

dr inż. Sławomir Dudziak¹⁾

ORCID: 0000-0001-6287-2005

dr inż. Zofia Kozyra^{1)*}

ORCID: 0000-0001-7506-420X

prof. dr hab. inż. Artur Zbiciak¹⁾

ORCID: 0000-0001-8882-2938

dr inż. Marcin Bartman²⁾

ORCID: 0009-0005-0991-3396

Selected structural and material challenges of pumped-storage hydro power plants in Poland and worldwide

Wybrane wyzwania konstrukcyjne i materiałowe dotyczące szczytowo-pompowych elektrowni wodnych w Polsce i na świecie

DOI: 10.15199/33.2025.12.19

Abstract: This paper presents selected design and material challenges associated with the construction and operation of pumped-storage power plants in Poland and worldwide. The plant's operating environment is not fully controllable due to water contamination in the reservoirs and its aggressiveness, particularly towards the concrete in the supporting structure. Another challenge is vibration, which is caused by operating mechanical equipment and the dynamic action of water during pumping and discharge. Despite numerous technical challenges, pumped-storage power plants remain a key component of the power system, supporting grid stability and the development of renewable energy sources.

Keywords: pumped-storage power plant (PSPP); concrete; vibrations; supporting structure.

Streszczenie: W artykule przedstawiono wybrane wyzwania konstrukcyjne i materiałowe dotyczące budowy i eksploatacji elektrowni szczytowo-pompowych w Polsce i na świecie. Środowisko pracy elektrowni nie jest w pełni możliwe do kontroli ze względu na zanieczyszczenia wody w zbiornikach i jej stopnia agresywności zwłaszcza w przypadku betonu w konstrukcji wsporczej. Kolejnym wyzwaniem są drgania, których źródłem są pracujące urządzenia mechaniczne oraz dynamiczne działanie wody w trybie pompowania, jak i zrzutu wody. Pomimo wielu wyzwań technicznych, elektrownie szczytowo-pompowe pozostają kluczowym elementem systemu energetycznego, wspierając stabilność sieci i rozwój odnawialnych źródeł energii.

Słowa kluczowe: elektrownia szczytowo-pompowa (ESP); beton; drgania; konstrukcja wsporcza.

Many pumped-storage power plants (PSPs) have been built around the world, the largest of which, with a capacity of 3.6 GW, is located in Fengning, China. The largest power plant of this type in Europe is Grand'Maison in France, with a capacity of 1.8 GW. The total capacity of all pumped-storage power plants worldwide is over 180 GW. Six such power plants with a total capacity of 1.8 GW operate in Poland: Żarnowiec; Porąbka-Żar; Solina-Myczkowce; Żydowo; Niedzica; and Dychów. The largest of these is Żarnowiec, with a capacity of 716 MW and the capacity to store up to 3.6 GWh of energy (Tab. 1, Tab. 2).

A feasibility study has also been completed, confirming the technical feasibility and economic justification for building a PSP in Młoty, Lower Silesia. A general diagram of the planned power plant in Młoty is shown in Figure.

Faced with the challenges of integrating renewable energy sources and the need to ensure energy security in individual countries, the use, operation, and modernization of existing pumped-storage power plants (PSPs), as well as the construction of new ones, are becoming increasingly important. In addition to their power and the ability to store significant en-

dotychczas zbudowano na świecie wiele elektrowni szczytowo-pompowych (ESP), z których największa o mocy 3,6 GW znajduje się w Fengning w Chinach (tabela 1). Największą tego typu elektrownią w Europie jest Grand' Maison we Francji o mocy 1,8 GW. Łączna moc wszystkich elektrowni szczytowo-pompowych na świecie wynosi ponad 180 GW. W Polsce działa sześć takich elektrowni o łącznej mocy 1,8 GW i są to: Żarnowiec; Porąbka-Żar; Solina-Myczkowce; Żydowo; Niedzica i Dychów. Największą z nich jest Żarnowiec o mocy 716 MW i możliwości magazynowania do 3,6 GWh energii (tabela 2). Zakończyło się również przygotowanie studium wykonalności, które potwierdziło możliwości techniczne i ekonomiczne uzasadnienie budowy ESP w Młotach w województwie dolnośląskim. Ogólny schemat planowanej elektrowni w Młotach pokazano na rysunku.

