НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Сергієнко Сергій Анатолійович

УДК 629.7: 539.3: 621.313

ДИСЕРТАЦІЯ

СТВОРЕННЯ МЕТОДІВ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ, ПРОЄКТУВАННЯ, РОЗРАХУНКУ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ КОНСТРУКЦІЙ У ВИРОБНИЦТВІ ВЕЛИКИХ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка

13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ С.А. Сергієнко

Науковий керівник Третяк Олексій Володимирович, д.т.н., доцент

Харків – 2026

АНОТАЦІЯ

Сергієнко С.А. Створення методів тривимірного моделювання, проєктування, розрахунку та впровадження багатокомпонентних конструкцій у виробництві великих машин постійного струму – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка (галузь знань 13 Механічна інженерія). – Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, 2026.

Дисертаційну роботу присвячено створенню методів тривимірного моделювання та проєктування багатокомпонентних конструкцій у виробництві великих машин постійного струму (ВМПС) для вирішення актуальних питань щодо підвищення надійності їх конструкції та забезпечення гнучкості виробництва. Було виконано розрахунок розподілу напружень та деформацій в межах станини ВМПС для визначення критичних навантажень, пов’язаних з особливостями виконання технологічних операцій. Розглянуто проєктування та розрахунок напружено-деформованого стану корпусних частин ВМПС під час виготовлення та експлуатації. При цьому вперше враховано як класичні електромагнітні сили, так і зусилля при виконанні технологічних операцій, необхідних для механічної обробки та складання таких об’єктів, а також в процесі транспортування. В частині визначення механічних напружень було встановлено, що запаси міцності спроєктованої конструкції дозволяють забезпечити міцність елементів станини під час виготовлення ВМПС та безпечну роботу під час експлуатації без обмежень за навантаженнями та режимами роботи.

Тривимірний аналіз напружено-деформованого стану конструкції при виконанні технологічних операцій, а саме нахилу, підйому та переміщення станини ВМПС без полюсів і з полюсами, показав, що значення механічних напружень та деформацій, які виникають у з’єднаннях станини базового виконання, перевищують допустимі межі, що призводить до значної деформації

конструкції. У роботі спроєктована конструкцію станини з додатковими ребрами жорсткості та виконані розрахунки напружено-деформованого стану вузла. Проведений аналіз посиленої конструкції показав, що при виконанні технологічних операцій механічні напруження, які виникають, не перевищують допустимих, а всі деформації знаходяться в пружній зоні для використаного матеріалу.

Додатково розглянуті питання випробувань електричних машин з урахуванням впроваджених сучасних європейських стандартів, що вимагають оновлення існуючих методів випробувань електричних машин та засобів випробувань.

Метою дисертаційної роботи є розробка методів дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкції ВМПС, зокрема станини, у тривимірній постановці із використанням методу скінченних елементів, застосування яких дозволить досягти зменшення залишкових напружень станини у процесі її виробництва.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячений системному огляду конструкцій великих машин постійного струму та проблем виробництва їх компонентів. Розглянуті особливості конструкції великої машини постійного струму, прийнятої для подальших розрахунків. Проведений аналіз сучасних методів визначення навантажень на конструкцію. Визначені силові фактори, що впливають на напружено-деформований стан конструктивних елементів електричної машини при виконанні технологічних операцій стропування, кантування та перенесення. Проведений аналіз такого фізичного явища, як залишкові напруження, встановлені причини виникнення та визначені методи їх зниження.

У другому розділі виконана розробка удосконаленого методу визначення напружено-деформованого стану елементів конструкції ВМПС у тривимірній постановці із використанням методу скінченних елементів з урахуванням всіх діючих при експлуатації та виготовленні силових факторів. Представлені результати розрахунку напружено-деформованого стану станини великої

машини постійного струму у тривимірній постановці з використанням методу скінченних елементів. Визначений розподіл напружень та деформацій базової та модернізованих конструкцій станини. На основі обчислень підтверджена ефективність конструкції станини з двома поясами кріплень для зниження залишкових напружень при її підйомі та кантуванні.

У третьому розділі проведена верифікація результатів дослідження НДС модернізованої станини методом Hot Spot Stress (HSS) у постановці лінійної поверхневої екстраполяції (LSE) та методом збіжності за розміром елементів розрахункової сітки. Результати перевірки збіжності результатів засвідчують високу точність методики розрахунку НДС станини. Значення напружень та переміщень в критичних зонах задовольняють вимогам щодо допустимих рівнів для вибраного матеріалу конструкції у всіх розглянутих випадках навантажень як при роботі електродвигуна, так і в процесі виконання технологічних операцій з підйому та кантування станини.

У четвертому розділі представлені методи випробувань електричних машин, що використовуються для підтвердження достовірності розроблених методів визначення напружено-деформованого стану. Розглянуті основні види випробувань електричних машин постійного струму, переглянуті за результатами приведення бази використовуваних в Україні стандартів до сучасних європейських норм. Окремо представлені методи контролю та налаштування комутаційних процесів в машинах постійного струму, що є одним з ключових питань, які потрібно вирішити для забезпечення надійної довготривалої експлуатації подібного електромашинного обладнання.

Результатом проведених досліджень стали розроблені ефективні методи моделювання напружено-деформованого стану вузлів та елементів конструкцій великих машин постійного струму, зокрема станини, протягом усього циклу їх виробництва та експлуатації.

Використання методів досліджень в тривимірній постановці дозволяє визначити напруження конструктивних елементів, які раніше неможливо було оцінити існуючими методами спрощених аналітичних розрахунків, що відкриває

широкі перспективи для забезпечення належної механічної міцності ВМПС як під час виготовлення, так і при експлуатації, що сприятиме підвищенню надійності цього електромашинного обладнання, що використовується якості електропривода в багатьох галузях промисловості України.

Представлена дослідна робота надає науково обґрунтований метод зменшення залишкових напружень в станині ВМПС у процесі її виробництва, що дає можливість оптимізації конструкції нових електричних машин постійного струму та надає гнучкість процесам виробництва електромашинного обладнання.

Результати дисертаційної роботи використано на ТОВ "ХЕМЗ" (м. Харків) при проєктуванні нових та реконструкції існуючих великих машин постійного струму. Окрім цього, результати роботи впроваджено у науково-методичних процесах кафедри аерогідродинаміки Національного аерокосмічного університету "Харківський авіаційний інститут".

Наступним кроком дослідження стане створення методів та алгоритмів розрахунку напружено-деформованого стану активних частин ВМПС нового покоління. Розвиток дослідження у цьому напрямку дозволить підвищити надійність конструктивних елементів машин та забезпечити ефективне використання потужностей виробництва.

Наукова новизна роботи:

1. Вперше створений новий метод розрахунку напружено-деформованого стану станини великої машини постійного струму, що на відміну від існуючих дозволяє враховувати технологічні та основні силові фактори у тривимірній постановці.

2. Удосконалено алгоритм завдання граничних умов для тривимірних моделей конструктивних компонентів електричних машин у частині детального опису навантажень в різні моменти циклу виробництва та експлуатації.

3. Удосконалено алгоритм та методику проведення випробувань електричних машин в частині їх відповідності вимогам впроваджених сучасних європейських стандартів.

4. Набули подальшого розвитку існуючі інженерні методи визначення напружено-деформованого стану на основі класичної теорії міцності в частині удосконалення точності розподілу напружень на основі математичного моделювання конструкції з врахуванням тривимірного розподілу технологічних та основних силових факторів.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблений метод визначення напружено-деформованого стану станини ВМПС з урахуванням навантажень, що виникають при технологічних операціях в процесі виготовлення, та під час експлуатації готового виробу, дозволяє підтвердити працездатність конструкції корпусів не тільки для основних режимів роботи, а також для технологічних операцій (підйом, кантування).

2. На основі розробленого методу обґрунтовано створення додаткових ребер жорсткості, що забезпечує посилення конструкції станини ВМПС для запобігання недопустимих деформацій під час технологічних операцій.

3. Розроблені рекомендації щодо проведення випробувань електричних машин постійного струму, що базуються на впроваджених сучасних європейських стандартах.

Розроблені в роботі методи тривимірного розрахунку розподілу напружень можуть бути використані при дослідженні напружено-деформованого стану іншого електромашинного обладнання.

Отримані наукові результати можуть бути використані організаціями, які спеціалізуються в області досліджень і експлуатації електромашинного обладнання, конструкторськими бюро, науково-дослідними та проєктними організаціями, аерокосмічними університетами та іншими організаціями,що спеціалізуються в галузі експлуатації та досліджень електромашинного обладнання.

Ключові слова: електромашинне обладнання, машина постійного струму, станина, напружено-деформований стан, метод скінченних елементів, механічні напруження, міцність, кантування, стропування.

ABSTRACT

Serhiienko S. Creation of methods for three-dimensional modeling, design, calculation and implementation of multi-component structures in the production of large DC machines. – A qualifying scientific work as a manuscript.

The thesis for a degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 134 Aerospace Engineering (13 Mechanical Engineering). – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, 2026.

