dla użytkowników – wymiana urządzeń wyposażenia mieszkania. Końcowy współczynnik modernizacji lokalu mieszkalnego W_m uwzględnia łączny wpływ wszystkich wykonanych równocześnie ulepszeń. Określono go jako iloczyn cząstkowych współczynników modernizacji:

$$W_m = w_{m,1} \cdot w_{m,2} \cdot w_{m,3} \cdot \ldots \cdot w_{m,n} \quad (7)$$

Przyjęcie modelu multiplikatywnego wynika z założenia, że końcowy efekt modernizacji jest rezultatem łącznego oddziaływania przeprowadzonych robót budowlanych, wpływających na właściwości użytkowe lokali mieszkalnych. Zwiększenie wartości współczynnika oznacza zwiększenie korzystnego wpływu przedsięwzięć modernizacyjnych na stan techniczny mieszkań. W rezultacie właściwości użytkowe lokalu mieszkalnego z uwzględnieniem wpływu działań modernizacyjnych można opisać matematycznie:

$$R_{AM}(t) = R_A(t) \cdot W_m \quad (8)$$

Wpływ cząstkowych współczynników modernizacji na przebieg funkcji starzenia lokalu mieszkalnego przedstawiono na rysunku 1. Zastosowanie współczynników modernizacji powoduje przesunięcie krzywych w kierunku większych wartości właściwości użytkowych, co oznacza poprawę jakości użytkowania lokalu w czasie jego eksploatacji. Najlepszy efekt obserwuje się w początkowym okresie użytkowania, natomiast wraz z upływem czasu różnice pomiędzy wariantami ulegają stopniowemu zmniejszeniu. Niezależnie od rodzaju modernizacji, wszystkie krzywe wykazują tendencję malejącą, co potwierdza dominujący wpływ procesów starzeniowych. W porównaniu z wariantem bez modernizacji uzyskuje się wydłużenie okresu utrzymania wyższych stanów użytkowych (dobrego i zadowalającego).

Właściwości użytkowe przekraczające wartość 1,00 oznaczają zwiększenie zdolności lokalu mieszkalnego do spełnia-

