

Instalacje fotowoltaiczne w budownictwie wielorodzinnym

Streszczenie. Artykuł opisuje wpływ instalacji fotowoltaicznych na bezpieczeństwo eksploatacji budynków wielorodzinnych. W oparciu o projekty rzeczywistych obiektów przeprowadzono analizę zwiększenia ryzyka strat odgromowych, zmiany obciążenia konstrukcji dachu i wzrostu zagrożenia pożarowego na skutek montażu systemu fotowoltaicznego. Przeprowadzone obliczenia wskazują na konieczność kompleksowego podejścia do projektowania instalacji fotowoltaicznych. Dodatkowo oszacowano opłacalność takiej inwestycji w przypadku budynków wielorodzinnych.

Abstract. The article describes the impact of photovoltaic installations on the operational safety of multi-family buildings. Based on the designs of real facilities, an analysis was carried out of the increase in the risk of lightning losses, changes in the load on the roof structure and the increase in fire risk resulting from the installation of a photovoltaic system. The calculations indicate the need for a comprehensive approach to the design of photovoltaic installations. Additionally, the profitability of such an investment in the case of multi-family buildings was estimated. (**Photovoltaic installations in multi-family buildings**)

Słowa kluczowe: instalacja fotowoltaiczna, budynki wielorodzinne, ochrona odgromowa, panele fotowoltaiczne,
Keywords: photovoltaic installation, multi-family buildings, lightning protection, solar panels.

Wstęp

W ostatnich latach można zaobserwować dynamiczne zmiany w sektorze energetycznym związane z tzw. „Europejskim Zielonym Ładem” [1]. Jednym z założeń ww. strategii jest obniżenie emisji gazów cieplarnianych poprzez zastępowanie elektrowni wykorzystujących paliwa kopalne odnawialnymi źródłami energii (OZE). W Polsce łączna moc elektrowni fotowoltaicznych w lipcu 2022 przekroczyła 10 GW, w czym dominujący udział mają instalacje o jednostkowej mocy nieprzekraczającej 50 kW [2]. Dotychczas instalacje fotowoltaiczne pojawiały się głównie na domach jednorodzinnych, jednakże zgodnie z Dyrektywą EPDB od roku 2028 wszystkie nowo wybudowane budynki będą musiały być wyposażone w takie instalacje [3]. Ponadto, zgodnie ze standardem WT 2021 [4], wskaźnik energii pierwotnej nieodnawialnej (EP) dla nowych i modernizowanych budynków wielorodzinnych nie może przekraczać $65 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{rok}$, co implikuje konieczność stosowania OZE. Powyższe przesłanki wskazują na to, że w najbliższym czasie będzie powstawało coraz więcej budynków wielorodzinnych wyposażonych w systemy fotowoltaiczne. Montaż paneli fotowoltaicznych na budynkach wielorodzinnych może stanowić wyzwanie dla projektantów, gdyż wymaga uwzględnienia różnych aspektów z dziedzin takich jak elektrotechnika, mechanika i bezpieczeństwo pożarowe. W niniejszym artykule opisano wpływ instalacji fotowoltaicznej na ryzyko strat odgromowych, obciążenia konstrukcji dachu i obciążalność ogniową w przypadku budynków wielorodzinnych. Dodatkowo wykonano analizę opłacalności takiej inwestycji. W celu uzyskania wiarygodnych wyników przeprowadzono obliczenia dla kilkunastu rzeczywistych obiektów zlokalizowanych w różnych regionach Polski.

Ryzyko strat odgromowych

Zgodnie z obowiązującą w Polsce normą PN-EN 63205-2 [5] ocenę ryzyka strat odgromowych przeprowadza się wykorzystując metodę analityczną bazującą na danych statystycznych dotyczących szkód wywołanych przez burze. Losowy charakter zjawisk piorunowych został uwzględniony poprzez zastosowanie elementów rachunku prawdopodobieństwa i teorii niezawodności. W Tabeli 1 zestawiono cztery typy strat odgromowych wraz z ich maksymalnymi tolerowanymi wartościami, przekroczenie których wiąże się z koniecznością zastosowania

dodatkowych środków ochrony np. ochrona odgromowa (LPS), ochrona przeciwprzepięciowa (SPD) lub ochrona przeciwpożarowa.

