

Łucja Maria KURAŚ, Maksymilian SMOLNIK
 AGH University of Science and Technology (Akademia Górniczo-Hutnicza)

MODERNISATION OF LEMACH 6 DESIGN-RESEARCH METHOD AS A RELIABILITY ENGINEERING TOOL

Modernizacja metody projektowo-badawczej LEMACH 6 jako narzędzia kształtowania niezawodności

Abstract: *The article presents the developed design-research method for mechanical objects, which is a modernisation of the sequential-iterative design method LEMACH 6. As part of the design process organised by method guidelines, a number of activities related to designed object's reliability testing and engineering were included. The article characterises selected design methods, with particular emphasis on the LEMACH 6 method. Next, assumptions were made regarding the development and use of the proposed solution, and a diagram and detailed analysis of individual elements of the new method were presented. The developed method enables the organisation of design works, allowing one to rapidly create new solutions and avoid mistakes during designing.*

Keywords: reliability, design method, designing

Streszczenie: *W artykule przedstawiono opracowaną metodę projektowo-badawczą obiektów mechanicznych, która stanowi modernizację sekwencyjno-iteracyjnej metody projektowania LEMACH 6. W ramach procesu projektowego organizowanego wytycznymi metody zawarto szereg działań związanych z badaniem i kształtowaniem niezawodności projektowanego obiektu. W artykule scharakteryzowano wybrane metody projektowania, ze szczególnym uwzględnieniem metody LEMACH 6. Następnie sformułowano założenia dotyczące opracowania i wykorzystania proponowanego rozwiązania oraz przedstawiono schemat i szczegółową analizę poszczególnych elementów nowej metody. Opracowana metoda umożliwia organizowanie prac projektowych sprzyjając szybkiemu tworzeniu rozwiązań i unikaniu błędów konstrukcyjnych.*

Słowa kluczowe: niezawodność, metoda projektowania, projektowanie

1. Introduction

The selection and formation of the features of a technical object take place at its design stage. One of the most important features determining the satisfaction of the users needs are reliability and durability. Their actual values depend on the previous course of design and manufacturing processes of the technical means, as well as on the conditions of its operation and maintenance, which are specified by the designer (cf. [2]).

Engineering of the reliability and durability of a technical object consists in making specific decisions by the designer. They are related to the choices made in the process of developing the structure of the object. The basis for making good decisions is provided by data obtained in the conducted research, which may be in the form of simulation, laboratory or operational tests. Therefore, it is necessary to include research activities in the structure of the design process [2].

The subject of the research are the phenomena that determine the correct operation of the object, and thus affecting its reliability. In turn, the estimation of reliability at the design stage is an action that facilitates the designer's decision-making process (cf. [11]).

The relationship between the values of various features characterising the developed solution and its reliability can be analysed with the help of reliability engineering calculation tools (e.g. [9]), often in the context of conducted optimisation process ([1] and many others). However, they do not have to be design methods for organising activities throughout the entire design process. An example of a design-research method with a significantly limited scope of use due to the type of objects constituting the subject of design (batteries supplying electric vehicles) is presented in the paper [15].

The purpose of this paper is to develop a design-research method for organizing work related to the design of mechanical objects. It is a modernisation of the LEMACH 6 method, which relates to designing carried out together with the necessary research.

2. Characteristics of the selected design methods

Design is sometimes understood as the conceptual preparation of a relevant change [8] (cf. [3]). Therefore, it requires making a number of decisions in the process of developing a new technical solution (object or process). Tools that facilitate the work of the designer can be various design methods [2], indicating the next steps to perform as part of the design process. They are often recorded in the form of algorithms and presented as diagrams. An example of this are the LEMACH design methods.

LEMACH design methods constitute a group of six methods. They were created at The Institute of Basic Problems of Machine Construction of the AGH University of Science and Technology in Krakow as a result of the work of Władysław Lenkiewicz, Bogusław Machowski and Konrad Zajączkowski. The development of subsequent methods was

associated with the improvement of previous concepts and the proposals of solutions for specific purposes [6, 12].

The LEMACH 1 method (published in 1972) is intended for the organisation of work related to mechanical objects constructing. Its development resulted in the LEMACH 2 method (presented in 1975). The LEMACH 3 method (developed in 1976) is a general method with a wider scope of application – it can be used in the design of objects, systems, processes, and even to develop new design methods for specific applications. However, such a universal method does not always have to be useful, hence the LEMACH 4 method has been developed for the organisation of design work on machines and mechanical objects [12]. The LEMACH 5 method (available together with the LEMACH 6 method in [6] from 1982) organises activities related to the modernisation of technical solutions and the development of detailed solutions for a specific concept. The LEMACH 6 method enables combining design and research processes, which is important when designing innovative technical objects or single (individual) objects [6, 12]. Such activities remain associated with the verification and formation of the reliability of technical objects. Therefore, when developing the method of engineering the reliability of mass-produced objects presented in this article, the LEMACH 6 method was used. This method has already been used in the development of the method of engineering the reliability of individual objects [4]. Its most important features are presented below.

The LEMACH 6 design method includes typical design and construction activities supplemented with activities related to testing the developed solution. This is done on the basis of consistent verification of the results of current design at its individual stages. The verification is carried out in the process of testing and making the necessary changes to improve the solution before its final acceptance, which will take place at the end of the design process.

The activities included in the LEMACH 6 method are listed below (cf. [6]).

1. Acceptance of the project task.
2. Data analysis, making additions, formulation of requirements, evaluation criteria and importance indicators.
3. Studies in typical solutions.
4. Devising /choosing a method, generating new ideas for a solution, comparing existing and new concepts/.
5. Determining whether the set of concepts is sufficient.
6. Optimisation of the concept.
7. Evaluation of the selected concept.
8. Elaboration of the preliminary project /technical and economic assumptions/.
9. Approval of the preliminary project.
10. Optimisation and adoption of design and construction tests strategies.
11. Elaboration of prototype preliminary documentation.
- 11a. Building a prototype or development of its model.
- 11b. Construction tests of the prototype.
12. Introducing changes to the preliminary project.

- 12a. Introducing changes to the prototype.
- 12b. Tests of the modified prototype.
13. Determining whether the changes have been successful.
14. Detail designing.
- 14a. Detail construction tests.
15. Determining whether the test results are positive.
16. Acceptance of the project /I/.
17. Elaboration of manufacturing (production) documentation.
18. Elaboration of operation and maintenance documentation.
19. Elaboration of the pilot lot operational tests program.
- 19a. Manufacturing of the pilot lot.
- 19b. Operational tests of the pilot lot.
20. Determining whether the pilot lot meets the requirements.
- 20a. Manufacturing of the commercial lot.
- 20b. Collecting data on operation.
21. Formulation of conclusions and modernisation assumptions.
22. Acceptance of the project /II/.