W obliczu wyzwań związanych z integracją odnawialnych źródeł energii oraz koniecznością zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego w poszczególnych krajach wykorzystywanie, eksploatacja oraz modernizacja istniejących elektrowni szczytowo-pompowych (ESP), a także budowa nowych nabierają coraz większego znaczenia. Elektrownie tego typu oprócz mocy i możliwości magazynowania znacznych nadwyżek energii wykazują zdolność do szybkiego reagowania

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

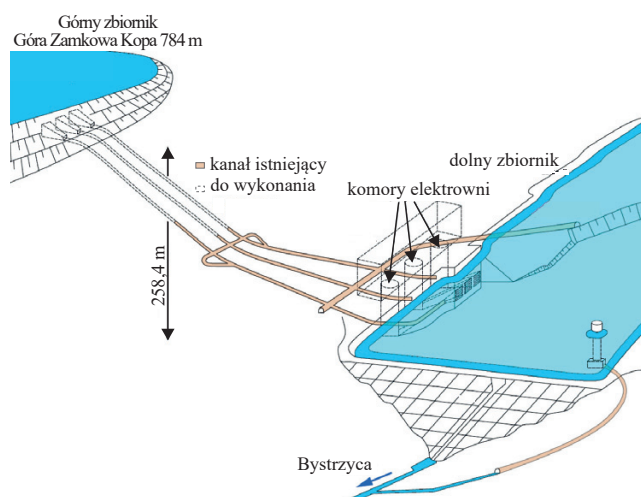
²⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny

^{*)} Address for correspondence: zofia.kozyra@pw.edu.pl

Table 1. List of selected pumped-storage power plants outside Poland

Tabela 1. Zestawienie wybranych elektrowni szczytowo-pompowych poza Polską

Name/location of the pumped storage power plant/ Nazwa/lokalizacja elektrowni szczytowo pompowej	Power in MW/ Moc [MW]	Year of construction/modernization/ Rok wybudowania/modernizacji
Fengning w Chinach	3600	2021
Kannagawa w Japonii	2820	2013-2032
Bath County w USA	2772	1985
Guangdong w Chinach	2400	1994-2000
Grand'Maison we Francji	1800	1987
Nant de Drance w Szwajcarii	900	2022

**Diagram of the planned pumped-storage power plant (PSPP) in Młoty [1]**

Schemat planowanej elektrowni szczytowo-pompowej (ESP) w Młotach [1]

ergy surpluses, these plants demonstrate the ability to respond quickly to changes in energy demand, making them indispensable in ensuring the continuity of electricity supply. PSPs can respond to energy demand within a short time (up to several minutes). For example, the Porąbka-Żar PSP requires only 180 seconds to start its turbines, and the shutdown time is 142 seconds [2], enabling smooth regulation of power grid parameters.

Pumped-Storage Power Plant Solutions

The operating principle of pumped-storage power plants requires access to two reservoirs located at different levels to convert the water's gravitational potential energy into kinetic energy, and then into electricity. The main element of such a power plant is the hydroelectric unit, which requires a stable and massive support structure, usually constructed as a concrete or reinforced concrete structure. Turbine sets can be equipped with a Francis, Kaplan, Pelton, Bulb, or Teriaz spiral, the operating diagram of which is discussed in [3]. The most commonly used spiral is the Francis spiral (photo 1, photo 2).

Tabela 2. Zestawienie elektrowni szczytowo-pompowych w Polsce

Table 2. List of pumped-storage power plants in Poland

Name/location of the pumped storage power plant/ Nazwa/lokalizacja elektrowni szczytowo pompowej	Power in MW/ Moc [MW]	Year of construction/modernization/ Rok wybudowania/modernizacji
Żarnowiec	716	1983/2009
Porąbka-Żar	550	1979
Żydowo	165	1971
Solina-Myczkowce	200	1968
Dychów	90	1936/2011
Czorsztyn Niedzica	92	1997

na zmiany zapotrzebowania na energię, co czyni je niezastąpionymi w zapewnianiu ciągłości dostaw energii elektrycznej. ESP potrafią w krótkim czasie (do kilkunastu minut) reagować na zapotrzebowanie na energię. Przykładowo ESP Porąbka-Żar do rozruchu swoich turbin potrzebuje tylko 180 s, a czas wyłączenia wynosi 142 sekundy [2], co umożliwia utrzymanie płynnej regulacji parametrów sieci energetycznych.