Tabela 1. Typy strat odgromowych i ich tolerowane wartości zgodnie z normą PN-EN 63205-2 [5]

| Typ strat | Opis | Wartość tolerowana |
|-----------|--------------------------------|-------------------------|
| L1 | utrata życia ludzkiego | 10^{-5} |
| L2 | utrata usługi publicznej | 10^{-3} |
| L3 | utrata dziedzictwa kulturowego | 10^{-3} |
| L4 | utrata wartości ekonomicznej | określana indywidualnie |

Algorytm szacowania ryzyka strat odgromowych został dokładnie przedstawiony w artykule [6], jednakże ze względu na jego złożoność w praktyce projektowej wykorzystuje się zazwyczaj specjalistyczne oprogramowanie np. DEHN Risk Tool będący częścią DEHNsupport Toolbox [7]. Analiza wykonana dla 13 budynków wielorodzinnych zlokalizowanych w Polsce północnej (gęstość wyładowań piorunowych $N_g = 1.8$) wykazała, że średni wzrost powierzchni zbierania budynku (A_d) związany z montażem modułów fotowoltaicznych na dachu obiektu wynosi 8.4%. Na potrzeby dalszych obliczeń przyjęto następujące założenia: budynki zlokalizowane są w środowisku miejskim (współczynnik środowiskowy $C_{ex} = 0.1$) i otoczone są obiektami o tej samej wysokości (współczynnik położenia $C_d = 0.5$). Pozostałe parametry dla konkretnych przypadków określono na podstawie danych z projektu budowlanego. Ryzyko strat odgromowych związanych z utratą życia ludzkiego ($R1$) po zainstalowaniu instalacji fotowoltaicznej wzrosło średnio o 4.9%, jednakże dla żadnego z budynków nie przekroczyło wartości tolerowanej. Analogiczne zachowanie odnotowano dla ryzyka utraty wartości ekonomicznej ($R4$). Przyczyn tego zjawiska należy upatrywać się w obecności LPS, który jest powszechnie instalowany na budynkach wielorodzinnych. Należy jednak pamiętać, że skuteczność działania systemów ochrony odgromowej uwarunkowana jest ich prawidłowym zaprojektowaniem i wykonaniem [8]. Montaż instalacji fotowoltaicznej na dachu obiektu wyposażonego w LPS implikuje konieczność jego przeprojektowania [9]. Wiąże się to najczęściej z koniecznością wymiany zwodów pionowych na wyższe i doboru odpowiednich odstępów separacyjnych [10].

Wpływ instalacji fotowoltaicznych na obciążenie dachu

Montaż instalacji fotowoltaicznej na dachu budynku wiąże się ze wzrostem obciążenia konstrukcji. Ze względów bezpieczeństwa projektant powinien sprawdzić, czy dany obiekt wytrzyma dodatkowe obciążenia związane z zainstalowanymi modułami PV i ich osprzętem. W tym celu wykonuje się zazwyczaj obliczenia statycznego obciążenia konstrukcji Q_s , które można zdefiniować jako ciężar zainstalowanych komponentów. Takie podejście nie uwzględnia jednak obciążeń dynamicznych związanych z oddziaływaniem wiatru i śniegu, dlatego należałoby posługiwać się maksymalnym rzeczywistym obciążeniem (Q_r). Parametr ten można oszacować za pomocą wzoru [11]:

$$(1) Q_r = Q_s + A \cdot (S + q_p(z)),$$

gdzie A oznacza całkowite pole powierzchni zainstalowanych modułów PV, S – obciążenie śniegiem, $q_p(z)$ – obciążenie wiatrem. Definicję obciążenia śniegiem można znaleźć w normie PN-EN 1991-1-3:2005 [12]:

$$(2) S = \mu \cdot C_e \cdot C_t \cdot S_k,$$

gdzie μ to współczynnik zależny od kształtu dachu, C_e – współczynnik ekspozycji, C_t – współczynnik termiczny. Parametr S_k jest wielkością charakterystyczną dla każdej z pięciu stref w Polsce (Tabela 2).