In addition, the authors of the method allowed returning to previous activities in the situation when it proves necessary due to the unsatisfactory results of previous work (cf. [6]).

In the event of such an organised design process, the placement of “Acceptance of the project” (step 22) after “Manufacturing of the commercial lot” (step 20a) and “Collecting data on operation” (step 20b) may raise doubts. This could mean that the end of the design process would occur when the objects designed were already manufactured and were in operation for some time. Undoubtedly, operational tests and collection of operational data are important for the future modernisation of the solution as part of subsequent design works. However, it seems reasonable that the manufacture and operation of objects must be preceded by prior final approval of their project. The analysis of the cited diagram does not allow to unequivocally determine the intention of the authors of the method in the aforementioned range. This ambiguity was eliminated in the developed concept of the design-research method, which is presented in the next chapter.

3. A concept of LEMACH 6 design-research method modernisation

The presented concept of modernisation of the design-research method LEMACH 6 is a development of the method proposed in [5]. The development of the new method involved the adoption of the following assumptions, which should also accompany its use.

1. The method is intended for the organisation of project activities and related research.

2. The method includes a number of activities related to the conscious and purposeful development of durability and reliability of technical objects.
3. The design process has a sequential-iterative structure.
4. At the beginning of the design process, the identified need is already known, but the concept of the technical solution is not defined yet.
5. The object of designing are mechanical objects (as a whole or their sub-assemblies).
6. The designed objects are developed for lot or mass production (they are not individual objects).
7. The method is intended primarily for the design of complex objects (in the context of reliability), but it can be adapted to the design of simple objects (single elements).

Individual activities within the presented design-research method are presented in fig.1 and described in detail in the following paragraphs, developing the solution presented in [5].

The first design action (step 1) concerns the decision to accept a design task to be solved. This is related to the analysis of the identified need and the formulation of the main function of the object. The function will no longer be subject to change in the ongoing design process.

The next action (step 2) is the development of possible solution concepts for the previously formulated main function as well as their evaluation and selection of the best in the context of the adopted criteria. The innovativeness of the solution may result from innovation or changes in the selection of construction materials, determining of dimensions, geometric form and connections of parts, as well as their interaction and configuration, etc.

Then the preliminary design takes place (step 3). It begins with the identification of activities leading to the construction of the object. It should take into account the future operating conditions of the object, the specific requirements related to its function (regarding e.g. strength, capacity, power, efficiency as well as durability and reliability) and its interaction with other machine parts or the environment in which it will operate (e.g. overall and connection dimensions, control principles). Equally important activities are: preliminary selection of materials and determining of the most important dimensions of individual parts. In addition, anticipated parts interactions and associated phenomena (e.g. deformation, wear) should be considered. As part of the preliminary designing, the possible use of standard parts and catalog sub-assemblies is also determined. It ends with the verification of the preliminary project and its approval (point 4) or its submission to the appropriate correction (again step 3).

The adoption of the design strategy and construction tests (point 5) includes activities related to planning further design and research activities. They may concern, among others division of tasks among individual persons of a team of designers and researchers, defining partial goals and establishing a work schedule. This should help to achieve the main design goal in the required time as well as to avoid mistakes.

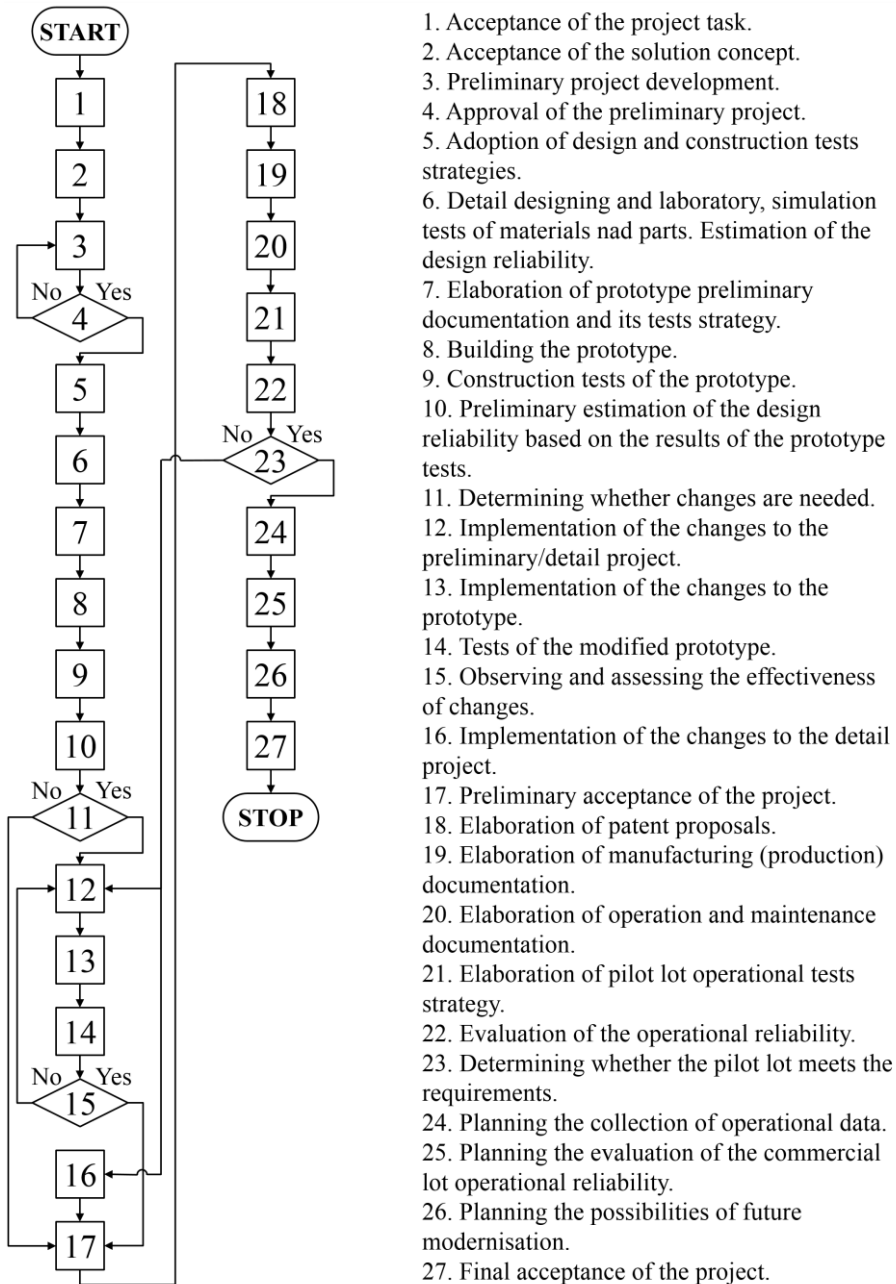


Fig. 1. Diagram of the design-research method developed

As a result of the above actions, the conditions are provided to start the detail designing (step 6), consisting in accurately determining all elements of the solution being developed.