Rozwiązania w elektrowniach szczytowo-pompowych

Zasada działania elektrowni szczytowo-pompowych wymaga dostępu do dwóch zbiorników wodnych zlokalizowanych na różnych poziomach, aby można było zamieniać energię potencjalną grawitacji wody na energię kinetyczną, a następnie na energię elektryczną. Głównym elementem takiej elektrowni jest hydrozespoł wymagający stabilnej i masywnej konstrukcji wsporczej, realizowanej zwykle jako konstrukcja betonowa lub żelbetowa. Turbozespoły mogą być wyposażone w spiralę Francisa, Kaplana, Peltona, Bulb, Teriaza, której schemat działania omówiono w pracy [3]. Najczęściej stosowana jest spirala Francisa (fotografie 1 i 2).

Spirale jako element hydrozespołu posadowione są na betonowej konstrukcji wsporczej na sztywno lub za pomocą elastycznej przekładki. Podczas montażu spirali w konstrukcji betonowej lub żelbetowej może być ona osadzana swobodnie albo poddana ciśnieniu odpowiadającemu późniejszym warunkom pracy, zwykle w przypadku elektrowni o większej mocy. Podczas realizacji tego typu prac doszło do wypadku, co opisano

**Photo 1. Francis spiral [4]**

Fot. 1. Spirala Francisa [4]

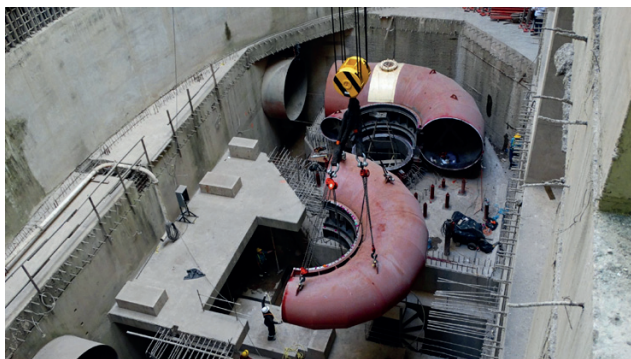


Photo 2. Francis spiral during assembly in the reinforced concrete structure [4]

Fot. 2. Spirala Francis w trakcie montażu w konstrukcji żelbetowej [4]

As part of a hydroelectric power plant, the spirals are mounted rigidly on a concrete support structure or using a flexible spacer. During installation, the spiral can be freely mounted in a concrete or reinforced concrete structure or pressurized to meet the subsequent operating conditions, typically for larger power plants. An accident occurred during this type of work, as described in [5]. A Chinese hydroelectric power plant with a 700 MW turbine was constructed with internal pressure introduced into the spiral. The failure occurred during construction, after the first layer of the concrete support structure had been completed, when uncontrolled deformation of the spiral support structure occurred, threatening the plant's safe operation.

Challenges of Pumped-Storage Power Plants

Significant challenges arise at all stages of the pumped-storage power plant lifecycle, requiring innovative and unconventional engineering solutions. Location selection and the construction of the infrastructure necessary for this type of construction are crucial during the planning and design stages. Access to significant water resources is required, i.e., two reservoirs located at two different levels to ensure adequate water potential energy. Logistics related to the need to transport both large quantities of earth and construction materials, as well as large steel components of the power plant equipment, such as the spiral, pose a significant challenge during the implementation stage. The maintenance stage involves responding to various types of faults, with difficult or almost impossible access to the structure, which should be subject to periodic inspections. After the designed period of failure-free operation of an ESP power plant, usually at least 30 years, there comes a period when repairs and modernizations are necessary, which are also not easy, especially when it is not possible to determine the actual condition of the supporting structure and/or the condition of the spiral.