Tabela 2. Charakterystyczne wartości obciążenia śniegiem gruntu dla różnych stref w Polsce

| Strefa | S_k (kN/m ²) | Uwagi |
|--------|----------------------------|----------------|
| 1 | 0.007·h – 1.4 | $S_k \geq 0.7$ |
| 2 | 0.9 | - |
| 3 | 0.006·h – 0.6 | $S_k \geq 1.2$ |
| 4 | 1.6 | - |
| 5 | 0.93 · exp(0.00134 · h) | $S_k \geq 2.0$ |

UWAGA h – wysokość nad poziomem morza (m)

Zagadnienia związane z obciążeniem wiatrem opisuje norma PN-EN 1991-1-4:2008 [13], w której można znaleźć równanie:

$$(3) q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b,$$

gdzie $c_e(z)$ to współczynnik ekspozycji zależny od rzeźby terenu, a q_b to bazowe ciśnienie prędkości wiatru będące wyróżnikiem każdej z trzech stref wiatrowych występujących w Polsce (Tabela 3)

Tabela 3. Wartości bazowe ciśnienia wiatru w Polsce

| Strefa | q_b (kN/m ²) | |
|--------|----------------------------|---|
| | $h \leq 300$ m | $h > 300$ m |
| 1 | 0.30 | $0.30 \cdot [1 + 0.0006 \cdot (h - 300)]^2$ |
| 2 | 0.42 | 0.42 |
| 3 | 0.30 | $0.30 \cdot [1 + 0.0006 \cdot (h - 300)]^2 \cdot [(20000 - h)/(20000 + h)]$ |

UWAGA h – wysokość nad poziomem morza (m)

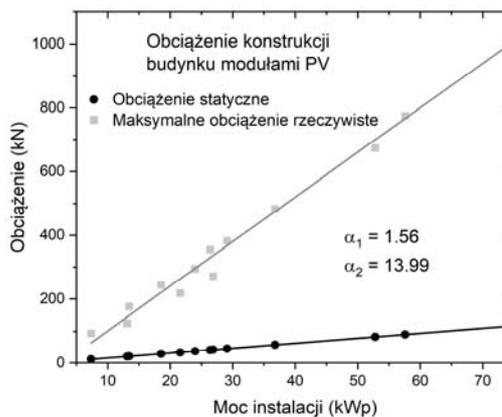
Wartości parametrów S_k i $q_b(z)$ określono na podstawie lokalizacji analizowanych przypadków. Zmienną $c_e(z)$ oszacowano korzystając z zależności dla IV kategorii terenu (obszar miejski):

$$(4) c_e(z) = 1.5(z/10)^{0.29},$$

gdzie z oznacza wysokość konstrukcji wsporczej modułów fotowoltaicznych liczoną od gruntu. Na potrzeby przeprowadzonej analizy przyjęto następujące wartości pozostałych parametrów: $C_e = 1$ - normalna ekspozycja bez nadmiernego transportu śniegu przez wiatr; $C_t = 1$ – typowa wartość dla dachów budynków mieszkalnych; $\mu = 0.8$ – współczynnik zależny od kąta nachylenia konstrukcji.