The dissertation work is purposed to the creation of methods for three-dimensional modeling and design of multi-component structures in production of large direct current machines (LDCMs) to solve urgent issues of increasing the reliability of their design and ensuring flexibility of production. The distribution of stresses and deformations within the LDCM frame was calculated to determine critical loads associated with the specifics of the performance of technological operations. The design and calculation of the stressed-strained state of the LDCM body parts during manufacturing and operation were considered. At the same time, both classical electromagnetic forces and efforts during the performance of technological operations necessary for mechanical processing and assembly of such objects, as well as during transportation, were taken into account for the first time. In terms of determining mechanical stresses, it was established that the safety margins of the designed structure allow ensuring the strength of the frame elements during the manufacture of LDCMs and safe operation during operation without restrictions on loads and operating modes.

Three-dimensional analysis of the stressed-strained state of the structure during technological operations, namely tilting, lifting and moving the frame of the LDCMs without poles and with poles, showed that the values of mechanical stresses and deformations that arise in the joints of the basic version of the frame exceed the permissible limits, which leads to significant deformation of the structure. The work designed the structure of the frame with additional stiffening ribs and performed calculations of the stressed-strained state of the unit. The analysis of the reinforced structure showed that during technological operations, the mechanical stresses that arise do not exceed the permissible ones, and all deformations are in the elastic zone for

the used material.

Additionally, issues of testing of electrical machines are considered, taking into account the implemented modern European standards that require updating of existing testing methods for electrical machines and test equipment.

The purpose of the dissertation is to develop methods for studying the stressed-strained state of the structural elements of the LDCMs, in particular of the frame, in a three-dimensional setting using the finite element method, the application of which shall allow reducing the residual stresses of the frame during its production.

The first section of the dissertation is purposed to a systematic review of the designs of large DC machines and the problems of manufacturing of their components. The design features of a large DC machine adopted for further calculations are considered. An analysis of modern methods for determining loads on the structure is carried out. The force factors that affect the stressed-strained state of the structural elements of an electric machine when performing technological operations of slinging, tilting and transferring are determined. An analysis of such a physical phenomenon as residual stresses is carried out, the causes of their occurrence are established and methods for their reduction are determined.

In the second section, an improved method for determining the stressed-strained state of the structural elements of the LDCMs in a three-dimensional formulation using the finite element method, taking into account all force factors acting during operation and manufacture, is developed. The results of calculating the stressed-strained state of a large DC machine frame in a three-dimensional formulation using the finite element method are presented. The distribution of stresses and deformations of the basic and modernized frame structures is determined. Based on the calculations, the effectiveness of the frame design with two fastening belts to reduce residual stresses during its lifting and tilting is confirmed.

In the third section, the results of the study of the SSS of the modernized frame are verified by the Hot Spot Stress (HSS) method in the linear surface extrapolation (LSE) formulation and the method of convergence by the size of the elements of the calculation grid. The results of the results convergence test indicate the high accuracy

of the method for calculating the SSS of the frame. The values of stresses and displacements in critical zones satisfy the requirements for permissible levels for the selected structural material in all considered load cases both during the operation of the electric motor and during the performance of technological operations for lifting and tilting of the frame.

The fourth section presents the methods of testing of electrical machines used to confirm the reliability of the developed methods for determining the stressed-strained state. The main types of tests of DC electric machines are considered, revised based on the results of bringing the base of standards used in Ukraine to modern European standards. Separately, methods of control and adjustment of switching processes in DC machines are presented, which is one of the key issues that need to be resolved to ensure reliable long-term operation of such electrical machine equipment.

The result of the carried out researches is the development of effective methods for modeling the stressed-strained state of assemblies and structural elements of large DC machines, in particular of the frame, throughout the entire cycle of their production and operation which were put in to practice.

The use of research methods in three-dimensional formulation allows determining the stresses of structural elements that were previously impossible to estimate using existing methods of simplified analytical calculations, which opens up broad prospects for ensuring the proper mechanical strength of the LDCMs both during manufacture and operation, which will contribute to increasing the reliability of this electrical mechanical equipment used as an electric drive in many industries in Ukraine.

The presented research work provides a scientifically substantiated method for reducing residual stresses in the frame of a LDCM during its production, which makes it possible to optimize the design of new DC electric machines and provides flexibility to the production processes of electrical machinery equipment.

The results of the dissertation work were used at LLC "KHEMZ" (Kharkiv) in the design of new and reconstruction of existing large DC machines. In addition, the results of the work were implemented in the scientific and methodological processes of

the Department of Aerohydrodynamics of the National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute".

The next step of the research will be the creation of methods and algorithms for calculating the stressed-strained state of the active parts of the new generation of LDCMs. The development of research in this direction will allow to increase the reliability of the structural elements of the machines and ensure the efficient use of production capacities.

Scientific novelty of the work:

1. A new method for calculating of the stressed-strained state of a large DC machine frame has been created for the first time, which, unlike existing ones, allows taking into account technological and basic force factors in a three-dimensional formulation.

2. The algorithm for setting boundary conditions for three-dimensional models of structural components of electrical machines has been improved in terms of a detailed description of loads at different moments of the production and operation cycle.

3. The algorithm and methodology for testing of electric machines have been improved in terms of their compliance with the requirements of the implemented modern European standards.

4. Existing engineering methods for determining the stressed-strained state based on classical strength theory have been further developed in terms of improving the accuracy of stress distribution based on mathematical modeling of the structure, taking into account the three-dimensional distribution of technological and basic force factors.

Practical significance of the obtained results:

1. The developed method for determining the stressed-strained state of the LDCMs frame, taking into account the loads that arise during technological operations during the manufacturing process and during the operation of the finished product, allows confirming the operability of the housing design not only for the main operating modes, but also for technological operations (lifting, turning over).

2. Based on the developed method, the creation of additional stiffeners was justified, which provides reinforcement of the structure of the LDCMs frame to prevent unacceptable deformations during technological operations.

3. Recommendations have been developed for testing of DC electric machines, based on the implemented modern European standards.

The methods developed in the work for three-dimensional calculation of stress distribution can be used in the study of the stressed-strained state of other electrical mechanical equipment.

The obtained scientific results can be used by organizations specializing in the field of research and operation of electrical mechanical equipment, design bureaus, research and design organizations, aerospace universities and other organizations specializing in the field of operation and research of electrical mechanical equipment.

Keywords: electrical mechanical equipment, DC machine, frame, stressed-strained state, finite element method, mechanical stresses, strength, turning over, slinging.

Список публікацій здобувача

Статті у наукових фахових виданнях затверджених МОН України:

1. Tretiak, O., Kravchenko, S., Gakal, P., Shestak, B., **Serhiienko, S.**, & Nazarenko, V. (2025). Створення методу визначення запасів міцності елементів конструкцій бандажних вузлів турбогенераторів. Авіаційно-космічна техніка і технологія, 0 (4sup2), 149-159. https://doi.org/doi.org/10.32620/aktt.2025.4sup2.17 .

Статті у виданнях, що реферуються у базі даних Scopus:

1. Tretiak O, Arefieva M, Krytskyi D, Kravchenko S, Shestak B, Smakhtin S, Kovryga A, **Serhiienko S.** Features of Three-Dimensional Calculation of Gas Coolers of Turbogenerators. Computation. 2025; 13(8):192. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.3390/computation13080192 ;

2. Tretiak, O., Arefieva, M., Makarov, P., **Serhiienko, S.**, Zhukov A., Shulga I., Penkovska N., Kravchenko S., Kovryga A. "Study of Different Types of Ventilation and Cooling Systems of Bulb Hydrogenerators in a Three-Dimensional Setting", SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 18(3):2025. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.4271/05-18-03-0020 ;

3. Tretiak, O., Kravchenko, S., Mykhailychenko, O., Nazarenko, V., Smyk, S., Vasyliev, O., Arefieva, M., Tretiak, I., **Serhiienko, S.**, &Selevko, V. (2025). Devising a method for calculating the structure of efficient cooling systems for thrust bearings and guide bearings in hydrogenerators. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(1 (135), 38–50. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.329021 ;

4. Tretiak, O., **Serhiienko, S.**, Zhukov, A., Gakal, P., Don Y., Arefieva M., Tretiak I., Kravchenko S., Bohozhavets O.: "Peculiarities of the Design of Housing Parts of Large Direct Current Machines", SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 17(1):59-72, 2024. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.4271/05-17-01-0005 ;

5. Tretiak, O., Smyk, S., Kravchenko, S., Smakhtin, S., Brega, D., Zhukov, A., **Serhiienko, S.**, & Don, Y. (2024). Devising a calculation method for modern structures of current-conducting elements in large electric machines in a three-dimensional statement. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1 (130), 87–96, **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310049 ;

6. Tretiak, O., Kovryga, A., Kravchenko, S., Shpitalnyi, D., Zhukov, A., **Serhiienko, S.**, Arefieva, M., Penkovska, N., Madonych, A. (2024). Estimating the influence of the rigidity of support assemblies on the resonance phenomena and the vibration state of a hydraulic unit. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(7 (132), 53–64. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.316778 .