The presence of water in the area of concrete support structures is unavoidable. At the same time, the impact on the quality and aggressiveness of water towards concrete during power plant operation is negligible. Consequently, concrete support structures should be considered vulnerable to both chemical and biological corrosion. Even when the water has a more con-

w [5]. Chińska elektrownia wodna z turbiną o mocy 700 MW realizowana była z wprowadzonym ciśnieniem wewnętrznym w spirali. Awaria nastąpiła w czasie budowy, po wykonaniu pierwszej warstwy betonowej konstrukcji wsporczej, gdy pojawiły się niekontrolowane deformacje konstrukcji wsporczej spirali, co zagrażało bezpiecznej pracy elektrowni.

Wyzwania dotyczące obiektów elektrowni szczytowo-pompowych

Na wszystkich etapach cyklu życia elektrowni szczytowo-pompowych pojawiają się istotne wyzwania, które wymagają zastosowania innowacyjnych i nieszablonych rozwiązań inżynierskich. Na etapie planowania i projektowania duże znaczenie ma wybór lokalizacji, a także budowa infrastruktury koniecznej do realizacji tego typu budowli. Wymagany jest dostęp do znacznych zasobów wody, tzn. do dwóch zbiorników wodnych usytuowanych na dwóch różnych poziomach, aby zapewnić odpowiednią energię potencjalną wody. Dużym wyzwaniem na etapie realizacji są zagadnienia logistyczne związane z koniecznością transportu zarówno dużych ilości mas ziemnych, jak i materiałów budowlanych, a także stalowych elementów wyposażenia elektrowni o dużych gabarytach, np. spirali. Etap utrzymania wiąże się z koniecznością reakcji na różnego rodzaju usterki, przy utrudnionym lub prawie niemożliwym dostępie do konstrukcji, która powinna podlegać przeglądowi okresowemu. Po upływie projektowanego okresu bezawaryjnej pracy elektrowni typu ESP, zwykle co najmniej 30 lat, następuje okres, gdy niezbędne są remonty i modernizacje, które także nie są proste, zwłaszcza gdy nie jest możliwe ustalenie faktycznego stanu konstrukcji wsporczej i/lub stanu spirali.

Obecność wody w obszarze występowania betonowych konstrukcji wsporczych jest nieunikniona. Jednocześnie wpływ na jakość i stopień agresywności wody wobec betonu w trakcie eksploatacji elektrowni jest znikomy. W konsekwencji betonowe konstrukcje wsporcze należy uznać za narażone zarówno na korozję chemiczną, jak i biologiczną. Nawet gdy woda ma bardziej kontrolowany skład, jak np. w zbiornikach wody pitnej, wykonuje się zabezpieczenia w celu zminimalizowania możliwości występowania korozji. W [6] opisano sposoby zabezpieczania betonu zbiorników na wodę pitną, wykazując dobrą skuteczność sztywnych powłok antykorozyjnych wykonanych z materiałów mineralnych o potwierdzonej odporności na korozję ługującą. Badania dotyczące wykorzystania różnych kruszyw w betonie w kontekście agresywnego środowiska opisano w pracy [7].

Ze względu na agresywne oddziaływanie środowiska wodnego, którego zanieczyszczeń nie da się w pełni kontrolować, zastosowanie samego betonu hydrotechnicznego okazuje się zazwyczaj niewystarczające. Tam gdzie to możliwe, można rozważyć zabezpieczenie powierzchni betonu przez zastosowanie nowoczesnych powłok antykorozyjnych. W pracy [8] opisano sposoby zabezpieczeń powierzchniowych betonu narażonego na agresywne środowisko.

Rozwiązaniem jest też zastosowanie betonu o klasie wyższej, niż wynikałoby to z wymaganej nośności konstrukcji wsporczej, tak aby zwiększyć jego trwałość i ograniczyć pojawianie

trolled composition, such as in drinking water reservoirs, protection measures are implemented to minimize the possibility of corrosion. [6] describes methods for protecting the concrete of drinking water reservoirs, demonstrating the good effectiveness of rigid anticorrosion coatings made of mineral materials with proven resistance to leaching corrosion. Research on the use of various aggregates in concrete in the context of aggressive environments is described in [7]. Due to the aggressive impact of the aquatic environment, whose pollution cannot be fully controlled, the use of hydraulic concrete alone is usually insufficient. Where possible, protection of the concrete surface by the use of modern anticorrosion coatings can be considered. [8] describes methods for surface protection of concrete exposed to aggressive environments. Another solution is to use concrete of a higher class than the required load-bearing capacity of the supporting structure, to increase its durability and reduce the appearance of micro-cracks, which could exacerbate corrosion processes in the concrete and reinforcing steel. During the design phase, with proper understanding of the composition of the water that will impact it, concrete mixtures can be designed with appropriately selected aggregates.