Rysunek 1 przedstawia zależność statycznego i maksymalnego obciążenia w zależności od mocy instalacji fotowoltaicznej (P). Maksymalne rzeczywiste obciążenie opisywane jest funkcją wielu zmiennych, dlatego obliczone wartości odstają od typowej liniowej zależności obserwowanej w przypadku obciążenia statycznego. Ponadto wartości funkcji $Q_r(P)$ rosną około 9 razy szybciej

niż w przypadku zależności $Q_s(P)$. Moc instalacji fotowoltaicznej jest zazwyczaj skorelowana z dostępną powierzchnią dachu i zapotrzebowaniem energetycznym obiektu. Oznacza to, że stosowanie obciążenia statycznego zamiast rzeczywistego w przypadku typowych budynków jednorodzinnych wiąże się z niewielkim niedoszacowaniem, jednakże dla budynków wielorodzinnych błąd w obliczeniach może mieć istotny wpływ na bezpieczeństwo.



Rys. 1. Porównanie obciążenia statycznego i rzeczywistego dla instalacji fotowoltaicznych o różnej mocy znamionowej

Wzrost zagrożenia pożarowego

Norma PN-B-02852:2001 [14] wprowadza pojęcie gęstości obciążenia ogniowego, którą można obliczyć z wzoru:

$$(5) Q_d = \sum [Q_{ci} \cdot G_i/F],$$

Gdzie G_i to masa poszczególnych materiałów, Q_{ci} to ich ciepło spalania, a F oznacza powierzchnię strefy pożarowej. Parametr ten pozwala na określenie względnego czasu trwania pożaru, czyli czasu potrzebnego na spalenie materiałów palnych w danej strefie pożarowej. Badania eksperymentalne wykazały, iż ciepło spalania modułów fotowoltaicznych może wynosić 14.6 MJ/kg [15]. Przyjmując, że masa typowego modułu fotowoltaicznego wynosi 26 kg obliczono wzrost gęstości obciążenia ogniowego dla wybranych budynków wielorodzinnych. Średni wzrost wartości tego parametru oszacowano na $\Delta Q_d \approx 340$ MJ/m², co przy założeniu braku innych materiałów palnych na dachu budynku przekłada się na względny czas trwania pożaru wynoszący około 20 minut. Budynki wielorodzinne średniowysokie (4 do 9 kondygnacji) zgodnie z obowiązującymi przepisami [16] powinny być wykonane w klasie odporności pożarowej „B”, dla której nośność ogniową dachu (zdolność wytrzymania oddziaływania ognia przez określony czas) określono na $R = 30$ min. Montaż instalacji fotowoltaicznej na dachu budynku wielorodzinnego nie powinien spowodować przekroczenia dopuszczalnej nośności ogniowej w przypadku pożaru, jednakże w trakcie projektowania należy uwzględnić, czy nie występują inne czynniki mogące spowodować taką sytuację.

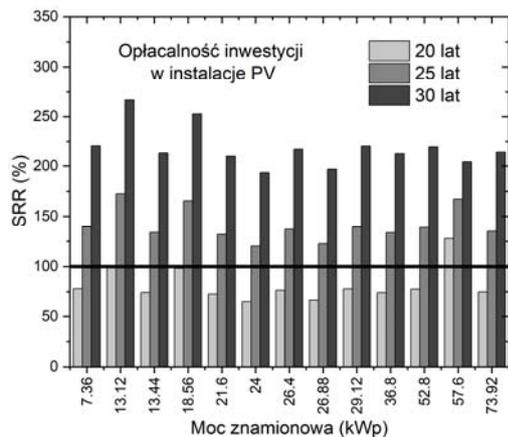
Oplacalność inwestycji w instalacje fotowoltaiczne

Uzupełnienie opisanych powyżej eksperymentów stanowi analiza opłacalności inwestycji w instalacje fotowoltaiczne w przypadku budynków wielorodzinnych. W tym celu wykorzystano oprogramowanie BlueSol [17], które służy do kompleksowego projektowania systemów solarnych. Narzędzie to wspiera projektowanie zarówno od strony technicznej, optymalizacyjnej jak i ekonomicznej pozwalając na wierne odwzorowanie danej instalacji w oparciu o zintegrowany system CAD, wizualizację 3D oraz rzeczywiste dane dotyczące promieniowania słonecznego.