However, this requires that you have adequate data resources to make decisions regarding the details of the structure being developed. Data of this type is obtained primarily on the basis of previous design work and operational testing of previously used objects. Due to the introduction of new solutions (or significant structural changes) that have not yet been verified during operation, it is justified and necessary to carry out additional laboratory and simulation tests. They may concern, for example, laboratory testing of strength and wear of construction materials, and simulation analysis of the functioning of the object and the interaction of its parts, as well as estimating reliability and durability (cf. [9, 11, 15]).

Based on the results of detail designing, preliminary prototype documentation and its testing strategy are developed (step 7). The possibility of future documentation changes after testing should be considered.

Next, a prototype (step 8) should be built and its tests (step 9) carried out in accordance with the adopted strategy. Depending on the needs, these activities can be carried out for a bigger sample of the objects.

Based on the results of prototype testing, a preliminary estimation of the object's reliability is carried out (step 10). This research may in particular consist in (cf. [14]):

- observation of the amount of wear of the parts after a specified period of operation and estimating the operation time to reaching the limit level of wear (determined on the basis of conditions of proper functioning),
- registration of the operation time to failure of the entire object or its individual parts,
- registration of the operation time of the object or its individual parts limited by their durability.

Depending on the number of items tested and the test method, different approaches to reliability and durability analysis are possible [7, 10].

With a larger number of samples tested, reliability characteristics determined based on statistical analysis of data are used. The values of operation time to failure obtained in tests of several objects of the same design can be the basis for the description of reliability using probability distributions. Reliability characteristics (indexes) such as: reliability function, cumulative distribution function, probability density function of operation time to failure, or failure rate [7, 10, 14] are then determined. They give the designer a view of how the probability of correct work of the object for different times of its functioning changes, how the relative deterioration of reliability per unit of operation time of the object is changing, etc.

In the case of a single object sample, useful reliability models are, among others availability and downtime indexes (cf. [14]). Their use is similar to the use of the previously described reliability indexes.

Based on the reliability analysis carried out, the designer has the opportunity to evaluate the developed solution (step 11) and to introduce any corrections in the structure of the object (step 12) to achieve the desired change of the listed characteristics. If no changes are needed, the designer should go to step 17.

After making improvements in the structure, the appropriate changes should be implemented to the prototype (step 13), which is subject to testing again (step 14). Based

on the results of the tests, the effectiveness of the changes is assessed (step 15), which is carried out in a similar way as in step 10. If the required results are still not achieved, then the designer should return to step 12. Actions 12 to 15 are repeated in cycles until satisfactory structure improvements. However, if the changes have been successful, preliminary acceptance of the project may take place (step 17).

Due to the preliminary acceptance of the project (preceded by prototype testing), the designer already has a partially verified technical solution. Preparation of patent proposals should be considered (step 18). They may apply to the entire developed object or certain parts or sub-assemblies of it. This action is justified when unprecedented design solutions are introduced.

Elaboration of manufacturing documentation (production, step 19) is intended to enable the correct (i.e. in accordance with the constructor's guidelines) manufacturing of individual parts and assembling of the entire object.

Elaboration of the operation and maintenance documentation (step 20) is an important activity because it consists in formulating information necessary to conduct proper operation of the object, among others its scope of application, time of inspections, maintenance and preventive replacement of parts as well as requirements for other operating conditions. Providing such guidelines is the responsibility of the designer, as it conditions proper use of the object. Incorrect use of the object prevents its proper functioning and consequently the satisfaction of the user's needs.

Depending on the type of project and the funds allocated for this purpose as well as the time available to the designer, operational tests of the pilot lot of the designed object can be conducted. The pilot lot includes items that are subject to use to satisfy real needs. The operation conditions of these items should be similar to the assumed real conditions, however, at the same time these items are subjected to intensive testing in accordance with the adopted strategy (step 21). These activities should reveal construction errors that were not identified in the prototype testing phase. The results of the pilot lot tests allow for the first evaluation of the operational reliability of the objects and their parts (step 22). The same tools (mathematical models) that are proposed in step 10 are used here. In addition, the data obtained should allow the identification of weak links in the designed objects, i.e. their elements that have worse (compared to other elements) durability or reliability. Such analyses enable the designer to confront the adopted assumptions and his standpoint with reality. At the same time, it is a stage of the design process when for the last time it is possible to make corrections before the final acceptance of the project.

Determining whether the pilot lot meets the requirements (step 23) leads to one of two possible conclusions.

If the assessment is negative, the designer should consider returning to earlier steps of the design process. In particular, it is possible to return to step 12 (necessary changes and testing of the prototype again) or to step 16 – when minor changes are implemented to the structure of the object.

If the assessment is positive, it is necessary to plan the collection of operational data on the commercial lot (in the future, after its manufacturing, step 24). It is planning future

activities that will take place after the project has been approved and implemented. These data are particularly valuable because they will allow evaluation of the reliability and durability (step 25) of objects used by real consumers. This is particularly important for the designer because it provides the basis for further improvement (modernisation [13], cf. [2]) of the developed solution in the future. One should be prepared for this already during the current design process (step 26) by properly archiving the documentation and results of previous research so that they may be easily used.

Conducting all of these activities leads to the final acceptance of project (step 27).

4. Conclusions

The application of the presented method is intended to facilitate the development of the mechanical object structure. It should also accelerate the achievement of the goal, helping to avoid mistakes during designing. If the errors become apparent only at the manufacturing stage or during the operation of the object, they will cause significant losses. The use of the developed method aims at their elimination at an early stage of the object's life cycle.

The inclusion of research in the design process and conscious engineering of the reliability of the designed object favours estimating the course of its future operation, formulation of operational guidelines and ensuring safety. Similarly, the proposed engineering of object's durability facilitates the rational use of available material and energy resources, and enables the development of preventive renewal strategies.

While developing the presented design-research method, many years of experience of the authors of the LEMACH methods were used, because the proposed solution was obtained in a modernisation process of the LEMACH 6 method. The new method is a universal tool that in the future can be adapted to the needs of the design of mechanical objects of a particular class.

Acknowledgement

The research was performed in the framework of a research program done at the AGH University of Science and Technology in Cracow, at the Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, the contract number – subsidy 16.16.130.942

5. References

1. Canelas A., Carrasco M., Lopez J.: A new method for reliability analysis and reliability-based design optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 59, 2019.