Dynamic effects on the supporting structure. In addition to significant static effects resulting from the weight of the equipment and the water, the concrete supporting structure in a pumped-storage power plant is subjected to dynamic effects. Vibrations originate from the operation of the rotor equipment, but also from the movement of the water, especially during changes in the plant's operating mode, which occurs several times a day. Resonant vibrations or impact forces can adversely affect the supporting structure, significantly shortening its durability and, in extreme cases, threatening the safety of the entire power plant.

The main causes of failures in pumped-storage power plants are mechanical and fatigue damage to the turbine's moving components, which leads to significant dynamic overloads transferred to the concrete support structures. [9] describes the causes of the accident at the „Chaira” pumped-storage power plant in Bulgaria. Fatigue damage to the blade stays and excessive dynamic overloads resulted in damage to the concrete layer of the support structure. Therefore, the dynamic interactions and vibrations of the structure are subject to various analyses, the effects of which are intended to reduce vibrations of the entire system, including the concrete support structure. The vibrations of the structure can be described by the following differential equation:

$$M \ddot{q}(t) + C \dot{q}(t) + Kq(t) = Q(t) \quad (1)$$

where:

$q(t)$ – displacement vector;

M – mass matrix;

C – damping matrix;

K – stiffness matrix;

$Q(t)$ – excitation vector.

The dots indicate time-dependent operations.

An effective way to reduce vibration is to limit the $Q(t)$ excitation, e.g., by changing the parameters of the turbine's moving elements.

Vibration reduction can also be achieved by modifying the parameters of the vibrating system, which influence its mass

się mikrozarysowań, które mogłyby wzmacniać procesy korozyjne w betonie i stali zbrojeniowej. Na etapie projektowania konstrukcji, przy właściwym rozpoznaniu składu wody, która ma oddziaływać na nią, można projektować mieszanki betonowe z odpowiednio dobranych kruszyw.

Oddziaływania dynamiczne na konstrukcję wsporczą. Betonowa konstrukcja wsporcza w elektrowni szczytowo-pompowej, oprócz znacznych oddziaływań statycznych wynikających z ciężaru urządzeń i wody, poddawana jest działaniom dynamicznym. Drgania pochodzą od pracy urządzeń wirnikowych, ale także od ruchu wody, zwłaszcza w czasie zmiany trybu pracy elektrowni, która następuje wielokrotnie w ciągu doby. Rezonansowe drgania lub wymuszenia uderzeniowe mogą niekorzystnie oddziaływać na konstrukcję wsporczą, istotnie skracać jej trwałość, a w skrajnych przypadkach, zagrażając bezpieczeństwu całej elektrowni.

Głównymi przyczynami awarii w elektrowniach szczytowo-pompowych są uszkodzenia mechaniczne i zmęczenie elementów ruchomych turbin, prowadzące do powstawania znacznych przeciążeń dynamicznych przenoszonych na betonowe konstrukcje wsporcze. W [9] opisano przyczyny wypadku w elektrowni szczytowo-pompowej „Chaira” w Bułgarii. W wyniku uszkodzeń zmęczeniowych odciągów łopatkowych oraz nadmiernych przeciążeń dynamicznych odnotowano uszkodzenia warstwy betonu w konstrukcji wsporczej.

W związku z tym oddziaływania dynamiczne i drgania konstrukcji podlegają różnym analizom, których efekty mają doprowadzić do redukcji drgań całego układu wraz z betonową konstrukcją wsporczą. Drgania konstrukcji można opisać następującym równaniem różniczkowym:

$$M \ddot{q}(t) + C \dot{q}(t) + Kq(t) = Q(t) \quad (1)$$

gdzie:

$q(t)$ – wektor przemieszczenia;

M – macierz mas;

C – macierz tłumienia;

K – macierz sztywności;

$Q(t)$ – wektor wymuszenia.