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. О.В. Третяк, С.С. Кравченко, П.Г. Гакал, Б.К. Шестак, **С.А. Сергієнко,** В.В. Назаренко. Аналіз напружено-деформованого стану бандажного вузла для оцінки можливості підвищення потужності турбогенератора. XXX - міжнародний конгрес двигунобудівників: – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2025 – 65 с. https://doi.org/10.32620/IPEC.25 ;

2. Tretiak O., Kravchenko S., Zhukov A., **Serhiienko S.**, Application of the finite element method to determine the limit geometric dimensions of the shaft journal of a synchronous electric motor: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. October 8-10, 2025. Seville, Spain. 149-154 p. URL: https://isu-conference.com/en/archive/the-integration-of-research-innovation-and-economy-08-10-25/ ;

3. Oleksii Tretiak, Viacheslav Nazarenko, **Serhii Serhiienko**, Anton Zhukov, New methods for calculating of cooling systems of direct current electric machines: Міжнародна науково-практична інтернет-конференція на тему «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (випуск 103), 14-15 жовтня 2025 р. http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-2321/ .

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. Третяк О.В., Арефьєва М.О., Кобзар І.В., Репетенко М.В., **Сергієнко С.А.**, Жуков А.Ю., Пеньковська Н.С., Селевко В.Б., Назаренко В.В. Методи та концепції розрахунку турбо- та гідрогенераторів у тривимірній постанові: монографія - Харків: КП «Міська друкарня», 2023 – 138 с.ISBN 978-617-619-284-8;

2. Третяк О.В., Макаров П.М., **Сергієнко С.А.,** Жуков А.Ю., Кравченко С.С. Патент на корисну модель № 156013, Україна, МПК H02K9/04 H02K1/20 H02K1/18. "Статор Електричної Машини", номер заявки u202306089, опубліковано 24 квітня 2024. https://iprop-ua.com/inv/kbxr8jpi/ ;

3. Третяк О.В., **Сергієнко С.А.,** Жуков А.Ю., Кравченко С.С., Шульга І.М., Арефьєва М.О., Третяк І.І. Патент на корисну модель № 158317, Україна, МПК H02K9/04 H02K9/08. "Система охолодження гідрогенератора капсульного типу", номер заявки u202401526, опубліковано 22.01.2025. https://iprop-ua.com/inv/6eupjyg4/ .

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ 19
ВСТУП 20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ КОНСТРУКЦІЙ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ І ПРОБЛЕМ ВИРОБНИЦТВА ЇХ КОМПОНЕНТІВ 31
1.1 Загальні відомості 31
1.2 Особливості машин постійного струму 33
1.2.1 Конструкція машини постійного струму 33
1.2.2 Умови використання машини 35
1.3 Особливості діючих на конструкцію навантажень 37
1.3.1 Робочі навантаження на станину, спричинені електромагнітними силами 38
1.3.2 Напружено-деформований стан станини під час виготовлення. 39
1.3.3 Стропування, кантування та перенесення 40
1.4 Залишкові напруження 42
1.4.1 Причини виникнення залишкових напружень 42
1.4.2 Методи зниження залишкових напружень 46
1.4.3 Обчислювальні методи розрахунку механічних напружень 47
1.5 Висновки до першого розділу 48
1.6 Література до першого розділу 49
РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАНИНИ 54
2.1 Моделювання фізичних процесів в тривимірній постановці 54
2.2 Метод скінченних елементів 55
2.2.1 Основні концепції методу 57
2.2.2 Оператори збирання та розсіювання 63

2.2.3 Геометричні похибки межі 64

2.2.4 Етапи аналізу та їх невизначеності 65

2.3 Постановка задачі тривимірного розрахунку станини 71

2.3.1 Початкові та граничні умови 73

2.3.2 Розрахункова сітка 74

2.4 Тривимірний розрахунок базової конструкції станини 75

2.5 Тривимірний розрахунок станини з одним поясом кріплення 78

2.6 Тривимірний розрахунок станини з двома поясами кріплення 80

2.7 Висновки до другого розділу 86

2.8 Література до другого розділу 87

РОЗДІЛ 3 ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ 89

3.1 Аналіз результатів дослідження НДС елементів конструкції HSS-методом 89

3.1.1 Методика оцінки збіжності визначених механічних напружень HSS-методом 90

3.1.2 Перевірка збіжності механічних напружень в модернізованій станині HSS-методом 91

3.1.3 Уточнені запаси міцності елементів конструкції станини 97

3.2 Аналіз результатів дослідження НДС елементів конструкції методом збіжності за розміром елементів розрахункової сітки 98

3.3 Висновки до третього розділу 103

3.4 Література до третього розділу 103

РОЗДІЛ 4 ВПРОВАДЖЕННЯ ТА СТВОРЕННЯ МЕТОДІВ ВИПРОБУВАНЬ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ 105

4.1 Загальні вимоги до умов, забезпечення і проведення випробувань 107

4.1.1 Умови пред'явлення електричної машини на випробування.... 107

4.1.2 Вимоги до умов та засобів проведення випробувань 108

4.1.3 Похибки вимірювання..... 110

4.2 Випробування машин постійного струму 112

4.2.1 Перевірка стану обмоток і колектора до початку випробувань 113

4.2.2 Перевірка якості складання машини та встановлення щіток у нейтральне положення 115

4.2.3 Вимірювання опору обмоток постійному струму..... 117

4.2.4 Вимірювання опору ізоляції, випробування електричної міцності ізоляції обмоток..... 119

4.2.5 Перевірка працездатності термоперетворювачів опору..... 121

4.2.6 Визначення характеристики холостого ходу..... 122

4.2.7 Визначення характеристик електричної машини..... 123

4.2.8 Випробування на нагрівання 124

4.2.9 Визначення витрати повітря..... 127

4.2.10 Вимірювання рівню вібрації..... 128

4.3 Налаштування комутації..... 129

4.3.1 Фізичні процеси у вузлах струмознімання 129

4.3.2 Оцінка комутації електричних машин постійного струму 132

4.3.3 Визначення зони роботи без іскріння..... 135

4.3.4 Розподіл струму між паралельно працюючими щітками..... 137

4.4 Висновки до четвертого розділу 138

4.5 Література до четвертого розділу 139

ВИСНОВКИ 141

ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ..... 143

ДОДАТОК Б АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ 146
ДОДАТОК В АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ 148

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

Умовні позначення та символи

σ – механічна напруга, МПа

h – товщина елементу, мм

Δ – похибка вимірювання, %

I – струм, А

U – напруга, кВ

R – електричний опір, Ом

α – температурний коефіцієнт матеріалу, 1/К

t –температура, К

n – частота обертання, об/хв

Індекси

$U_{\text{н}}$ – номінальна напруга, В;

$n_{\text{н}}$ – номінальна частота обертання, об/хв;

ΔI – додатковий струм, А

Скорочення

ВМПС – велика машина постійного струму

МСЕ – метод скінченних елементів

НДС – напружено-деформований стан

МРС – магніторушійна сила

ЕРС – електрорушійна сила

ВСТУП

Актуальність досліджень. Електричні машини постійного струму мають достатньо широке використання в різних технічних галузях завдяки своїм властивостям, що можуть вигідно відрізняти їх від машин змінного струму незважаючи на дещо складнішу конструкцію. Зокрема однією з основних переваг електричних двигунів постійного струму є можливість поступового регулювання швидкості обертання валу в широкому діапазоні електричними способами. Завдяки цьому продовжується використання електричних двигунів постійного струму в якості електроприводу, навіть незважаючи на широке впровадження в останній час регульованого електроприводу на основі машин змінного струму з використанням частотно-перетворювальної техніки.

Створення електричних машин постійного струму на всіх його етапах від проєктування до виготовлення та випробувань пов’язане з необхідністю врахування різноманітних факторів, що можуть вплинути на її властивості та спричинити зниження надійності машини. Одним з таких факторів є те, що при виготовленні металевих конструкцій електричних машин під впливом різних технологічних операцій, що викликають зміни в металі, виникають залишкові напруження. У деяких випадках залишкові напруження створюються навмисно для поліпшення якісних характеристик виробу, але в ряді випадків, наприклад при литті або зварюванні, внутрішні напруження, що виникають, навпаки, знижують стабільність виробу. В цьому випадку протягом часу через перерозподіл та релаксацію залишкових напружень втрачається стабільність геометричних розмірів деталей. Нерівномірність протікання у металі цього процесу порушує рівноважний стан, викликаючи деформацію деталі з суттєвим зміненням її геометричної форми.

Від рівня залишкових напружень значною мірою залежать стабільність геометричної форми та розмірів готової продукції, міцність та довговічність елементів машин під час експлуатації. Деформації можуть призвести до порушення взаємного розташування вузлів машини, в тому числі розрахункових

зазорів між елементами, з відповідним погіршенням роботи машини або навіть до аварії внаслідок заклинювання або зіткнення обертових частин зі нерухомими.

Для зниження рівня залишкових напружень в машинобудуванні найчастіше використовуються традиційні технологічні процеси – низькотемпературне відпалювання та природне старіння. Але в деяких випадках традиційні методи зниження рівня залишкових напружень виявляються недостатньо ефективними.

В такому разі для вирішення цих питань можуть бути використані сучасні методики розрахунків, які дозволяють вирішувати складні завдання з аналізу напружено-деформованого стану елементів конструкції електричних машин з урахуванням різноманітних факторів, в тому числі наявних залишкових напружень. Використання таких методів дозволяє ще на етапі проєктування визначити критичні зони конструкції, що потребують коригування з метою запобігання появі залишкових напружень та деформацій.