2. Dietrych J.: System i konstrukcja. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985.
3. Gasparski W.W.: Designology: Toward a Unified Science on Design Revisited [in] Gasparski W.W., Orel T. [eds.]: Designology Studies on Planning for Action. Transaction Publishers, New Brunswick 2014.
4. Heinrich M., Lenkiewicz W.: Erhöhung und Auswertung des Zuverlässigkeitsniveaus von tribologischen Paarungen im Zeitraum der Anfangsnutzung eines einzelnen Objekts. Tribologie und Schmierungstechnik, 3, 2002.
5. Kuraś Ł. M.: Koncepcja procesu projektowo-badawczego wybranych sprzęgieł ciernych w aspekcie zapewnienia ich niezawodności [Engineer Diploma Thesis]. AGH w Krakowie, Kraków 2020.
6. Lenkiewicz W., Machowski B.: Materiały seminarium Szkoła Metodologii Konstruowania Maszyn, część III. Społeczny Ośrodek Badań i Studiów, Rydzyna 1982.
7. Lenkiewicz W., Szybka J. F. [eds.]: Problemy badawcze w eksploatacji wybranych obiektów technicznych. Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, Warszawa 2010.
8. Miller D.: Projektowanie metodyczne. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987.
9. Młynarski S., Pilch R., Smolnik M., Szybka J., Wiązania G.: Methodology of network systems reliability assessment on the example of urban transport. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, vol. 20 (2), 2018.
10. Moss T.R.: The Reliability Data Handbook. Professional Engineering Publishing Limited, London and Bury St Edmunds 2005.
11. O'Halloran B.M., Hoyle C., Tumer I. Y., Stone R. B.: The early design reliability prediction method. Research in Engineering Design, 30, 2019.
12. Smolnik M.: A conception of modernising LEMACH designing methods using TRIZ instruments [in] Souchkov V., Kässi T. [eds.]: TRIZfest-2014 theories and applications the 10th international conference September 4–6, 2014, Prague, Czech Republic: conference proceedings. International TRIZ Association – MATRIZ, Knoxville 2014.
13. Smolnik M.: A Praxiological Model of Machines Modernisation Process. Journal of Machine Construction and Maintenance, Problemy Eksploatacji, 3 (106), 2017.
14. Tobias P.A., Trindade D.C.: Applied Reliability. Third Edition. CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton 2012.
15. Xia Q., Wang Z., Ren Y., Sun B., Yang D., Feng Q.: A reliability design method for a lithium-ion battery pack considering the thermal disequilibrium in electric vehicles. Journal of Power Sources, vol. 386, 2018.

MODERNIZACJA METODY PROJEKTOWO-BADAWCZEJ LEMACH 6 JAKO NARZĘDZIA KSZTAŁTOWANIA NIEZAWODNOŚCI

1. Wprowadzenie

Wybór i kształtowanie cech obiektu technicznego odbywa się na etapie jego projektowania. Jednymi z najważniejszych cech decydujących o zaspokojeniu potrzeb odbiorcy obiektu są niezawodność i trwałość. Ich rzeczywiste wartości zależą od wcześniejszego przebiegu procesów projektowania oraz wytwarzania środka technicznego, a także od warunków jego eksploatacji, co do których wymagania formułuje projektant (por. [2]).

Kształtowanie niezawodności i trwałości obiektu technicznego polega na podejmowaniu przez projektanta określonych decyzji. Związane są one z wyborami dokonywanymi w procesie opracowywania konstrukcji obiektu. Podstaw do podejmowania dobrych decyzji dostarczają dane uzyskiwane w prowadzonych badaniach, które mogą mieć charakter badań symulacyjnych, laboratoryjnych, czy eksploatacyjnych. W związku z tym potrzebne jest uwzględnienie w strukturze procesu projektowego działań o charakterze badawczym [2].

Przedmiotem prowadzonych badań są zjawiska decydujące o poprawnej pracy obiektu, a zatem wpływające na jego niezawodność. Z kolei prognozowanie niezawodności na etapie projektowania jest działaniem ułatwiającym proces podejmowania decyzji przez projektanta (por. [11]).

Zależność pomiędzy wartościami różnych cech charakteryzującymi rozwiązanie a jego niezawodnością może być analizowana z pomocą rozbudowanych narzędzi obliczeniowych inżynierii niezawodności (np. [9]), często w odniesieniu do prowadzonej optymalizacji ([1] i wielu in.). Nie muszą być to jednak metody projektowania przeznaczone do organizowania działań w ramach całego procesu projektowego. Przykład metody projektowo-badawczej o znacznie ograniczonym zakresie zastosowania z uwagi na rodzaj obiektów stanowiących przedmiot projektowania, tj. baterii zasilających pojazdy elektryczne przedstawiono w artykule [15].

Celem niniejszego artykułu jest opracowanie metody projektowo-badawczej przeznaczonej do organizacji prac związanych z projektowaniem obiektów mechanicznych. Sta-

nowi ona modernizację metody LEMACH 6, która dotyczy projektowania prowadzonego z uwzględnieniem niezbędnych badań.

2. Charakterystyka wybranych metod projektowania

Projektowanie bywa rozumiane jako koncepcyjne przygotowanie zmiany relewantnej [8] (por. [3]). Wymaga ono zatem podjęcia szeregu decyzji w procesie opracowywania nowego rozwiązania technicznego (obiektu albo procesu). Narzędziami, które ułatwiają pracę projektantowi, mogą być różne metody projektowania [2], wskazujące kolejne czynności do wykonania w ramach procesu projektowego. Niejednokrotnie zapisywane są one w postaci algorytmów i przedstawiane jako schematy. Przykładem tego są metody projektowania LEMACH.

Metody projektowania LEMACH stanowią grupę obejmującą sześć metod. Powstały one w Instytucie Podstaw Budowy Maszyn Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie w wyniku prac Władysława Lenkiewicza, Bogusława Machowskiego i Konrada Zajączkowskiego. Opracowywanie kolejnych metod związane było z doskonaleniem wcześniejszych koncepcji oraz przygotowywaniem rozwiązań o szczegółowym przeznaczeniu [6, 12].

Metoda LEMACH 1 (opublikowana w 1972 roku) przeznaczona jest do organizacji prac związanych z projektowaniem szczegółowym obiektów mechanicznych. Jej rozwinięcie stanowi metoda LEMACH 2 (przedstawiona w 1975 roku). LEMACH 3 (opracowana w 1976 roku) jest metodą ogólną, charakteryzującą się szerszym zakresem zastosowania – może być wykorzystywana przy projektowaniu obiektów, systemów, procesów, a nawet do opracowywania nowych metod projektowania przeznaczonych do szczegółowych zastosowań. Tak uniwersalna metoda nie musi być jednak zawsze przydatna, stąd rozwinięto również metodę LEMACH 4 przeznaczoną do organizacji prac projektowych dotyczących maszyn i obiektów mechanicznych [12]. LEMACH 5 (dostępna wraz z metodą LEMACH 6 w pracy [6] z 1982 roku) porządkuje działania związane z modernizacją rozwiązań technicznych oraz opracowywaniem rozwiązań szczegółowych dla określonej koncepcji. Metoda LEMACH 6 umożliwia łączenie procesów projektowania i badania, co ma istotne znaczenie przy projektowaniu nowatorskich obiektów technicznych lub obiektów pojedynczych (unikalnych) [6, 12]. Działania takie pozostają związane z weryfikacją i kształtowaniem niezawodności obiektów technicznych. Z tego względu, opracowując przedstawioną w niniejszym artykule metodę kształtowania niezawodności obiektów wytwarzanych seryjnie, posłużono się metodą LEMACH 6. Była ona już wcześniej wykorzystana przy opracowywaniu metody kształtowania niezawodności obiektów pojedynczych [4]. Najważniejsze jej cechy zostały przedstawione poniżej.