Kropkami oznaczono operacje różniczkowania względem czasu.

Skutecznym działaniem zmniejszania drgań jest ograniczanie wymuszenia $Q(t)$, np. przez zmianę parametrów ruchomych elementów turbiny.

Redukcję drgań można osiągnąć również przez modyfikację parametrów układu drgającego, wpływających na jego masę (M), tłumienie (C) i sztywność (K). Wprowadzane do układu różnego rodzaju tłumiki drgań mogą skutecznie minimalizować drgania w określonych pasmach częstotliwości.

W pracy [10] analizowano wpływy obciążeń dynamicznych indukowanych przez różne źródła drgań na konstrukcję wsporczą. Do redukcji drgań pochodzących od oddziaływań dynamicznych przejściowych w układzie spirali zastosowano tłumiki magneto-reologiczne. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że parametry systemu i związane z nimi wzbudzenia wymuszeń ulegają gwałtownym fluktuacjom podczas procesu obciążania, powodując zauważalne oscylacje amplitud drgań wirnika i turbiny.

(M), damping (C), and stiffness (K). Various types of vibration dampers introduced into the system can effectively minimize vibrations in specific frequency bands.

Paper [10] analyzed the effects of dynamic loads induced by various vibration sources on the supporting structure. Magnetorheological dampers were used to reduce vibrations resulting from transient dynamic interactions in the spiral system. Based on the obtained results, it was found that the system parameters and the associated excitations fluctuate rapidly during the loading process, causing noticeable oscillations in the rotor and turbine vibration amplitudes. An attempt to reduce vibrations by using a mass damper was discussed in paper [11]. Reductions of high-frequency resonance vibrations in the superstructure of a pumped-storage power plant caused by the operation of a hydroelectric set were described there.

Although mass dampers have been demonstrated to be effective in controlling structural vibrations, their use in ESPs is rare. This work proposes a tuned mass damper (TMD) control method based on frequency-varying vibrations and various TMD control modes, and also designs a set of high-frequency TMD devices. The presented results of a series of vibration reduction tests and numerical analyses demonstrate that the new TMD device can control higher-order vibration modes of the structure, and the damping frequency band is extended, demonstrating good control effectiveness of the mass damper. Another approach that can reduce vibrations is to change the stiffness of the structure by using elastic spacers, known as vibration isolating mats. The effectiveness of such mats is evident in the mid- and higher-frequency range, i.e., > 10 Hz. Key characteristics of elastomeric spacers include increased stiffness at high strain rates, internal friction and energy dissipation, mechanical impedance mismatch, and resonance tuning below the excitation band. As the excitation frequency increases, the elastomer's behavior becomes increasingly „stiff.“ This means that at rapid deformation cycles, the spacer acts as a natural low-pass filter. In practice, above several tens of hertz, vibration transmission decreases very rapidly, so all components of the hydroelectric power unit's operation can be effectively damped. An elastomer is a viscous material, in which some of the vibration energy is absorbed within the material itself and dissipated as heat through the so-called hysteresis effect. The rubber's loss coefficient in the range of several hundred to several thousand hertz reaches values that significantly increase damping, especially where the vibrations are short-period. The mechanical impedance of the elastomer is also significantly higher at high frequencies than at low frequencies. As a result, most of the short-period vibration energy is reflected or lost at the substrate-slip interface, with only a small portion penetrating into the supporting structure. The key step is to select the hardness and thickness of the spacer so that its resonance (the strongest amplification) lies below the lowest frequency that needs to be isolated. Then, the entire range above several tens of hertz falls within the effective isolation range, thus even the higher harmonics generated by rapidly changing water pulsations are cut off. Thanks to the increasing dynamic stiffness, internal rubber damping, and impedance mismatch, vibroacoustic spacers are effective in reducing vibration and noise in the high-frequency range.