Na potrzeby przeprowadzonych obliczeń przyjęto, że 50% kosztów inwestycji zostanie pokrytych dofinansowaniem z programu „Mój Prąd”, rozliczenie odbywa się na zasadzie opomiarowania netto, zapotrzebowanie własne na energię elektryczną wzrasta o 2 % rocznie, a średnia wartość inflacji w rozpatrywanym okresie wynosi 10%. Ponadto roczny koszt utrzymania systemu oszacowano na 1% wartości instalacji fotowoltaicznej. Średni czas zwrotu kapitału własnego przy powyższych założeniach wynosi 17.2 lat. Rysunek 4 przedstawia stopę zwrotu inwestycji (SRR) w system fotowoltaiczny po 20, 25 i 30 latach eksploatacji dla instalacji o różnych mocach znamionowych. Parametr SRR można zdefiniować w następujący sposób [18]:

$$(6) SRR = (K_n / I) \cdot 100\%$$

gdzie K_n to zysk netto, a I to nakład inwestycyjny.



Rys.4. Stopa zwrotu inwestycji w instalację PV w zależności od jej mocy znamionowej

Analizując wykres z Rys. 4 nie stwierdzono występowania korelacji pomiędzy mocą znamionową instalacji, a stopą zwrotu inwestycji. Wynika to najprawdopodobniej ze złożoności funkcji opisującej przepływy kapitałowe, na podstawie której wyliczany jest zysk netto. Na rentowność inwestycji duży wpływ mają takie czynniki jak lokalizacja budynku i stosunek zapotrzebowania na energię elektryczną do ilości wyprodukowanej energii przez instalację fotowoltaiczną. Czerwoną linią oznaczono wartość $SRR = 100\%$, która oznacza, że przychód z inwestycji jest wystarczający, aby pokryć koszt wykonania nowej instalacji (przy założeniu niezmienności jej ceny). Na podstawie danych z Rys. 20 można stwierdzić, iż po 20 latach jedynie w 1 przypadku uzyskano wyższą stopę zwrotu, a w dwóch kolejnych zbliżono się do wspomnianego progu. Przeprowadzony eksperyment wykazał, że ustaloną wartością graniczną dla każdej z rozpatrywanych instalacji uda się przekroczyć po 25 latach eksploatacji. Rozpatrując opłacalność inwestycji w instalacje fotowoltaiczną warto wziąć pod uwagę, że jej średni czas życia szacowany jest na 20 – 25 lat [19].

Podsumowanie i wnioski

Dotychczas instalacje fotowoltaiczne występowały głównie na budynkach jednorodzinnych, jednakże dyrektywa EPDB obowiązuje do ich montażu na obiektach wielomieszkańkowych. Wiąże się to z powstaniem n Projektowanie instalacji fotowoltaicznych stanowi wyzwanie ze względu na wieloaspektowy charakter tego zagadnienia, dlatego należy powierzać je specjalistom posiadającym odpowiednie uprawnienia i doświadczenie zawodowe. Poprawnie wykonany projekt takiej instalacji powinien uwzględniać jej wpływ na mechaniczne obciążenie i nośność ogniową konstrukcji dachu oraz oddziaływanie na

inne systemy np. LPS. Ponadto należy oszacować rentowność inwestycji w kontekście spodziewanego czasu życia danej instalacji fotowoltaicznej.

Podziękowania dla firmy ERKON Projekt Sp. z o.o. za udostępnienie danych niezbędnych do analiz opisanych w niniejszym artykule.