Metoda projektowania LEMACH 6 obejmuje typowe działania projektowo-konstrukcyjne uzupełnione czynnościami związanymi z badaniem opracowywanego rozwiązania. Odbywa się to na zasadzie konsekwentnego weryfikowania wyników

dotychczasowego projektowania na jego poszczególnych etapach. Weryfikację przeprowadza się w procesie badania i wprowadzania niezbędnych zmian celem udoskonalenia rozwiązania przed jego ostateczną akceptacją, która dokona się w chwili kończącej proces projektowy.

Kolejne działania ujęte w metodzie LEMACH 6 zostały przedstawione poniżej (por. [6]).

1. Przyjęcie zadania projektowego.
2. Analiza danych, dokonanie uzupełnień, sformułowanie wymagań, kryteriów oceny i wskaźników ważności.
3. Studia w zakresie typowych rozwiązań.
4. Konkypowanie /dobór metody, generowanie nowych idei rozwiązania, zestawienie dotychczasowych i nowych koncepcji/.
5. Ocena, czy zbiór koncepcji jest wystarczający.
6. Optymalizacja koncepcji.
7. Akceptacja wybranej koncepcji.
8. Opracowanie projektu wstępnego /założenia techniczno-ekonomiczne/.
9. Przyjęcie i zatwierdzenie projektu wstępnego.
10. Optymalizacja i przyjęcie strategii projektowania oraz badań konstrukcyjnych.
11. Opracowanie wstępnej dokumentacji prototypu.
- 11a. Wytworzenie prototypu lub opracowanie jego modelu.
- 11b. Badania konstrukcyjne prototypu.
12. Wprowadzenie zmian w projekcie wstępnym.
- 12a. Wprowadzenie zmian do prototypu.
- 12b. Badania zmienionego prototypu.
13. Stwierdzenie, czy zmiany okazały się skuteczne.
14. Projektowanie szczegółowe.
- 14a. Badania konstrukcyjne szczegółowe.
15. Określenie, czy wyniki badań są pozytywne.
16. Przyjęcie, akceptacja projektu /I/.
17. Przygotowanie dokumentacji wytwórczej (technologicznej).
18. Przygotowanie dokumentacji eksploatacyjnej.
19. Przygotowanie programu badań eksploatacyjnych serii informacyjnej.
- 19a. Wytworzenie serii informacyjnej.
- 19b. Badania eksploatacyjne serii informacyjnej.
20. Ocena, czy seria informacyjna spełnia wymagania.
- 20a. Wytworzenie serii handlowej.
- 20b. Zebranie informacji eksploatacyjnej.
21. Sformułowanie wniosków i założeń modernizacyjnych.
22. Przyjęcie, akceptacja projektu /II/.

Ponadto autorzy metody uwzględnili możliwości powrotu do wcześniejszych działań w przypadku, gdy okazuje się to niezbędne ze względu na niezadowolające efekty dotychczasowych prac (por. [6]).

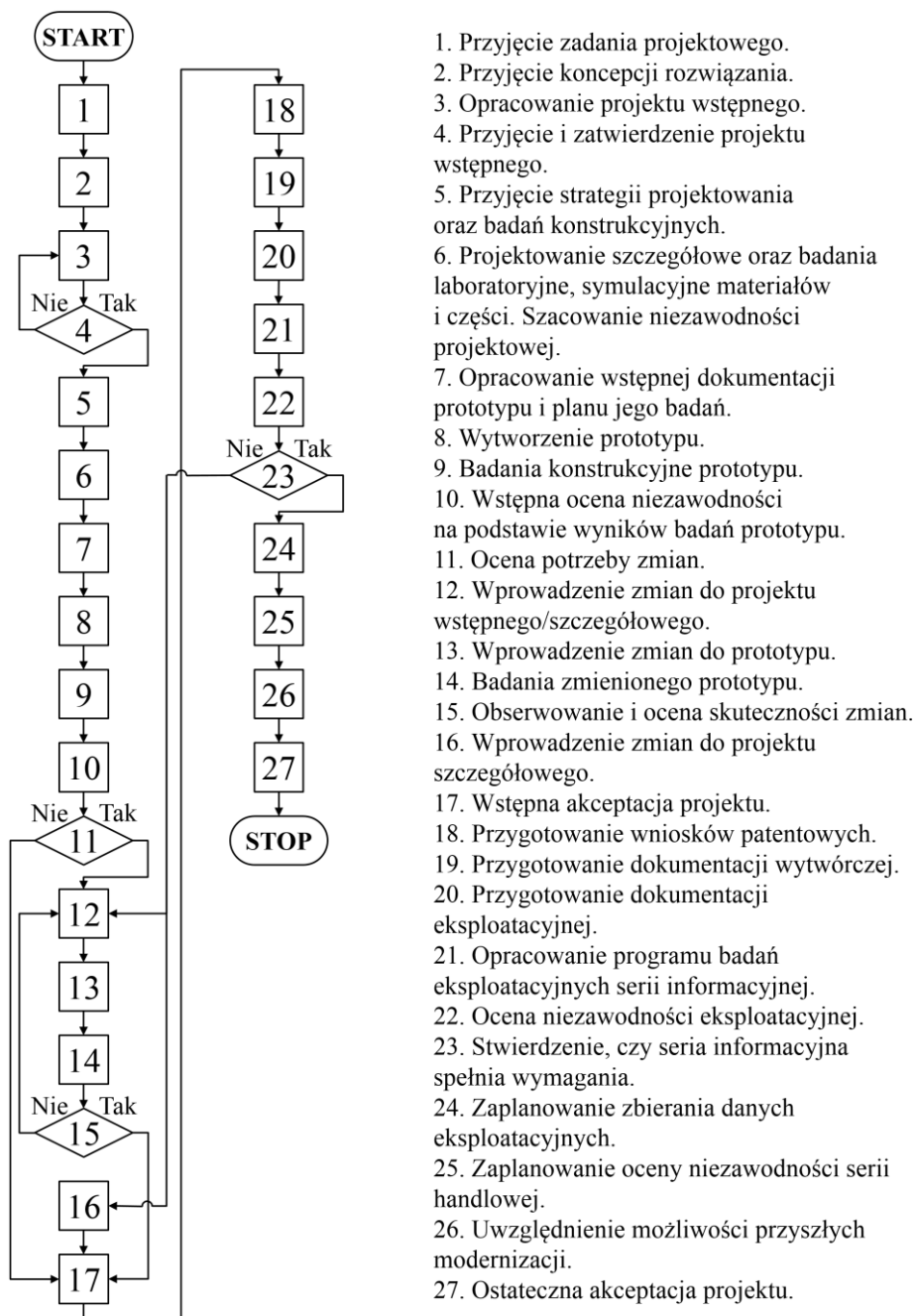
W przypadku tak zorganizowanego procesu projektowego wątpliwości może budzić umieszczenie „Akceptacji projektu” (punkt 22) po „Wytworzeniu serii handlowej” (punkt 20a) i „Zebraniu informacji eksploatacyjnej” (punkt 20b). Mogłoby to oznaczać, że koniec procesu projektowania następowalby w chwili, gdy projektowane obiekty zostały już wytworzone i były eksploatowane przez pewien czas. Niewątpliwie badania eksploatacyjne i zbieranie danych o eksploatacji mają istotne znaczenie dla modernizacji rozwiązania w ramach kolejnych prac projektowych. Wydaje się jednak zasadne, że wytworzenie i eksploatacja obiektów muszą być poprzedzone wcześniejszą ostateczną akceptacją ich projektu. Analiza przytoczonego schematu nie pozwala jednoznacznie określić zamysłu autorów metody w wymienionym zakresie. Niejasność tę usunięto w opracowanej koncepcji metody projektowo-badawczej, którą przedstawiono w kolejnym rozdziale.