Подібні сучасні методики розрахунків на основі методу скінченних елементів також можуть використовуватись практично на всіх етапах проєктування електричної машини. Зокрема виконання електромагнітного розрахунку електричної машини дозволяє отримати точний розподіл електромагнітних навантажень між окремими елементами машини з визначенням потенційно небезпечних зон з точки зору нагрівання. Використання тривимірних підходів для теплових та вентиляційних розрахунків дозволяє більш точно враховувати розподіл температури по об’єму машини, виходячи з основних і додаткових втрат, що виділяються в її окремих елементах. В сукупності це все дає змогу виконати оптимізацію машини зі зниженням її питомої ваги, що є вкрай необхідним для створення конкурентоспроможної продукції.

Враховуючи широкий попит на великогабаритні машини постійного струму для гірничошахтного обладнання та металургійних верстатів, створення методики яка дозволить розраховувати нові проєктовані конструкції з

урахуванням навантажень при виготовленні, транспортуванні, монтажі та експлуатаціїє надзвичайно актуальним.

Мета і завдання дослідження. Розробка методів дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкції великих машин постійного струму, зокрема станини, у тривимірній постановці із використанням методу скінченних елементів, застосування яких дозволить досягти зменшення залишкових напружень станини у процесі її виробництва.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- провести системний огляд особливостей конструкції та роботи великих машин постійного струму та визначити силові фактори у тривимірній постановці;

- встановити причини виникнення залишкових напружень у конструктивних елементах електричних машин, що приводять до значних деформацій та викривлень форми;

- розробити удосконалений метод розрахунку граничних та початкових умов для тривимірної моделі станини ВМПС в частині детального опису конструкції з урахуванням всіх діючих при експлуатації та виготовленні силових факторів;

- отримати граничні умови для побудови просторової картини розподілу напружень у станині ВМПС під час виконання технологічних операцій, таких як стропування та кантування, визначити зони найбільшої концентрації залишкових напружень;

- розробити метод визначення напружено-деформованого стану елементів конструкції ВМПС у тривимірній постановці із використанням методу скінченних елементів;

- розробити нову конструкцію станини, що відрізняється від існуючої наявністю додаткових елементів жорсткості, що забезпечує необхідний запас міцності при виконанні технологічних операцій згідно з існуючими нормативними документами;

- підтвердити достовірність отриманих за допомогою розроблених методів результатів HSS-методом та методом збіжності розрахункової сітки;

- адаптувати існуючи методики випробувань електричних машин до вимог сучасних європейських стандартів для підтвердження працездатності конструкцій з більш ефективною геометрію.

Об'єкт дослідження – процеси деформування елементів конструкцій великих машин постійного струму протягом їх виробництва та при роботі в номінальних режимах.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан вузлів та елементів конструкції великих машин постійного струму, зокрема станини.

Для вирішення поставлених в дисертаційній роботі завдань використані наступні наукові **методи дослідження**:

1. Класичні методи і моделі теорії розрахунків напружено-деформованого стану конструкцій.

2. Дискретизація розв’язувальних співвідношень для аналізу напружено-деформованого стану досліджуваних тіл на основі метода скінченних елементів.

3. Числові дослідження, що здійснювалися у середовищі програмного комплексу SolidWorks Simulation, в якому створювалися тривимірні комп’ютерні моделі та проводилися розрахунки напружено-деформованого стану елементів.

4. Методи випробувань електричних машин, в тому числі методи випробувань ізоляції, зняття робочих характеристик, налаштовування комутації.

Точність отриманих в роботі результатів і висновків забезпечується математичним моделюванням без суттєвих спрощень та без використання умов симетрії.

Отримані результати математичного тривимірного моделювання напружено-деформованого стану вузлів та деталей ВМПС задовільно погоджуються з даними експериментальних і теоретичних досліджень інших авторів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше створений новий метод розрахунку напружено-деформованого стану станини великої машини постійного струму, що на відміну від існуючих дозволяє враховувати технологічні та основні силові фактори у тривимірній постановці.

2. Удосконалено алгоритм завдання граничних умов для тривимірних моделей конструктивних компонентів електричних машин у частині детального опису навантажень в різні моменти циклу виробництва та експлуатації.

3. Удосконалено алгоритм та методику проведення випробувань електричних машин в частині їх відповідності вимогам впроваджених сучасних європейських стандартів.

4. Набули подальшого розвитку існуючі інженерні методи визначення напружено-деформованого стану на основі класичної теорії міцності в частині удосконалення точності розподілу напружень на основі математичного моделювання конструкції з врахуванням тривимірного розподілу технологічних та основних силових факторів.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблений метод визначення напружено-деформованого стану станини ВМПС з урахуванням навантажень, що виникають при технологічних операціях в процесі виготовлення, та під час експлуатації готового виробу, дозволяє підтвердити працездатність конструкції корпусів не тільки для основних режимів роботи, а також для технологічних операцій (підйом, кантування).

2. На основі розробленого методу обґрунтовано створення додаткових ребер жорсткості, що забезпечує посилення конструкції станини ВМПС для запобігання недопустимих деформацій під час технологічних операцій.

3. Розроблені рекомендації щодо проведення випробувань електричних машин постійного струму, що базуються на впроваджених сучасних європейських стандартах.

Розроблені в роботі методи тривимірного розрахунку розподілу

напружень можуть бути використані при дослідженні напружено-деформованого стану іншого електромашинного обладнання.

Отримані наукові результати можуть бути використані можуть бути використані в аерокосмічній техніці в частині створення нових корпусів сотової конструкції з оптимальним розподілом механічних напружень, а також організаціями, які спеціалізуються в області досліджень і експлуатації електромашинного обладнання, конструкторськими бюро, науково-дослідними та проєктними організаціями, аерокосмічними університетами та іншими організаціями, що спеціалізуються в галузі експлуатації та досліджень електромашинного обладнання.

Впровадження результатів роботи. Розроблені автором наукові положення реалізовані:

- на ТОВ "ХЕМЗ" (м. Харків) при проєктуванні нових та реконструкції існуючих великих машин постійного струму;

- в науково-методичних процесах кафедри аерогідродинаміки Національного аерокосмічного університету "Харківський авіаційний інститут".

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, висновки і рекомендації, викладені в дисертації та представлені до захисту, виконані особисто автором. В дисертації відсутні результати, що належать співавторам, разом з якими опубліковані наукові праці.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися, обговорювались і отримали позитивну оцінку на: XXX - міжнародному конгресі двигунобудівників (Україна, м. Харків, Національний аерокосмічний університет «ХАІ», 2025 р.); науково-практичній конференції "1st International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity" (October 8-10, 2025. Seville, Spain) та Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції на тему «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (випуск 103, 14-15 жовтня 2025 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в одній статті в науковому фаховому виданні затвердженому МОН України [1], трьох статтях у

виданнях, що реферуються в базі даних Scopus [2-4]. Окрім цього, основні результати роботи опубліковані в трьох тезах науково-технічної конференції [5-7], в одній монографії [8] та в двох патентах [9, 10].

Всі положення наукової новизни дисертації отримані автором самостійно. В статтях, що опубліковані у співавторстві, проведення досліджень і аналіз результатів виконані автором особисто; формулювання задач і висновків виконано разом із науковим керівником і частково із співавторами публікацій; підготовка й видання науково-технічних статей виконано за участю співавторів. В спільних роботах автору належить:

[1] – Обчислення та завдання початкових та граничних умов міцнісного розрахунку в частині аналізу та розрахунку багатофакторних термонапружених чинників у тривимірній постановці;

[2] – впровадження комбінованого підходу розрахунку газоохолоджувачів турбогенератору, заснованого на аналітичних розрахунках та обчислювальній гідродинаміці, для детальної оцінки теплообміну між ребрами охолоджуючої труби і воднем;

[3] – створення тривимірних моделей корпусів гідрогенераторів з впровадженням нових конструктивних рішень побудови систем охолодження; формування математичної моделі радіальної та тангенціальної систем вентиляції;

[4] – підготовка розрахункової сітки скінченних елементів достатньої збіжності для деталей великих електричних машин з значними геометричними відмінностями за характерними розмірами;

[5] – аналіз напружено-деформованого стану станини КМПТ в тривимірній постановці з використанням методу скінченних елементів за допомогою програмного комплексу SolidWorks; створення нового методу розрахунку, що вперше враховує технологічні та конструктивні чинники у тривимірній постановці;

[6] – Обчислення тривимірних силових факторів, викликаних дією конструктивних навантажень. Створення методу завдання граничних умов для

контактних термонапружених задач з елементами різного модуля пружності;

[7] – визначення основних параметрів та аналіз існуючих європейських стандартів в частині випробувань та забезпечення необхідного контролю параметрів при тривимірних розрахунках великих електричних машин;

[8] – аналіз фізичних властивостей існуючих матеріалів, використаних в роторах генераторів великої потужності; обчислення фактичних меж плинності, текучості та модуля пружності в відповідності для розрахованих теплових режимах;

[9] – аналіз можливості використання різних типів сітки для міцнісного розрахунку елементів конструкції електричних машин;

[10] – створення конструкції, що складаються з системи ребер, що забезпечують роботу ефективних каналів для корпусів електричних машин з різним типом вентиляції, заснованих на введені додаткових нагнітальних компонентів, за умови виключення локацій з нульовими швидкостями повітря;

[11] – Створення методу розрахунку корпусних деталей крупних електричних машин з врахуванням специфічних факторів, позначених в європейських нормативних матеріалах, та ретельної проробки геометрії;

[12] – Обчислення міцності конструкції статору електричної машини;

[13] – Математичний аналіз ефективності використаних нововведень в конструкцію гідрогенератору в частині можливої роботи згідно з нормативними документами України та Європейських норм.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та списків використаних джерел до кожного розділу і загальних висновків. Загальний обсяг дисертації складає 147 сторінок, з них 123 сторінки основного тексту, 47 рисунків по тексту, 6 таблиць по тексту; списків використаних джерел до кожного розділу, сумарно викладених на 8 сторінках.