Próbie redukcji drgań przez zastosowanie tłumika masowego omówiono w pracy [11]. Opisano redukcję drgań rezonansowych o wysokiej częstotliwości w nadbudowie elektrowni szczytowo-pompowej wywoływane pracą hydrozespołu. Chociaż wykazano skuteczność tłumików masowych w kontrolowaniu drgań konstrukcyjnych, ich zastosowanie w ESP jest rzadkie. W pracy tej zaproponowano metodę sterowania TMD (ang. tuned mass damper) bazującą na drganiach o zmieniającej się częstotliwości i różnym rodzaju sterowania TMD, a także zaprojektowano zestaw urządzeń TMD o wysokiej częstotliwości. Przedstawione wyniki serii testów redukcji drgań i analiz numerycznych pokazują, że nowe urządzenie TMD może kontrolować postacie drgań wyższego rzędu konstrukcji, a pasmo częstotliwości tłumienia jest rozszerzone, co świadczy o dobrej skuteczności sterowania tłumikiem masowym.

Kolejnym zabiegiem, który może ograniczać drgania, jest zmiana sztywności konstrukcji przez zastosowanie elastycznych przekładek, tzw. mat wibroizolacyjnych. Skuteczność takich mat jest widoczna w zakresie średnich i wyższych częstotliwości, tzn. > 10 Hz. Kluczowe cechy przekładek elastomerowych to: wzrost „sztywności” przy dużej prędkości odkształceń, tarcie wewnętrzne i rozproszenie energii, niezgodność impedancji mechanicznej, strojenie rezonansu poniżej pasma wymuszenia. Wraz ze wzrostem częstotliwości wymuszenia zachowanie elastomeru staje się coraz bardziej „sztywne”. Oznacza to, że przy szybkich cyklach odkształcenia przekładka działa jak naturalny filtr dolnoprzepustowy. W praktyce powyżej kilkudziesięciu herców transmisja drgań maleje bardzo gwałtownie, więc wszystkie komponenty pracy hydrozespołu mogą być skutecznie tłumione. Elastomer to materiał wiskotyczny, w którym część energii drgań jest pochłaniana w samym materiale i rozpraszana w postaci ciepła jako tzw. efekt histerezy. Współczynnik strat gumy w paśmie od kilkuset do kilku tysięcy herców osiąga wartości, które znacznie zwiększają tłumienie, zwłaszcza tam, gdzie drgania mają krótkie okresy. Mechaniczne „opory” (impedancja) elastomeru są także znacznie wyższe przy wysokich częstotliwościach niż przy niskich. W efekcie większość energii drgań o krótkim okresie zostaje odbita lub zgubiona na granicy układu podłoże-przekładka, a tylko niewielka część przenika dalej do konstrukcji wsporczej. Kluczowym zabiegiem jest dobranie twardości i grubości przekładki, by jej rezonans (najsilniejsze wzmocnienie) leżał w najniższej częstotliwości, którą trzeba izolować. Wówczas cały zakres powyżej kilkudziesięciu herców znajduje się już w obszarze efektywnej izolacji, więc odcięciu ulegają nawet wyższe harmoniczne generowane przez szybkozmienne pulsacje wody.

Dzięki rosnącej dynamicznej sztywności, wewnętrznemu tłumieniu gumy i niezgodności impedancji, przekładki wibroakustyczne są skuteczne w redukcji drgań i hałasu w paśmie wysokich częstotliwości.

Podsumowanie

Zarówno etap realizacji, eksploatacji, jak i modernizacji elektrowni szczytowo-pompowych jest niewątpliwie dużym wyzwaniem inżynierskim. Główne aspekty, z którymi należy zmierzyć się już na etapie projektowania, a także modernizacji

Summary

Both the construction, operation, and modernization stages of pumped-storage power plants are undoubtedly a significant engineering challenge. Key aspects that must be addressed during the design and modernization stages include isolating the concrete structure from aggressive environments and minimizing the dynamic impacts of rotating machinery and the dynamic effects of flowing water. Additional challenges include ensuring the long-term durability of materials, the structure's resistance to chemical and biological corrosion, and limiting the effects of potential failures resulting from mechanical or fatigue damage to turbine components. Controlling and reducing vibrations, which can shorten the lifespan of the facilities and impact their safety, are also crucial. The benefits of using pumped-storage power plants as renewable energy sources and large-scale, highly efficient energy storage facilities, especially their rapid startup and shutdown capabilities, make it worthwhile to tackle even the most demanding engineering challenges.