3. Koncepcja modernizacji metody projektowo-badawczej LEMACH 6

Prezentowana koncepcja modernizacji metody projektowo-badawczej LEMACH 6 stanowi rozwinięcie metody opracowanej w [5]. Opracowanie nowej metody wiązało się z przyjęciem niżej wymienionych założeń, które powinny również towarzyszyć jej wykorzystaniu.

1. Metoda przeznaczona jest do organizacji działań projektowych i związanych z nimi badań.
2. Metoda obejmuje szereg działań związanych ze świadomym i celowym kształtowaniem trwałości i niezawodności obiektów technicznych.
3. Proces projektowy ma strukturę sekwencyjno-iteracyjną.
4. Na początku procesu projektowania znana jest już zidentyfikowana potrzeba, natomiast nie jest określona koncepcja rozwiązania technicznego.
5. Przedmiot projektowania stanowią obiekty mechaniczne (kompletne albo ich podzespoły).
6. Projektowane obiekty będą wytwarzane seryjnie albo masowo (nie są obiektami pojedynczymi).
7. Metoda przeznaczona jest przede wszystkim do projektowania obiektów złożonych (w kontekście niezawodnościowym), jednak można ją dostosować do projektowania obiektów prostych.

Poszczególne działania w ramach prezentowanej metody projektowo-badawczej przedstawiono na rys. 1 oraz szczegółowo opisano w kolejnych akapitach, rozwijając rozwiązanie przedstawione w pracy [5].



1. Przyjęcie zadania projektowego.
2. Przyjęcie koncepcji rozwiązania.
3. Opracowanie projektu wstępnego.
4. Przyjęcie i zatwierdzenie projektu wstępnego.
5. Przyjęcie strategii projektowania oraz badań konstrukcyjnych.
6. Projektowanie szczegółowe oraz badania laboratoryjne, symulacyjne materiałów i części. Szacowanie niezawodności projektowej.
7. Opracowanie wstępnej dokumentacji prototypu i planu jego badań.
8. Wytworzenie prototypu.
9. Badania konstrukcyjne prototypu.
10. Wstępna ocena niezawodności na podstawie wyników badań prototypu.
11. Ocena potrzeby zmian.
12. Wprowadzenie zmian do projektu wstępnego/szczegółowego.
13. Wprowadzenie zmian do prototypu.
14. Badania zmienionego prototypu.
15. Obserwowanie i ocena skuteczności zmian.
16. Wprowadzenie zmian do projektu szczegółowego.
17. Wstępna akceptacja projektu.
18. Przygotowanie wniosków patentowych.
19. Przygotowanie dokumentacji wytwórczej.
20. Przygotowanie dokumentacji eksploatacyjnej.
21. Opracowanie programu badań eksploatacyjnych serii informacyjnej.
22. Ocena niezawodności eksploatacyjnej.
23. Stwierdzenie, czy seria informacyjna spełnia wymagania.
24. Zaplanowanie zbierania danych eksploatacyjnych.
25. Zaplanowanie oceny niezawodności serii handlowej.
26. Uwzględnienie możliwości przyszłych modernizacji.
27. Ostateczna akceptacja projektu.

Rys. 1. Schemat opracowanej metody projektowo-badawczej

Pierwsze działanie w ramach projektowania (punkt 1) dotyczy decyzji o przyjęciu zadania projektowego do rozwiązania. Związane jest to z analizą zidentyfikowanej potrzeby i sformułowaniem głównej funkcji użytkowej obiektu, która nie będzie podlegać już zmianie w prowadzonym procesie projektowym.

Kolejnym działaniem (punkt 2) jest opracowanie możliwych koncepcji rozwiązania dla sformułowanej wcześniej głównej funkcji użytkowej oraz ich ocena i wybór najlepszego w kontekście przyjętych kryteriów. Innowacyjność rozwiązania może wynikać z nowatorstwa lub zmian w zakresie doboru materiałów konstrukcyjnych, określenia wymiarów, postaci geometrycznej i połączeń części, a także ich współpracy i konfiguracji, itp.

Następnie ma miejsce projektowanie wstępne (punkt 3). Rozpoczyna się ono od identyfikacji czynności prowadzących do skonstruowania obiektu. Należy tu uwzględnić przyszłe warunki eksploatacji obiektu, szczegółowe wymagania związane z jego funkcją (dotyczące np. wytrzymałości, wydajności, mocy, sprawności, jak również trwałości oraz niezawodności), a także jego współpracę z innymi podzespołami maszyny lub otoczeniem, w którym będzie on eksploatowany (np. wymiary gabarytowe i przyłączeniowe, zasady sterowania). Równie ważnymi czynnościami są: wstępny dobór materiałów i określenie najważniejszych wymiarów poszczególnych części. Ponadto należy rozważyć przewidywane interakcje części i towarzyszące im zjawiska (np. odkształcenia, zużycie). W ramach projektowania wstępnego określa się również możliwe wykorzystanie części znormalizowanych i podzespołów katalogowych. Kończy się ono weryfikacją projektu wstępnego i jego przyjęciem (punkt 4) albo jego przekazaniem do odpowiedniej korekty (ponownie punkt 3).