Література до вступу:

1. Tretiak, O., Kravchenko, S., Gakal, P., Shestak, B., **Serhiienko, S.**, & Nazarenko, V. (2025). Створення методу визначення запасів міцності елементів

конструкцій бандажних вузлів турбогенераторів. Авіаційно-космічна техніка і технологія, 0 (4sup2), 149-159. https://doi.org/doi.org/10.32620/aktt.2025.4sup2.17 ;

2. Tretiak O, Arefieva M, Krytskyi D, Kravchenko S, Shestak B, Smakhtin S, Kovryga A, **Serhiienko S.** Features of Three-Dimensional Calculation of Gas Coolers of Turbogenerators. Computation. 2025; 13(8):192. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.3390/computation13080192 ;

3. Tretiak, O., Arefieva, M., Makarov, P., **Serhiienko, S.**, Zhukov A., Shulga I., Penkovska N., Kravchenko S., Kovryga A. "Study of Different Types of Ventilation and Cooling Systems of Bulb Hydrogenerators in a Three-Dimensional Setting", SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 18(3):2025. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.4271/05-18-03-0020 ;

4. Tretiak, O., Kravchenko, S., Mykhailychenko, O., Nazarenko, V., Smyk, S., Vasyliev, O., Arefieva, M., Tretiak, I., **Serhiienko, S.**, &Selevko, V. (2025). Devising a method for calculating the structure of efficient cooling systems for thrust bearings and guide bearings in hydrogenerators. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(1 (135), 38–50. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.329021 ;

5. Tretiak, O., **Serhiienko, S.**, Zhukov, A., Gakal, P., Don Y., Arefieva M., Tretiak I., Kravchenko S., Bohozhavets O.: "Peculiarities of the Design of Housing Parts of Large Direct Current Machines", SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 17(1):59-72, 2024. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.4271/05-17-01-0005 ;

6. Tretiak, O., Smyk, S., Kravchenko, S., Smakhtin, S., Brega, D., Zhukov, A., **Serhiienko, S.**, & Don, Y. (2024). Devising a calculation method for modern structures of current-conducting elements in large electric machines in a three-dimensional statement. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1 (130), 87–96, **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310049 ;

7. Tretiak, O., Kovryga, A., Kravchenko, S., Shpitalnyi, D., Zhukov, A., **Serhiienko, S.**, Arefieva, M., Penkovska, N., Madonych, A. (2024). Estimating the influence of the rigidity of support assemblies on the resonance phenomena and the

vibration state of a hydraulic unit. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(7 (132), 53–64. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.316778 ;

8. О.В. Третяк, С.С. Кравченко, П.Г. Гакал, Б.К. Шестак, **С.А. Сергієнко,** В.В. Назаренко. Аналіз напружено-деформованого стану бандажного вузла для оцінки можливості підвищення потужності турбогенератора. XXX - міжнародний конгрес двигунобудівників: – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2025 – 65 с. https://doi.org/10.32620/IPEC.25 ;

9. Tretiak O., Kravchenko S., Zhukov A., **Serhiienko S.**, Application of the finite element method to determine the limit geometric dimensions of the shaft journal of a synchronous electric motor: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. October 8-10, 2025. Seville, Spain. 149-154 p. URL: https://isu-conference.com/en/archive/the-integration-of-research-innovation-and-economy-08-10-25/ ;

10. Oleksii Tretiak, Viacheslav Nazarenko, **Serhii Serhiienko**, Anton Zhukov, New methods for calculating of cooling systems of direct current electric machines: Міжнародна науково-практична інтернет-конференція на тему «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (випуск 103), 14-15 жовтня 2025 р. http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-2321/ ;

11. Третяк О.В., Арефьєва М.О., Кобзар І.В., Репетенко М.В., **Сергієнко С.А.**, Жуков А.Ю., Пеньковська Н.С., Селевко В.Б., Назаренко В.В. Методи та концепції розрахунку турбо- та гідрогенераторів у тривимірній постанові: монографія - Харків: КП «Міська друкарня», 2023 – 138 с.ISBN 978-617-619-284-8;

12. Третяк О.В., Макаров П.М., **Сергієнко С.А.,** Жуков А.Ю., Кравченко С.С. Патент на корисну модель № 156013, Україна, МПК H02K9/04 H02K1/20 H02K1/18. "Статор Електричної Машини", номер заявки u202306089, опубліковано 24 квітня 2024. https://iprop-ua.com/inv/kbxr8jpi/ ;

13. Третяк О.В., **Сергієнко С.А.,** Жуков А.Ю., Кравченко С.С., Шульга І.М., Арефьєва М.О., Третяк І.І. Патент на корисну модель № 158317, Україна, МПК H02K9/04 H02K9/08. "Система охолодження гідрогенератора капсульного типу", номер заявки u202401526, опубліковано 22.01.2025. https://iprop-ua.com/inv/6eupjyg4/ .

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ КОНСТРУКЦІЙ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ І ПРОБЛЕМ ВИРОБНИЦТВА ЇХ КОМПОНЕНТІВ

1.1 Загальні відомості

Електрична машина постійного струму (рис.1.1) – це електромеханічний пристрій для перетворення енергії. Існує два типи машин постійного струму:

- генератор постійного струму, що перетворює механічну потужність в електричну потужність постійного струму;

- двигун постійного струму, що перетворює електричну потужність постійного струму в механічну.

Принцип дії машин постійного струму (генераторів і двигунів) заснований на явищі електромагнітної індукції та явищі взаємодії провідника, по якому проходить струм, з магнітним полем. При цьому машини постійного струму мають також властивість реверсивності, тобто кожна машина може працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна.

Класична конструкція електричні машини постійного струму передбачає наявність наступних основних частин:

– якір (обертову частину машини, тобто ротор), до складу якого входять вал, магнітне осердя з розташованою в пазах обмоткою, а також колектор, призначений для зміни полярності струму (тобто фактично для випрямлення змінного струму) обмотки якоря під час обертання;

– станина (нерухома частина, або статор), що складається з замкненого кільцевого магнітопроводу, на внутрішньому діаметрі якого встановлені основні та додаткові полюси з обмотками;

– щітково-контактний апарат, необхідний для підключення обмотки якоря через колектор до зовнішніх електричних ланцюгів;

– необхідні конструктивні елементи, зокрема корпусні частини, підшипники, охолоджувачі (за наявності), та ін.

Детально принцип дії та конструкції електричних машин постійного струму розглянуто в роботі [1].

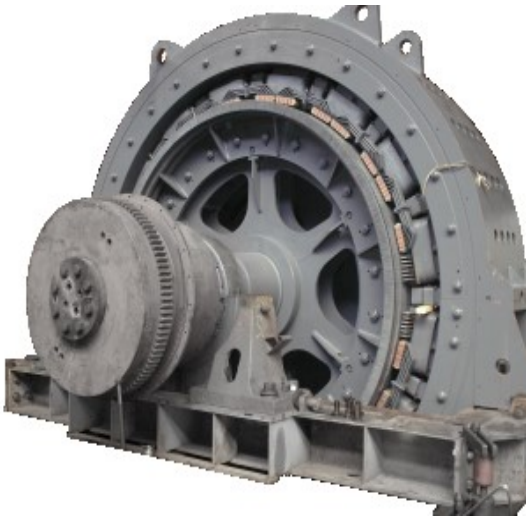


Рис. 1.1 – Загальний вид великої машини постійного струму

Основними перевагами електричних двигунів постійного струму є можливість поступового регулювання швидкості обертання вала електричними способами, широкий діапазон швидкостей та значний пусковий момент. Ці переваги зумовлюють можливість використання електричних двигунів постійного струму в якості електроприводу. Основними недоліками генераторів постійного струму є незадовільні масово-габаритні показники (великі габарити і вага) порівняно з генераторами змінного струму та наявність колектора, що ускладнює експлуатацію внаслідок можливого іскрінням. Вказані недоліки зумовлюють обмеженість застосування генераторів постійного струму [2].

В останні десятиліття зберігається тенденція оптимізації конструкції електричних машин з метою забезпечити мінімальну масу з граничною потужністю. Однак основні зусилля були спрямовані на зменшення маси гідрогенераторів та турбогенераторів як найбільш важких машин [3, 4, 5]. Більшість досліджень для машин постійного струму присвяченні оптимізації моделюванню агрегатів в залежності від їх напрямку використання, а саме вибору типу машини постійного струму, вибору оптимальної довжини активної частини [6]. Особлива увага приділяється тривимірному моделюванню

перехідних процесів, дослідженню робочих характеристик агрегатів та підвищенням показників надійності при експлуатації [7, 8].