The publication was financed by a subsidy from the dean of the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology

to izolacja konstrukcji betonowej od agresywnego środowiska oraz minimalizacja oddziaływań dynamicznych pochodzących od maszyn wirnikowych i od dynamicznego działania przepływającej wody. Dodatkowym wyzwaniem jest zapewnienie długookresowej trwałości materiałów, odporności konstrukcji na korozję chemiczną i biologiczną, a także ograniczenie skutków ewentualnych awarii wynikających z uszkodzeń mechanicznych lub zmęzeniowych elementów turbin. Istotne znaczenie ma również kontrola i redukcja drgań, które mogą skracać żywotność obiektów oraz wpływać na ich bezpieczeństwo.

Korzyści wynikające z wykorzystywania elektrowni szczytowo-pompowych jako odnawialnych źródeł energii i wielkoskalowych magazynów energii o dużej skuteczności, a zwłaszcza szybkiej możliwości rozruchu i wyłączania powodują, że warto podejmować nawet najbardziej wymagające wyzwania inżynierskie.

Publikacja została sfinansowana z subwencji dziekana Wydziału Inżynierii Łądowej Politechniki Warszawskiej

Received: 11.08.2025
Revised: 03.10.2025
Published: 23.12.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 11.08.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 03.10.2025 r.
Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

- [1] Kulpa J, Kopacz M, Stecula K, Olczak P. Pumped Storage Hydropower as a Part of Energy Storage Systems in Poland–Młoty Case Study. *Energies* 2024, 17, 1830. <https://doi.org/10.3390/en17081830>
- [2] Twaróg B. (2023). Modelling a pumped storage power plant on the example of the Porąbka Żar power plant. *Technical Transactions*, e2023001. <https://doi.org/10.37705/TechTrans/e2023001>;
- [3] Odnawialne źródła energii, pod red. M. Wichlińskiego, Rozdział 2. Mirek P., Podstawy konwersji energii w elektrowniach szczytowo-pompowych, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2021, e-ISBN 978-83-7193-867-2;
- [4] https://www.linkedin.com/posts/ckd-blansko_hydropower-hydro-spiral-activity-7342838819500552193-gnQd/?utm_source=share&utm_medium=member_desktop&rcm=ACoAAAOvnp0Bqqp9t5t6aSiVvxLhEKHSTJg-WAU (z dnia 18.08.2025 r.);
- [5] Gao X, Fu D, Wu H. Embedment of Steel Spiral Cases in Concrete: Lessons from a Structural Deformation Accident in China. *Appl. Sci.* 2022, 12, 8395. <https://doi.org/10.3390/app12178395>;
- [6] Fyall Z, Wysocki L. Korozja ługująca w żelbetowych zbiornikach do magazynowania wody przeznaczonej do spożycia, *Materiały Budowlane*, 2022; 2(594): DOI: 10.15199/33.2022.02.07;
- [7] Kurpinska M, Haustein E. Experimental Study of the Resistance to Influence of Aggressive Liquids on Lightweight Concrete. *Materials* 2021, 14, 4185. <https://doi.org/10.3390/ma14154185>;
- [8] Aguiar JB, Camões A, Moreira P.M. Performance of Concrete in Aggressive Environment, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 2, No. 1, pp. 21–25, June 2008;
- [9] Todorov, G, Kralov I, Kamberov K, Sofronov Y, Zlatev B, Zahariev E. Investigation and Identification of the Causes of the Unprecedented Accident at the “Chaira” Pumped Hydroelectric Energy Storage Plant. *Water* 2024, 16, 3393. <https://doi.org/10.3390/w16233393>;
- [10] Jinjian Zhang, Zhenyue Ma, Xueni Wang, Leike Zhang, Qianqian Wu, Mengyao Li, Vibration control on coupled unit-plant structure of pumped storage power station during sudden load-up process, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 212, 2024, 111333, ISSN 0888–3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111333>;
- [11] Zhong, T.; Feng, X.; Zhang, Y.; Zhou, J. Multiple-TMD-Based Structural Vibration Control for Pumped Storage Power Plants. *Appl. Sci.* 2020, 10, 5577, <https://doi.org/10.3390/app10165577>.