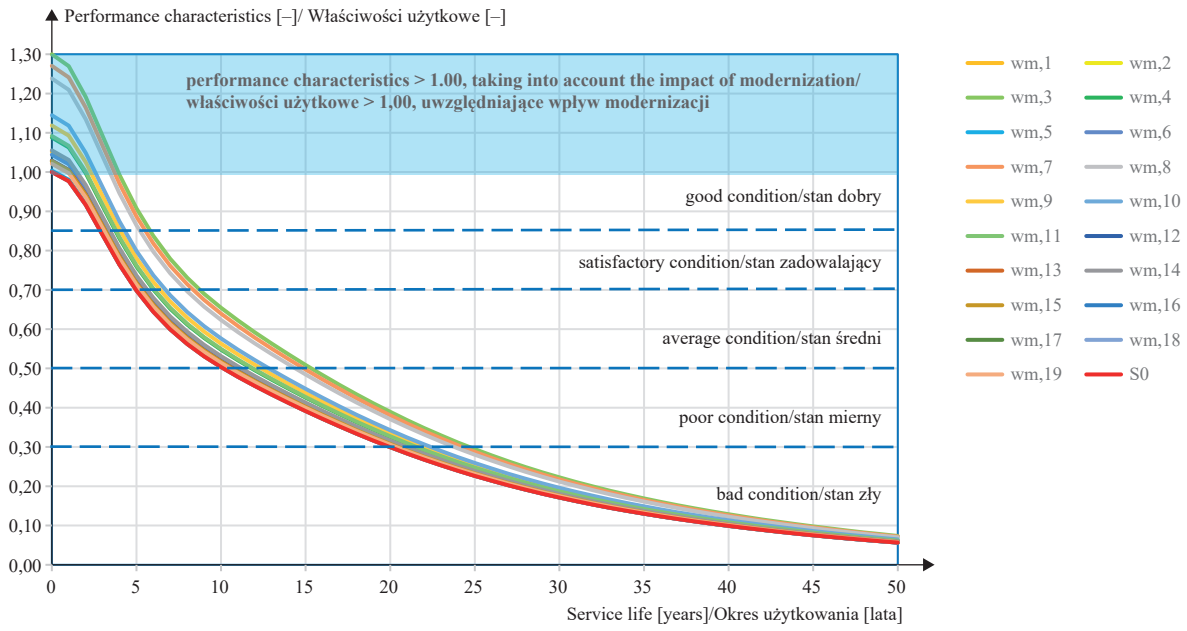

Fig. 1. Performance characteristocs of residential units, taking into account partial modernization factors for specific categories of projects
Rys. 1. Właściwości użytkowe lokali mieszkalnych z uwzględnieniem cząstkowych współczynników modernizacji w przypadku danych kategorii robót

flect the improvement in performance achieved as a result of modernization projects.

To illustrate the practical application of the modernization factor and its impact on the performance characteristics of residential units, three renovation strategies were analyzed (Figure 2). **Strategy S0** represents the baseline scenario, in which no changes were made throughout the assumed service life, and the materials used are of low quality. **Strategy S1** corresponds to a maintenance-oriented approach involving the repair or replacement of components in accordance with their expected service life. **Strategy S2** describes a scenario involving a change in occupants – the initial tenants use the apartment for 10 years without any modernization work, after which the new occupants carry out a modernization project involving the replacement of floor finishes and the renovation of wall coverings. Three years later, custom cabinetry was installed. In the analyzed variant, unlike the baseline scenario, medium-quality materials were used and maintained in accordance with their assumed service lives.

The following conclusions can be drawn from the analysis of the renovation strategies presented:

- Strategy S0, which illustrates the aging process of a residential unit, indicates a rapid increase in technical wear and tear – it exceeds 50% as early as the tenth year of use, while the unit reaches a poor technical condition by the twentieth year,
- Strategy S1, which involves conducting renovations in accordance with the established service life periods of components, is a rational solution from an operational standpoint, as the functional characteristics of the premises are maintained primarily at levels corresponding to good, satisfactory, and average condition,
- Strategy S2 presents a realistic scenario for the apartment's operational life. The implementation of modernization work

nia wymaganych funkcji względem przyjętego stanu odniesienia. W modelu za stan odniesienia przyjęto nieeksploatowany lokal mieszkalny w chwili oddania do użytkowania. Wartości większe od jedności odzwierciedlają zatem efekt poprawienia właściwości użytkowych osiągnięty w wyniku realizacji przedsięwzięć modernizacyjnych.

W celu zobrazowania praktycznego zastosowania współczynnika modernizacji oraz jego wpływu na właściwości użytkowe lokali mieszkalnych, przeanalizowano trzy strategie remontowe (rysunek 2). **Strategia S0** przedstawia wariant bazowy, w którym w całym przyjętym okresie użytkowania nie wprowadzono żadnych zmian, a zastosowane materiały charakteryzują się niską jakością. **Strategia S1** odpowiada podejściu eksploatacyjnemu polegającemu na naprawie lub wymianie elementów zgodnie z ich przewidywanym okresem trwałości. **Strategia S2** opisuje scenariusz zmiany użytkowników lokalu – początkowi lokatorzy eksploatują mieszkanie przez 10 lat bez ingerencji modernizacyjnych, po czym nowi użytkownicy przeprowadzają modernizację obejmującą wymianę warstw wykończeniowych podłóg oraz odnowienie okładzin ściennych. Po kolejnych trzech latach wykonana została zabudowa meblowa. W analizowanym wariancie, w odróżnieniu do bazowego, przyjęto zastosowanie materiałów o średniej jakości oraz ich utrzymanie zgodnie z przyjętymi okresami trwałości.