Науковці приділяють велику увагу дослідженню несправностей машин постійного струму. Найбільше робіт у цьому напрямку присвячено таким несправностям під час роботи машин, як іскріння, перегрів, низькі/високі частоти вібрації, які здебільшого спричинені електромагнітними причинами [9, 10]. Як правило, одним з найбільш відповідальних вузлів є щітково-колекторний апарат. Щітки і колектор використовуються як комутаційна система, яка дозволяє працювати машині постійного струму, і тому вимагають особливої уваги, такої як моніторинг іскріння, температури та спеціальні процеси профілактичного обслуговування. Нині ведуться активні роботи зі створення систем моніторингу на основі штучного інтелекту з метою ефективного обслуговування машин постійного струму [11, 12]. Є роботи, присвячені методам моделювання та оптимізації виробництв з метою підвищення їх надійності та скорочення часу простою обладнання [13, 14]. Але, незважаючи на велику кількість робіт, присвячених машинам постійного струму, проблеми виробництва їх складальних вузлів, зокрема корпусних частин, майже не розглядаються.

1.2 Особливості машин постійного струму

Як і для інших типів електричних машин, конструкція машин постійного струму багато в чому визначається особливостями її призначення та умов використання.

Задля виконання поставлених задач та досягнення мети представленої роботи розглянемо конструкцію великої машини постійного струму, призначеної для електроприводу.

1.2.1 Конструкція машини постійного струму

Загальна конструкція великої машини постійного струму представлена на рис. 1.2. Як це біло зазначене вище, машина складається з двох основних частин:

нерухомої частини – статора, та обертової частини – якоря. Статор являє собою станину, на внутрішній поверхні якої закріплені осердя головних полюсів з полюсними котушками та додатковими полюсами.

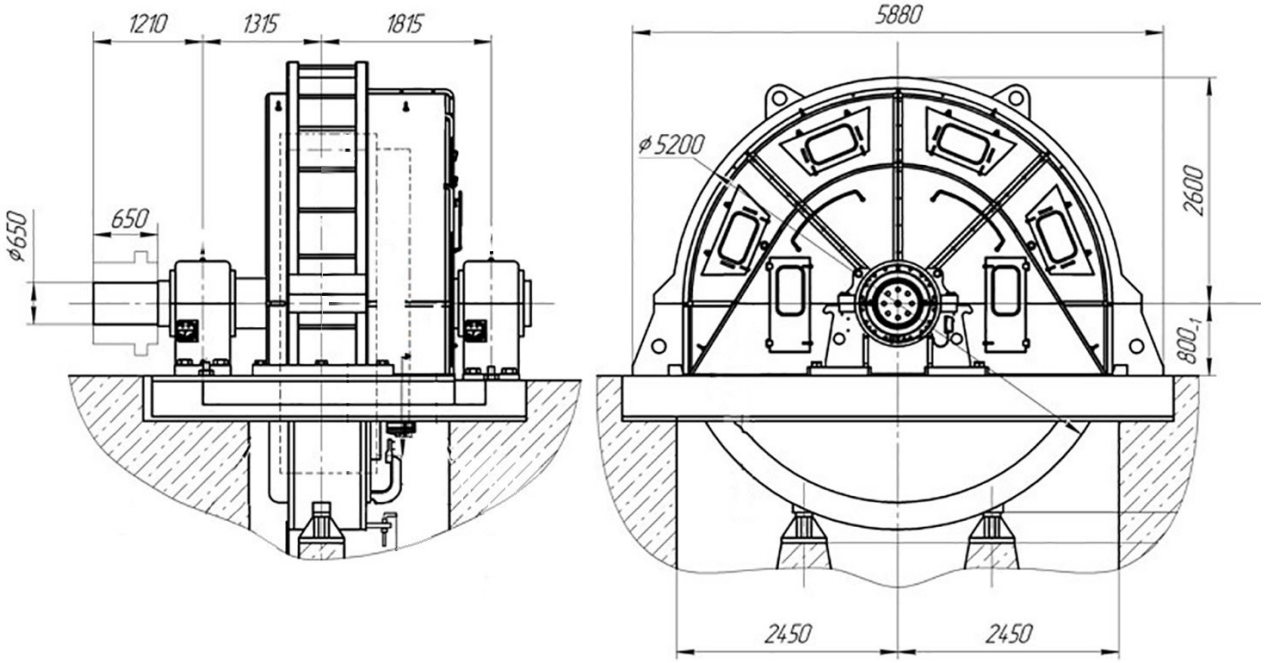


Рис. 1.2 – Конструкція ВМПС

Електродвигун виготовляється з одним робочим кінцем вала для з'єднання з механізмом підйомної машини. Кінець вала, протилежний робочому, має бути пристосований для кріплення до нього імпульсного датчика швидкості.

Використання подібних ВМПС у якості приводу різноманітних потужних механізмів у різних галузях промисловості диктує особливі вимоги до конструкції таких електричних машин. Зростання вимог до потужності приводу обумовлює необхідність покращення використання об’єму таких електродвигунів з наближенням до граничних значень електричних і механічних питомих навантажень.

Вимоги надійності призводять до необхідності застосування в конструкції ВМПС спеціальних рішень, що дозволяють витримувати всі проєктні навантаження. Наприклад в цих електричних машинах обов’язковою вимогою є наявність компенсаційної обмотки. Каркас двигуна для забезпечення необхідної

міцності зварений зі сталевого металопрокату та має роз'єм у горизонтальній площині.

В осерді якоря використовується конструкція з ізолюванням листів осердя шляхом нанесення на них лакового покриття. Крім того використовуються спеціальні рішення для забезпечення надійної ізоляції в натискній системи осердя якоря з метою запобігання утворенню короткозамкнених контурів, що можуть взаємодіяти з основним магнітним потоком машини.

Наявність вимоги реверсивності приводу призводить до необхідності використання в конструкції електродвигуна тангенціального розклинювання осердя якоря відносно втулки валу для забезпечення передачі великих обертових моментів при різних напрямках обертання.

В електродвигуні передбачена замкнута примусова система вентиляції. Подача охолоджуючого повітря відбувається знизу крізь щит з боку приводу, нагріте повітря виходить з боку колектора.

Якір обертається в підшипниках ковзання. Підшипник на кінці колектора ізольований від фундаментної плити, опір ізоляції підшипника відносно фундаментної плити повинен бути не менше 10^6 Ом.

1.2.2 Умови використання машини

Електродвигун призначений для важких умов роботи в режимах S1 та S8 згідно з ДСТУ IEC 60034-1:2019. Основним режимом розрахунку є режим S1, згідно з яким електродвигун маркується та випробовується.

Тривалість заданого робочого перевантаження не повинна перевищувати 15 секунд. У цьому випадку іскріння на колекторі не повинно впливати в майбутньому на довгострокову та безпечну експлуатацію. Тривалість перевантажень, значення яких нижче за максимальне робоче, не обмежується за умови, що середньоквадратичне значення струму протягом 10 хвилин роботи не перевищує номінальне значення.

Ступінь іскріння на колекторі електродвигуна не має перевищувати 1½ згідно з ДСТУ IEC 60034-1:2019. Обертання електродвигуна має бути

зворотним. Електродвигун повинен забезпечувати розгін та уповільнення стільки разів за зміну, скільки вимагає режим роботи механізму, за умови, що середньоквадратичне значення струму протягом 10 хвилин роботи не повинно перевищувати номінальне значення.

Електродвигун повинен допускати регулювання швидкості від нуля до номінальної шляхом зміни напруги на затискачах якоря.

При живленні обмотки якоря електродвигуна від тиристорних перетворювачів амплітудне значення змінної складової струму якоря не повинно перевищувати 4 % від номінального струму якоря при номінальній напрузі. При зниженні напруги якоря до 25 % від номінальної напруги допускається збільшення амплітудного значення змінної складової струму якоря до 7 %.

Струм збудження електродвигуна визначається на основі результатів стендових випробувань. Ізоляція корпусу обмотки збудження розрахована на максимальну напругу 1000 В. Ізоляція обмоток якоря двигуна повинна мати клас нагріву «H», обмотки збудження – клас нагріву «F» відповідно до ДСТУ IEC 60085:2015 [15].

Діелектрична міцність ізоляції всіх обмоток якоря електродвигуна розрахована на максимальну напругу 1500 В відносно корпусу (значення 1500 В – це випробувальна напруга для перевірки ізоляції на електричну міцність; справна ізоляція не повинна бути пошкоджена при цьому значенні). Опір ізоляції всіх обмоток двигуна відносно корпусу та між обмотками при робочій температурі повинен бути не менше 10^6 Ом.

Кліматичне виконання – УХЛ, категорія розміщення – 4. Номінальне значення кліматичних факторів згідно з ДСТУ 8280:2015 [16] та ДСТУ EN 60529:2018 [17], при температурі навколишнього середовища від +1 до +40 °С.

Навколишнє середовище має бути невибухонебезпечним, не містити провідного пилу в концентраціях, що знижують параметри електродвигуна до неприпустимих меж. Повітря, що надходить до електродвигуна, має бути чистим, не містити провідного пилу, їдких парів, що знижують міцність та довговічність ізоляції електродвигуна, вміст пилу в повітрі, що охолоджує

електродвигун, не має перевищувати 0,2 мг/м^3. Температура охолоджувального повітря повинна бути від +5 до 40°С.