Przyjęcie strategii projektowania i badań konstrukcyjnych (punkt 5) obejmuje czynności związane z zaplanowaniem dalszych działań projektowych i badawczych. Dotyczyć one mogą m.in. podziału zadań pomiędzy poszczególne osoby zespołu projektantów i badaczy, określenia celów cząstkowych i ustalenia harmonogramu prac. Powinno to sprzyjać osiągnięciu głównego celu projektowania w wymaganym czasie, a także unikaniu błędów.

W wyniku zrealizowania powyższych działań zapewnione są warunki do rozpoczęcia projektowania szczegółowego (punkt 6), polegającego na dokładnym określeniu wszystkich elementów opracowywanego rozwiązania. Wymaga to jednak dysponowania odpowiednim zasobem danych umożliwiającym podejmowanie decyzji odnośnie do szczegółów kształtowanej konstrukcji. Tego rodzaju dane uzyskuje się przede wszystkim na podstawie wcześniejszych prac projektowych i badań eksploatacyjnych dotychczas wykorzystywanych obiektów. W związku z wprowadzaniem nowych rozwiązań (lub istotnych zmian konstrukcyjnych), które nie zostały jeszcze zweryfikowane w czasie eksploatacji, uzasadnione i niezbędne jest przeprowadzenie dodatkowych badań laboratoryjnych oraz symulacyjnych. Dotyczyć one mogą np.: laboratoryjnego badania wytrzymałości i zużycia materiałów konstrukcyjnych, a także symulacyjnej analizy funkcjonowania obiektu i współpracy jego części oraz szacowania niezawodności i trwałości (por. [9, 11, 15]).

Dysponując wynikami szczegółowego projektowania opracowuje się wstępną dokumentację prototypu i plan jego badań (punkt 7). Należy uwzględnić możliwość przyszłych zamian dokumentacji po przeprowadzeniu badań.

Następnie należy wytworzyć prototyp (punkt 8) i przeprowadzić jego badania (punkt 9) zgodnie z przyjętym planem. Działania te, zależnie od potrzeb, mogą zostać przeprowadzone dla większej liczby egzemplarzy obiektu.

W oparciu o wyniki badań prototypu przeprowadzana jest wstępna ocena niezawodności obiektu (punkt 10). Badania te w szczególności mogą polegać na (por. [14]):

- obserwacji wielkości zużycia części po określonym czasie eksploatacji i prognozowaniu czasu pracy do osiągnięcia granicznego poziomu zużycia (określanego na podstawie warunków poprawnego funkcjonowania),
- rejestracji czasu pracy do uszkodzenia całego obiektu lub poszczególnych jego części,
- rejestracji czasu pracy obiektu lub jego poszczególnych części do wyczerpania ich trwałości.

Zależnie od liczby przebadanych egzemplarzy i metody badań możliwe jest różne podejście do analizy niezawodności i trwałości [7, 10].

Przy większej liczbie badanych egzemplarzy zastosowanie znajdują charakterystyki niezawodności wyznaczane w oparciu o opracowanie statystyczne danych. Wartości czasu pracy do uszkodzenia uzyskane w badaniach kilku obiektów o tej samej konstrukcji mogą stanowić podstawę opisu niezawodności za pomocą rozkładów prawdopodobieństwa. Wyznacza się wówczas charakterystyki niezawodności, takie jak: funkcja niezawodności, dystrybuanta, funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu pracy do uszkodzenia, czy intensywność uszkodzeń [7, 10, 14]. Dają one projektantowi obraz jak zmienia się prawdopodobieństwo poprawnej pracy obiektu dla różnego czasu jego funkcjonowania, jak kształtuje się względne pogorszenie niezawodności na jednostkę czasu pracy obiektu itd.

W przypadku pojedynczego egzemplarza obiektu użytecznymi modelami niezawodnościowymi są m.in. wskaźniki gotowości i przestoju (por. [14]). Ich zastosowanie przebiega w sposób zbliżony do wykorzystania przedstawionych wcześniej charakterystyk niezawodności.

Na podstawie przeprowadzonej analizy niezawodnościowej projektant ma możliwość oceny opracowanego rozwiązania (punkt 11) i wprowadzenia ewentualnej korekty w konstrukcji obiektu (punkt 12) celem żądanej zmiany wymienionych charakterystyk. Gdy brak jest potrzeby wprowadzenia zmian, przechodzi się do punktu 17.

Po wprowadzeniu ulepszeń w konstrukcji należy dokonać odpowiednich zmian w prototypie (punkt 13), który podlega ponownym badaniom (punkt 14). Na podstawie wyników badań ocenia się skuteczność wprowadzonych zmian (punkt 15), co przeprowadza się w podobny sposób jak w punkcie 10. Jeżeli wciąż nie osiągnięto wymaganych rezultatów, należy powrócić do punktu 12. Działania od 12 do 15 powtarza się cyklicznie, aż do zadowalającego udoskonalenia konstrukcji. Natomiast, jeśli zmiany okazały się skuteczne, można wstępnie zaakceptować projekt (punkt 17).

W związku ze wstępnym zaakceptowaniem projektu (poprzedzonym badaniami prototypu), projektant dysponuje już częściowo zweryfikowanym rozwiązaniem technicznym. Powinno się wówczas rozważyć przygotowanie wniosków patentowych (punkt 18). Mogą one dotyczyć całego opracowanego obiektu lub pewnych jego części lub podzespołów. Działanie takie ma uzasadnienie, gdy wprowadzone zostają niespotykane dotąd rozwiązania konstrukcyjne.

Przygotowanie dokumentacji wytwórczej (technologicznej, punkt 19) ma na celu umożliwienie prawidłowego (tj. zgodnego z wytycznymi konstruktora) wytworzenia poszczególnych części i montażu całego obiektu.

Przygotowanie dokumentacji eksploatacyjnej (punkt 20) stanowi istotne działanie, ponieważ polega na sformułowaniu informacji niezbędnych do prowadzenia prawidłowej eksploatacji obiektu, m.in. zakresu jego zastosowania, czasu przeprowadzania przeglądów, konserwacji i profilaktycznej wymiany części, a także wymogów odnośnie do innych warunków eksploatacji. Podanie takich wytycznych jest obowiązkiem projektanta, ponieważ warunkuje właściwe prowadzenie eksploatacji. Nieprawidłowe wykorzystywanie obiektu uniemożliwia jego poprawne funkcjonowanie i w konsekwencji nie daje szans na zaspokojenie potrzeb jego odbiorcy.