Autorzy: dr inż. Leszek Litzbarski, leszek.litzbarski@pg.edu.pl; mgr inż. Konrad Seklecki, konrad.seklecki@pg.edu.pl; mgr inż. Kuba Wójcik, s176393@student.pg.edu.pl; Zuzanna Cieślukowska, s194322@student.pg.edu.pl; dr inż. Mirosław Włas, miroslaw.wlas@pg.edu.pl Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Jacek Grochowski, jacek.grochowski@student.put.poznan.pl Politechnika Poznańska, Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

LITERATURA

- [1] M. Sobolewski and others, "Europejski Zielony Ład--w stronę neutralności klimatycznej," *Infos zagadnienia społeczno-gospodarcze*, no. 9, pp. 1–4, 2020.
- [2] J. Popczyk, "Oddolna budowa energetycznej odporności elektroprosumenckiej JST w miejsce bezpieczeństwa energetycznego w schodzącej rządowej polityce energetycznej," *Biul. PPTe2050 nr*, vol. 1, p. 5, 2022.
- [3] P. Krysiak, "Najważniejsze zmiany w dyrektywach EPBD oraz EED wprowadzone dyrektywą 2018/844/EU," *Rynek Instal.*, 2018.
- [4] K. Koczergo and O. Niemyjski, "Wybrane aspekty poprawy efektywności energetycznej dostawy ciepła do budynków według standardów WT2021," *Instal*, 2020.
- [5] *PN-EN 62305-2:2012 Ochrona odgromowa -- Część 2: Zarządzanie ryzykiem*. 2012.
- [6] L. Litzbarski, M. Olesz, K. Seklecki, and M. Nowak, "Ryzyko strat odgromowych a systemy fotowoltaiczne," *Przegląd Elektrotechniczny*, pp. 293–295, 2023.
- [7] DEHN, *Poradnik Ochrony odgromowej*. Neumarkt, 2019.
- [8] Z. Flisowski, "Ochrona odgromowa obiektów budowlanych i ich wyposażenia," *Telekomun. i Tech. Inf.*, 2013.
- [9] H. Boryń, "Ochrona odgromowa fotowoltaicznych źródeł energii elektrycznej," *Zesz. Nauk. Wydz. Elektrotechniki i Autom. Politech. Gdańskiej*, pp. 21–26, 2010.
- [10] D. Głuchy, D. Kurz, and G. Trzmiel, "Instalacja odgromowa i ograniczniki przepięć w instalacjach fotowoltaicznych," *Pozn. Univ. Technol. Acad. Journals. Electr. Eng.*, 2015.
- [11] J. G. Konrad SEKLECKI, Leszek S. LITZBARSKI, Marek ADAMOWICZ, "PV installations and the safety of residential buildings," *Unpublished*.
- [12] *PN-EN 1991-1-3:2005 - Eurokod 1 -- Oddziaływania na konstrukcje -- Część 1-3: Oddziaływania ogólne -- Obciążenie śniegiem*. 2005.
- [13] *PN-EN 1991-1-4:2008 - Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje -- Część 1-4: Oddziaływania ogólne -- Oddziaływania wiatru*.
- [14] *PN-B-02852:2001 -Ochrona przeciwpożarowa budynków -- Obliczanie gęstości obciążenia ogniowego oraz wyznaczenie względnego czasu trwania pożaru*. 2001.
- [15] B. Liao, X. Ju, D. Lai, and L. Yang, "Experimental study of combustion characteristics of PET laminated photovoltaic panels by fire calorimetry," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 253, p. 112242, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112242>.
- [16] *Dz.U.2022.0.1225 t.j. - Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie*.
- [17] K. Kut Paweł and Nowak, "Design of photovoltaic systems using computer software," *J. Ecol. Eng.*, vol. 20, no. 10, pp. 72–78, 2019.
- [18] E. Garabitos Lara, "Techno-economic model of nonincentivized self consumption with residential PV systems in the context of Dominican Republic: A case study," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 68, pp. 490–500, 2022.
- [19] A. Ndiaye, A. Charki, A. Kobi, C. M. F. Kébé, P. A. Ndiaye, and V. Sambou, "Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review," *Sol. Energy*, vol. 96, pp. 140–151, 2013.