Z przeprowadzonej analizy przedstawionych strategii remontowych wynikają wnioski:

- strategia S0, obrazująca proces starzenia lokalu mieszkalnego, wskazuje na szybki wzrost zużycia technicznego – już w dziesiątym roku użytkowania przekracza 50%, natomiast stan techniczny zły osiągany jest w dwudziestym roku;
- strategia S1, zakładająca prowadzenie remontów zgodnie z przyjętymi okresami trwałości elementów, stanowi rozwią-

in the tenth year of use results in a marked improvement in performance (a transition from average to good condition). In the thirteenth year, an improvement in performance is also evident as a result of the modernization work. In this scenario, the apartment does not reach a poor technical condition until approximately the 50th year of use. Additionally, after ten and fourteen years, the performance value exceeds the baseline (equal to 1.00), which is a direct result of the modernization work carried out.

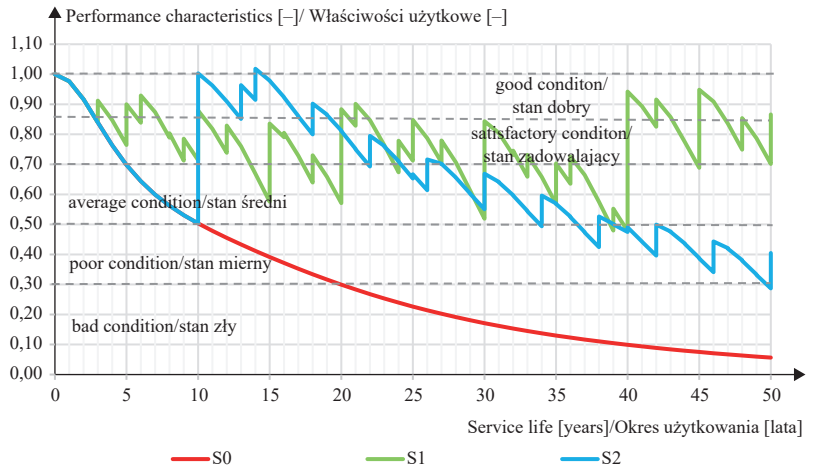

Fig. 2. A comparison of three renovation strategies (description in text)
Rys. 2. Porównanie trzech strategii remontowych (opis w tekście)

Summary

As a result of the research, 19 categories of modernization works were identified, and for each of them, partial modernization factors were determined using linear normalization and transformation to the range ⟨1; 1.30⟩, which made it possible to quantitatively represent the relative importance of the analyzed modernization measures. The final modernization factor was determined as the product of the partial factors, using a multiplicative model that reflects the synthetic nature of the impact of modernization projects carried out simultaneously.

he aim of the study was to develop a model that would allow for a quantitative assessment of the impact of modernization projects carried out by residential tenants during the operational life of buildings on changes in the functional characteristics of residential units. The model was based on an analysis of the frequency of specific categories of modernization work in the housing stock under study. It was assumed that more frequently carried out activities reflect modernization efforts that are significant in shaping the performance characteristics of the units, which describe their level of functionality and ability to meet usage requirements at a given point in time during the building's operational life. Consequently, the frequency of these works was used to determine modernization factors describing the potential impact of specific categories of measures on changes in performance characteristics over time. This approach allows the model to be based on actual modernization processes occurring during the use of buildings and to account for their impact on the building's aging process and changes in its technical condition.

The results obtained clearly indicate that renovations lead to a significant increase in the functional value of residential units, particularly during the initial period of use. Over time, their impact gradually diminishes as a result of aging processes. At the same time, it has been shown that measures related to

zanie racjonalne eksploatacyjnie, gdyż właściwości użytkowe lokalu utrzymują się głównie na poziomie odpowiadającym stanowi dobremu, zadowalającemu oraz średniemu;

■ strategia S2 przedstawia realistyczny przebieg eksploatacji mieszkania. Wprowadzenie robót modernizacyjnych w dziesiątym roku użytkowania skutkuje wyraźną poprawą właściwości użytkowych (przejście ze stanu średniego do dobrego). W trzynastym roku również widoczna jest poprawa właściwości użytkowych przez przeprowadzenie robót modernizacyjnych. W tym wariancie osiągnięcie złego stanu technicznego następuje dopiero ok. 50. roku użytkowania. Dodatkowo po dziesięciu i czternastu latach obserwuje się przekroczenie wartości bazowej właściwości użytkowych (równej 1,00), co jest bezpośrednim efektem przeprowadzonych modernizacji.

Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań zidentyfikowano 19 kategorii robót modernizacyjnych i w przypadku każdej z nich wyznaczono cząstkowe współczynniki modernizacji z wykorzystaniem normalizacji liniowej oraz transformacji do przedziału ⟨1; 1,30⟩, co umożliwiło ilościowe odwzorowanie względnego znaczenia analizowanych działań modernizacyjnych. Końcowy współczynnik modernizacji określono jako iloczyn współczynników cząstkowych, przyjmując model multiplikatywny, odzwierciedlający syntetyczny charakter oddziaływania przedsięwzięć modernizacyjnych realizowanych równocześnie.

Celem badań było opracowanie modelu umożliwiającego ilościowe uwzględnienie wpływu przedsięwzięć modernizacyjnych, realizowanych przez najemców lokali mieszkalnych w trakcie eksploatacji budynków, na zmiany właściwości użytkowych lokali mieszkalnych. Podstawę modelu stanowiła analiza częstości występowania poszczególnych kategorii robót modernizacyjnych w badanym zasobie mieszkaniowym. Przyjęto założenie, że częściej realizowane działania odzwierciedlają modernizacje mające istotne znaczenie w procesie kształtowania właściwości użytkowych lokali, opisujących poziom ich funkcjonalności i zdolności do spełniania wymagań użytkowych w danym momencie eksploatacji. W konsekwencji częstość występowania robót wykorzystano do wyznaczenia współczynników modernizacji opisujących potencjalny wpływ poszczególnych kategorii działań na przebieg zmian właściwości użytkowych w czasie. Takie podejście pozwala oprzeć model na rzeczywistych procesach modernizacyjnych zachodzących

replacing fixtures and improving the functionality of the units are of the greatest importance to users.

The proposed method enables a quantitative assessment of the effects of modernization and a comparison of various modernization options. It can serve as a tool to support decision-making regarding the planning of repairs and modernization of the housing stock, as well as a basis for further analyses related to the operation of residential units. A promising direction for further research is to expand the model to include an economic aspect by accounting for the costs of implementing specific modernization projects. An interesting avenue for developing the method could be to vary the upper limit of the partial modernization factor g_{max} depending on the type and scope of the work performed.

podczas użytkowania budynków oraz uwzględnić ich wpływ na przebieg procesu jego starzenia się i zmian stanu technicznego.

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że modernizacje prowadzą do wyraźnego zwiększenia wartości właściwości użytkowych lokali mieszkalnych, szczególnie w początkowym okresie eksploatacji. Wraz z upływem czasu ich wpływ ulega stopniowemu zmniejszeniu w wyniku procesów starzeniowych. Jednocześnie wykazano, że największe znaczenie dla użytkowników mają działania związane z wymianą wyposażenia oraz poprawą funkcjonalności lokali.

Zaproponowana metoda umożliwia ilościową ocenę efektów modernizacji oraz porównywanie różnych wariantów działań modernizacyjnych. Może ona stanowić narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji dotyczących planowania remontów i modernizacji zasobu mieszkaniowego, a także podstawę do dalszych analiz związanych z eksploatacją lokali mieszkalnych. Perspektywicznym kierunkiem dalszych badań jest rozszerzenie modelu o aspekt ekonomiczny przez uwzględnienie kosztów realizacji poszczególnych przedsięwzięć modernizacyjnych. Interesującym kierunkiem rozwoju metody może być zróżnicowanie wartości górnej granicy cząstkowego współczynnika modernizacji g_{max} w zależności od rodzaju i zakresu wykonywanych robót.

Received: 16.02.2026
Revised: 20.04.2025
Published: 19.08.2026

Artykuł wpłynął do redakcji: 16.02.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 20.04.2026 r.
Opublikowano: 19.08.2026 r.