W zależności od rodzaju przedsięwzięcia i przeznaczonych na ten cel środków, a także czasu do dyspozycji projektanta, można przeprowadzić badania eksploatacyjne serii informacyjnej projektowanego obiektu. Seria informacyjna obejmuje egzemplarze obiektów podlegające wykorzystaniu celem zaspokajania rzeczywistych potrzeb. Warunki eksploatacji tych egzemplarzy powinny być zbliżone do zakładanych warunków rzeczywistych, jednak jednocześnie egzemplarze te poddawane są intensywnym badaniom zgodnie z przyjętym programem (punkt 21). Czynności te mają na celu ujawnienie błędów konstrukcyjnych, których nie wychwycono w fazie badania prototypu. Wyniki badań serii informacyjnej umożliwiają dokonanie pierwszej oceny niezawodności eksploatacyjnej obiektów i ich części (punkt 22). Znajdują tu zastosowanie te same narzędzia (modele matematyczne), które zostały wskazane w punkcie 10. Ponadto, uzyskane dane powinny umożliwiać identyfikację słabych ogniw projektowanych obiektów, czyli ich elementów, charakteryzujących się niższą (w porównaniu z pozostałymi elementami) trwałością lub niezawodnością. Tego rodzaju analizy umożliwiają projektantowi skonfrontowanie przyjmowanych założeń i dotychczasowych ustaleń z rzeczywistością. Jednocześnie jest to etap procesu projektowego, gdy po raz ostatni istnieje możliwość wprowadzenia poprawek przed ostatecznym zaakceptowaniem projektu.

Stwierdzenie, czy seria informacyjna spełnia wymagania (punkt 23) prowadzi do jednego z dwóch możliwych wniosków.

Jeżeli ocena wypada negatywnie, należy rozważyć powrót do wcześniejszych etapów procesu projektowego. W szczególności możliwy jest powrót do punktu 12 (konieczne zmiany i ponowne badania prototypu) albo do punktu 16 – w sytuacji wprowadzania niewielkich zmian w konstrukcji obiektu.

Jeżeli ocena wypada pozytywnie, należy zaplanować zbieranie danych eksploatacyjnych na temat serii handlowej (w przyszłości, po jej wytworzeniu, punkt 24). Jest to

planowanie przyszłych działań, które będą miały miejsce już po zaakceptowaniu i wdrożeniu projektu. Dane te są szczególnie cenne, ponieważ umożliwią dokonywanie oceny niezawodności i trwałości (punkt 25) obiektów, docierających do rzeczywistych odbiorców. Ma to szczególne znaczenie dla projektanta, gdyż dostarcza mu podstaw do dalszego doskonalenia (modernizacji [13], por. [2]) opracowanego rozwiązania w przyszłości. Należy się na to przygotować już w trakcie bieżącego procesu projektowego (punkt 26) odpowiednio archiwizując dokumentację i wyniki dotychczasowych badań, aby można było z łatwością z nich skorzystać.

Przeprowadzenie wszystkich wymienionych działań prowadzi do ostatecznej akceptacji projektu (punkt 27).

4. Podsumowanie

Zastosowanie przedstawionej metody ma na celu ułatwienie opracowania projektu obiektu mechanicznego. Powinno również przyspieszać osiągnięcie celu, ułatwiając uniknięcie błędów konstrukcyjnych. Jeżeli błędy te ujawnią się dopiero na etapie wytwarzania albo w czasie eksploatacji obiektu, to pociągną za sobą znaczne starty. Wykorzystanie opracowanej metody ma na celu ich eliminację na wczesnym etapie cyklu istnienia obiektu.

Uwzględnienie w procesie projektowania prowadzenia badań i świadomego kształtowania niezawodności projektowanego obiektu sprzyja prognozowaniu przebiegu jego przyszłej eksploatacji, formułowaniu wytycznych eksploatacyjnych oraz zapewnianiu bezpieczeństwa. Podobnie, proponowane kształtowanie trwałości obiektu ułatwia racjonalne wykorzystanie dostępnych zasobów materiałowych i energetycznych oraz umożliwia opracowywanie strategii odnowy profilaktycznej.

Opracowując przedstawioną metodę projektowo-badawczą skorzystano z wieloletnich doświadczeń autorów metod LEMACH, ponieważ zaproponowane rozwiązanie jest rozwinięciem metody LEMACH 6. Nowa metoda stanowi uniwersalne narzędzie, które w przyszłości może zostać dostosowane do potrzeb związanych z projektowaniem obiektów mechanicznych określonej klasy.

Podziękowanie

Pracę wykonano w ramach badań prowadzonych w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, nr umowy – subwencja 16.16.130.942.

5. Literatura

1. Canelas A., Carrasco M., Lopez J.: A new method for reliability analysis and reliability-based design optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 59, 2019.
2. Dietrych J.: *System i konstrukcja*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985.
3. Gasparski W.W.: *Designology: Toward a Unified Science on Design Revisited* [w] Gasparski W.W., Orel T. [red.]: *Designology Studies on Planning for Action*. Transaction Publishers, New Brunswick 2014.
4. Heinrich M., Lenkiewicz W.: Erhöhung und Auswertung des Zuverlässigkeitsniveaus von tribologischen Paarungen im Zeitraum der Anfangsnutzung eines einzelnen Objekts. *Tribologie und Schmierungstechnik*, 3, 2002.
5. Kuraś Ł.M.: *Koncepcja procesu projektowo-badawczego wybranych sprzęgieł ciernych w aspekcie zapewnienia ich niezawodności* [Praca inżynierska]. AGH w Krakowie, Kraków 2020.
6. Lenkiewicz W., Machowski B.: *Materiały seminarium Szkoła Metodologii Konstruowania Maszyn, część III*. Społeczny Ośrodek Badań i Studiów, Rydzyna 1982.
7. Lenkiewicz W., Szybka J.F. [red.]: *Problemy badawcze w eksploatacji wybranych obiektów technicznych*. Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, Warszawa 2010.
8. Miller D.: *Projektowanie metodyczne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987.
9. Młynarski S., Pilch R., Smolnik M., Szybka J., Wiązania G.: *Methodology of network systems reliability assessment on the example of urban transport*. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, vol. 20 (2), 2018.
10. Moss T.R.: *The Reliability Data Handbook*. Professional Engineering Publishing Limited, London and Bury St Edmunds 2005.
11. O'Halloran B.M., Hoyle C., Tumer I.Y., Stone R.B.: *The early design reliability prediction method*. *Research in Engineering Design*, 30, 2019.
12. Smolnik M.: *A conception of modernising LEMACH designing methods using TRIZ instruments* [w] Souchkov V., Kässi T. [red.]: *TRIZfest-2014 theories and applications the 10th international conference September 4–6, 2014, Prague, Czech Republic: conference proceedings*. International TRIZ Association – MATRIZ, Knoxville 2014.
13. Smolnik M.: *A Praxiological Model of Machines Modernisation Process*. *Journal of Machine Construction and Maintenance, Problemy Eksploatacji*, 3 (106), 2017.
14. Tobias P.A., Trindade D.C.: *Applied Reliability*. Third Edition. CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton 2012.
15. Xia Q., Wang Z., Ren Y., Sun B., Yang D., Feng Q.: *A reliability design method for a lithium-ion battery pack considering the thermal disequilibrium in electric vehicles*. *Journal of Power Sources*, vol. 386, 2018.