Радіальні та осьові навантаження від механізму підйомної машини на кінець вала двигуна мають бути відсутніми.

Встановлений час безвідмовної роботи повинен бути не менше 24 000 годин (за умови виконання замовником усіх перевірок та ремонтів у терміни, зазначені в експлуатаційній документації). Встановлений ресурс до капітального ремонту має бути не менше 8 років. Повний експлуатаційний термін служби повинен бути не менше 25 років. Коефіцієнт готовності повинен бути не менше 0,995. Показники довговічності та надійності компонентів електродвигунів мають відповідати стандартам або технічним умовам на ці вироби.

Умовне позначення конструктивного виконання електродвигуна за способом складання – ІМ 7321 згідно з ДСТУ 2365-94.

Рівень шуму, виміряний на відстані 1 м від корпусу двигуна, в режимі холостого ходу, не повинен перевищувати 92 дБА згідно з ДСТУ EN 60034-9:2014 [18].

Контроль температури обмоток двигуна здійснюється методом опору (вимірювання після зупинки якоря) відповідно до ДСТУ EN 60034-2:2014 [19].

Зовнішній вигляд покриттів повинен відповідати вимогам ДСТУ Б В.2.6-76:2008 для шостого класу покриття. Захисні, декоративні та лакофарбові покриття мають бути виконані відповідно до ДСТУ ГОСТ 9.101:2004.

1.3 Особливості діючих на конструкцію навантажень

На конструкцію всіх частин електричної машини в різні етапи їх життєвого циклу діють різні типи навантажень:

- технологічні – при стропуванні, кантуванні та перенесенні (транспортуванні);

- експлуатаційні (робочі) навантаження, спричинені електромагнітними, відцентровими силами, крутними моментами на валу.

Необхідно звернути увагу, що параметри, отримані для якогось вузла електричної машини, що визначені як достатні за результатами механічного розрахунку від експлуатаційних навантажень, не завжди задовольняють вимогам до конструкції, що визначаються впливом на конструкцію технологічних факторів.

Розглянемо більш докладно це питання на прикладі такої частини електричної машини постійного струму, як станина.

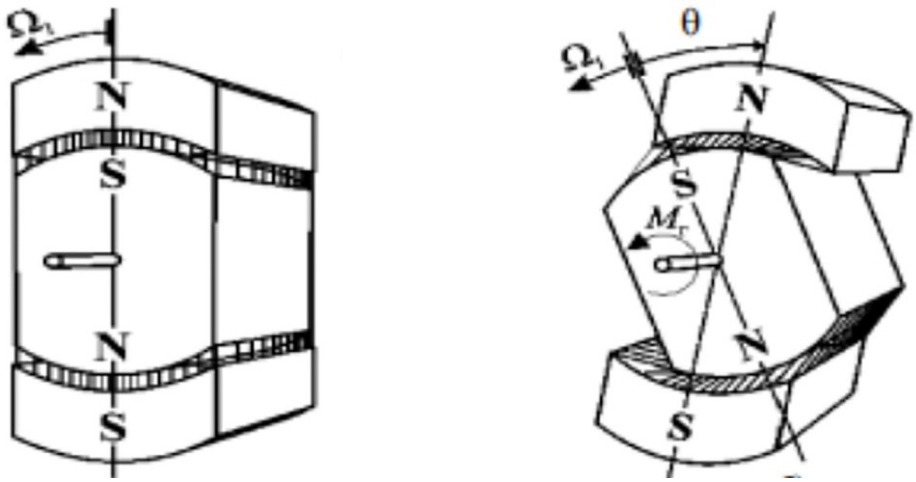
Станина є найбільш масивною частиною конструкції великих машин постійного струму, що забезпечує просторову жорсткість конструкції, точність позиціонування вузлів і сприйняття статичних і динамічних навантажень у процесі експлуатації. Вона є частиною магнітного ланцюга машини, до якої кріпляться головні і додаткові полюси. Станини статорів електричних машин виготовляють суцільнолитими, зварними або трубними зі сталі або чавуну. Для зменшення розмірів підшипникових щитів та підвищення їх жорсткості довжину станини збільшують у кілька разів. Збільшена частина станини убік підшипникових щитів може мати меншу товщину. Товщина станини визначається з електромагнітного розрахунку. Отримані розміри станини мають забезпечувати її достатню міцність і жорсткість під впливом різних факторів, це перевіряється шляхом виконання міцнісного розрахунку.

1.3.1 Робочі навантаження на станину, спричинені електромагнітними силами

У машинах постійного струму станина, крім того, що до неї прикріплюють головні та додаткові полюси, є частиною магнітопроводу. При цьому всі динамічні механічні навантаження сприймаються станиною, в тому числі від полюсів через елементи їх кріплення, а також власні, що діють вздовж діаметра корпусу.

При протіканні по обмотці якоря струму навантаження генератора створюється власне магнітне поле, що впливає на обмотки збудження. Вплив магнітного потоку якоря на поле обмотки збудження називають реакцією якоря

[20]. При обертанні цих двох потоків з однаковою частотою створюється результуючий магнітний потік, що обертається. Під дією потоку якоря цей результуючий потік зміщується щодо потоку на кут неузгодженості θ у бік відставання (рис. 1.3).



а) б)

Рис. 1.3 – Взаємодія магнітних потоків якоря та обмотки збудження:
а) холостий хід; б) під навантаженням.

Цей підсумковий магнітний потік створює значні зусилля на корпус (станину). Найбільш повний розрахунок зусиль у статиці та динаміці наведено у літературі [21].

1.3.2 Напружено-деформований стан станини під час виготовлення

У процесі кантування, стропування та транспортування важких деталей та конструкцій у матеріалі можуть виникати значні внутрішні напруження та деформації. Неправильне виконання даних операцій здатне призвести до залишкових напружень, пластичних деформацій, порушення геометрії, а в окремих випадках навіть до розвитку тріщин та руйнування конструкції.

У машинобудуванні переміщення великогабаритних та потужних елементів є невід'ємною частиною технологічного процесу. Кантування,

стропування та перенесення являють собою операції, при яких на елементи конструкції впливають складні механічні навантаження, що сприяють виникненню напружень різної природи. Розуміння впливу НДС у даних умовах необхідне задля забезпечення цілісності, геометричної точності та довговічності виробу [22].

1.3.3 Стропування, кантування та перенесення

На рис. 1.4 представлені різні види стропування і кантування важких великогабаритних деталей при їх технологічній обробці.

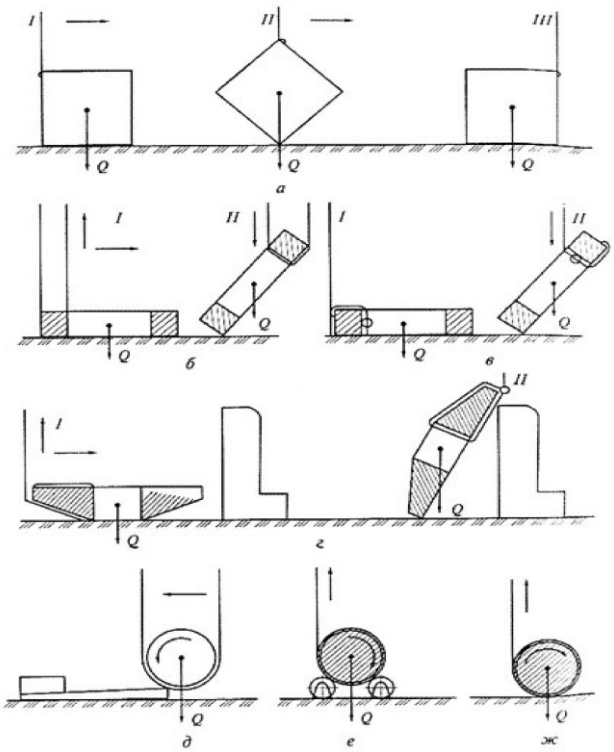


Рис. 1.4 – Види стропування та кантування важких деталей

Кантування – операція зі зміни просторового положення деталі (зазвичай обертання навколо осі), що супроводжується впливом згинальних і крутних моментів, а також сил інерції. При кантуванні великогабаритних деталей амплітуда вільного падіння може бути великою, отже, ривки можуть бути достатньо сильними. Ліквідувати їх майже неможливо, оскільки швидкість падіння вантажу набагато перевищує швидкість руху механізмів будь-якого

крана. Найбільші напруження локалізуються в зонах контакту з обладнанням для кантування, де можливі пластичні деформації, особливо при наявності гострих кромок, концентраторів напружень або недостатньої жорсткості конструкції. Вибір способу кантування залежить від маси та габаритів вантажу, його форми, наявності місць захоплення та можливостей кріплення до строп. Найбільш поширеними способами є кантування у висячому положенні, на упор та на кидок.

Стропування передбачає підвішування деталі з використанням стропувальних пристроїв (ланцюгів, канатів, ременів). Найбільшу небезпеку з точки зору міцності становлять концентровані зусилля в місцях зачеплення, які можуть спричинити локальні напруження стиснення, зсуву або зминання. При незбалансованому або асиметричному стропуванні можливе виникнення додаткових моментів, що призводять до вигину та деформації деталі.