Literatura

[1] Radziejowska A. The assessment of the social performance of residential buildings. Archives of Civil Engineering. 2021; https://doi.org/10.24425/ace.2021.138070

[2] Zima K, Malara J, Biel S. Analiza istotności i korelacji usterek w budynkach wielorodzinnych. Materiały Budowlane. 2022; https://doi.org/10.15199/33.2022.07.11

[3] Sztubecka M, Skiba M, Mrówczyńska M, Bazan-Krzywoszańska A. An Innovative Decision Support System to Improve the Energy Efficiency of Buildings in Urban Areas. Remote Sensing. 2020; https://doi.org/10.3390/rs12020259

[4] Drozd W, Kowalik M. The Fortifications of the "Kraków Fortress" as Examples of the Long-Term Process of Revitalization of Degraded Areas in the Context of Diversified Sources of Financing. Sustainability. 2025; https://doi.org/10.3390/su17146245

[5] Zhiming F et al. Experimental study on determinants of the evacuation performance in the super-high rise building. 2020; https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.04310

[6] Hamrol A. Zarządzanie i inżynieria jakości ze spojrzeniem w rzeczywistość 4.0. Warszawa: PWN; 2023.

[7] Orłowski Z. Wybrane aspekty właściwości użytkowych budynku w okresie jego eksploatacji. Przegląd Budowlany. 2011.

[8] Ma JH, Erdogmus E, Yang E. A user-centered building design approach using immersive virtual reality and discrete choice modeling. Building and Environment. 2025; https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113400

[9] Fedorczak-Cisak M, Kowalska A. Komfort użytkowania oraz klimat środowiska wewnętrznego budynków energooszczędnych. Materiały Budowlane. 2014.

[10] Lounis Z, Vanier DJ, Lacasse MA. A discrete stochastic model for performance prediction of roofing systems. In: Proceedings of the CIB World Building Congress „Construction and the Environment". Gävle, Sweden; 1998. pp. 305–313.

[11] Kesik T. Differential Durability and the Life Cycle of Buildings. In: ARCC/EAAE 2002 International Conference on Research. Montreal, PQ: McGill University; 2002. pp. 305–317

[12] Orłowski Z, Szklennik N. Zakres modernizacji budynku jako wynik analizy diagnostycznej obiektu. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. 2011 (3): 353–360.

[13] Leśniak A, Skrzypczak O. Ocena ryzyka w przedsięwzięciach modernizacyjnych obiektów szkolnictwa wyższego z wykorzystaniem logiki rozmytej. Przegląd Budowlany. 2025; https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.2442

[14] Wysokowski A. Zarządzanie cyklem życia mostów. Fundament trwałości nowoczesnej infrastruktury. https://builderpolska.pl/2026/01/30/zarzadzanie-cyklem-zycia-mostow/. Dostęp: 24.04.2026.

[15] Nowogońska B, Kurowska A. Management of the risk of building degradation. Engineering Failure Analysis. 2025; https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109801

[16] Zima K, Sup K. Planning the renovation policy of multi-family buildings built in large-panel technology with use of fuzzy logic. 2019; https://doi.org/10.1063/1.5114168

[17] PN-ISO 15686–1:2005. Budynki i budowle. Planowanie okresu użytkowania. Część 1: Zasady ogólne.

[18] Chen CJ, Juan YK, Hsu YH. Developing a systematic approach to evaluate and predict building service life. Journal of Civil Engineering and Management. 2017; https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1341956

[19] Plebankiewicz E, Karcińska P, Grącki J. Costs of implementing the assumptions of a long-term building renovation strategy. Materiały Budowlane. 2025. Volume 638. Issue 10. Pages 152–159; https://doi.org/10.15199/33.2025.10.17

[20] Nowogońska B. Diagnoza w procesie starzenia budynków mieszkalnych wykonanych w technologii tradycyjnej. Warszawa: Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk; 2017.

[21] Kucharska-Stasiak E, Źróbek S, Hopfer A, red. Leksykon rzeczoznawcy majątkowego. Warszawa: Polska Federacja Stowarzyszeń Rzeczoznawców Majątkowych; 1998.

[22] Arendarski J. Trwałość i niezawodność budynków mieszkalnych. Warszawa: Arkady; 1978.