У процесі транспортування виникають як статичні, так і динамічні навантаження. Динамічні навантаження можуть суттєво посилювати НДС за рахунок вібрацій, ударних впливів під час різких зупинок або ривків. При багаторазових циклах транспортування можливе накопичення втомних ушкоджень, особливо в зварних або литих виробах [23].

Основні фактори, що впливають на НДС конструкції:

- маса та габарити виробу (пропорційно збільшують навантаження та згинальні моменти);

- матеріал конструкції (визначає межу плинності, модуль пружності, схильність до крихкої руйнації);

- геометрія конструкції (наявність концентраторів напружень посилює локальні деформації);

- спосіб стропування та кантування (впливає на розподіл внутрішніх зусиль);

- динамічний характер навантаження (посилює НДС за рахунок інерційних та ударних компонентів);

- кількість технологічних операцій (багаторазові переміщення сприяють

втомному руйнуванню).

Для мінімізації ризику пошкоджень рекомендується:

- використання м'яких прокладок у місцях контакту з оснасткою;
- рівномірний розподіл маси та правильний вибір точок стропування;
- застосування датчиків контролю навантажень та деформацій;
- проведення неруйнівного контролю на наявність залишкових напружень після транспортування.

Для оцінки НДС застосовують як аналітичні методи розрахунку, так і чисельне моделювання, зокрема метод скінченних елементів (МСЕ), що дозволяє враховувати складні граничні умови та багатокомпонентне навантаження.

1.4 Залишкові напруження

Залишкові напруження виникають при виготовленні металевих конструкцій під впливом різних технологічних операцій, що викликають зміни в металі. У деяких випадках залишкові напруження створюються навмисно для поліпшення якісних характеристик виробу (поверхневий наклеп, хіміко-термічна обробка). Але при виготовленні деталей методом лиття або зварювання залишкові напруження значно збільшують вірогідність незапланованих деформацій виробу. Нерівномірність перебігу технологічного процесу у металі призводить до появи внутрішніх напружень в матеріалі, що викликає деформацію деталі зі зміною її геометричної форми. Основним способом підвищення стабільності геометричних розмірів є зниження внутрішніх залишкових напружень та мікропластичних деформацій у матеріалі деталі. Зниження цих дефектів досягається через оптимізацію технологічних параметрів обробки, що сприяє вирівнюванню напруженого стану та зниження ризику небажаних змін форми деталі.

1.4.1 Причини виникнення залишкових напружень

Серед причин виникнення залишкових напружень можна виділити

наступні:

а) напруження, що виникають внаслідок впливу високої температури. До цього класу відносяться напруження, що виникають при загартуванні, а також залишкові напруження, що виникають в цільнолитих конструкціях при охолодженні після лиття.

Залишкові напруження утворюються у разі нерівномірного нагріву за перерізом деталі. При швидкому охолодженні зовнішні шари деталі, що охолоджуються швидше, будуть розтягнуті. Серцевина під дією холодніших шарів буде стиснута. Якщо в цей момент напруження, що виникають, виявляться вище межі пропорційності при даній температурі, то відбудеться пластична деформація. Можливий випадок, коли температурне напруження у зовнішніх шарах перевищить межу міцності металу і утворюється тріщина («гаряча тріщина»).

б) напруження, що виникають при зварюванні. Зварні конструкції, як правило, є складними просторовими системами, що складаються з великої кількості елементів, з'єднаних за допомогою зварних швів. У процесі зварювання в цих з'єднаннях виникають внутрішні напруження та деформації, які взаємодіють між собою та формують поле залишкових напружень [24].

Характерними особливостями процесу зварювання є його локалізований тепловий характер, а також високі швидкості нагріву, при яких температура в зоні зварювання досягає значень, що істотно перевищують температуру плавлення металу (до 3000 °С при газовому та 4000 °С при електродуговому зварюванні). Такі термічні умови призводять до виникнення значних температурних градієнтів, що викликають температурні напруження, а також сприяють неоднорідним структурним перетворенням як у металі шва, так і в зонах термічного впливу, що примикають до зварного з'єднання. Зона розподілу залишкових напружень визначається потужністю теплового джерела, тривалістю теплового впливу, а також характером структурних перетворень, що відбуваються в зоні, що безпосередньо прилягає до зварного шва.

Густина матеріалу у зоні зварного шва змінюється внаслідок структурних

перетворень. Це пов'язано з тим, що при нагріванні перехід перліту та фериту в аустеніт супроводжується зменшенням щільності, а при охолодженні – перетворення аустеніту в мартенсит супроводжується збільшенням щільності. Крім того, внаслідок нерівномірного охолодження деталей структурні перетворення у всьому об'ємі відбуваються не одночасно, і в міру охолодження всього перерізу розподіл напружень змінюється. У низьковуглецевих сталях розпад аустеніту при охолодженні відбувається при температурі 600 °C та майже не впливає на залишкові напруження. В легованих сталях під час остигання розпад аустеніту відбувається за більш низьких температур, коли метал знаходиться в твердому стані, що викликає залишкові напруження. Таким чином, величина залишкових напружень, спричинених фазовими перетвореннями, залежить від хімічного складу сталі [25, 26].

в) напруження після пластичної деформації. Залишкові напруження являють собою внутрішній напружений стан, що зберігаються в матеріалі після припинення зовнішнього впливу. Вони виникають у результаті неоднорідного розподілу пластичної деформації, що характерно для широкого кола технологічних процесів обробки тиском, таких як кування, штампування, прокатка та ін.

Пластична формозміна може здійснюватися як за нормальних, так і при підвищених температурах. Температурний режим істотно впливає на величину і характер залишкових напружень. В умовах низькотемпературної (холодної) деформації залишкові напруження, як правило, мають більш високі значення внаслідок обмеженої релаксації напруженого стану та локалізації пластичної деформації. Вони залишаються в структурі матеріалу, що може знижувати його характеристики міцності і викликати розвиток дефектів, включаючи утворення тріщин.

Величина залишкових напружень визначається як ступенем пластичної деформації, так і геометричними параметрами зони деформування. Чим більший об'єм матеріалу, що зазнав пластичної зміни форми, тим вищий рівень внутрішніх напружень, що виникають при розвантаженні. Локалізовані зони

деформації, як правило, супроводжуються значними градієнтами залишкових напружень між пластично-деформованими та пружно-навантаженими зонами.

г) напруження після механічної обробки. Механічна обробка (точіння, фрезерування, шліфування та інші види різання), як правило, супроводжується формуванням значних залишкових напружень у поверхневому шарі матеріалу, товщиною в межах десятих часток міліметра, і обумовлені поєднанням пластичної деформації, термічного впливу та високих градієнтів швидкостей деформування, що виникають у процесі обробки.

Чинники, що визначають формування залишкових напружень при механічній обробці:

- місцева пластична деформація матеріалу в зоні різання, обумовлена дією високого контактного напруження між різальним інструментом і оброблюваною поверхнею. У зоні перед інструментом матеріал стискається передньою поверхнею інструменту, а в зоні за ним – розтягується при терті поверхні інструменту об оброблену частину конструкції. Межею розділу цих зон є ріжуча кромка інструменту.

- локалізоване нагрівання тонких поверхневих шарів матеріалу, зумовлене інтенсивною пластичною деформацією та тертям у зоні контакту ріжучого інструменту з оброблюваною поверхнею. В результаті цього нагрівання виникають високі температурні градієнти, що призводять до формування термічних напружень, величина яких може перевищувати межу плинності матеріалу в нагрітому стані. У міру завершення обробки та охолодження деталі відбувається нерівномірне зменшення температури в різних шарах матеріалу, що призводить до появи значних розтягуючих залишкових напружень в її поверхневому шарі.

Поєднаний вплив цих факторів призводить до формування залишкових напружень, величина і знак яких (розтягуючі або стискаючі) залежать від параметрів режиму обробки, властивостей матеріалу та умов охолодження.

1.4.2 Методи зниження залишкових напружень

Щоб забезпечити стабільність геометричних розмірів деталі, важливо знизити внутрішні залишкові напруження та мікропластичні деформації. Цього можна досягти наступними методами:

а) використання відповідних режимів термічної чи механічної обробки (відпал або нормалізація). Відпал є тепловим процесом зняття напруження, при якому виготовлена сталева конструкція встановлюється в піч і температура піднімається до 200...600 °С. Ця температура підтримується протягом певного часу, потім поступово зменшується. При цьому зменшується внутрішня енергія спотворення кристалічної ґратки та різко підвищується пластичність металевої матриці. Завдяки низькотемпературному відпалу відбувається значне зниження залишкових напружень в місцях їх концентрації та незначне їх зниження по всьому обсягу матеріалу;

б) застосування пост-обробки, наприклад, старіння. Конструкція після виготовлення зберігається на відкритому повітрі, зазнаючи змін температури навколишнього середовища, що викликає температурні деформації всіх її елементів. В результаті підвищується опір матеріалу пластичному деформуванню за рахунок міжкристалічної ерозії, що відбувається протягом тривалого часу. Недоліками природного старіння є його велика тривалість, необхідність створення великих запасів заготовок та виділення додаткових виробничих площ;

в) застосування технологій з високою точністю виготовлення деталей, таких як прецизійне лиття або лазерне оброблення для мінімізації локальних деформацій;

г) застосування методу статичного перевантаження. Метод полягає в цілеспрямованому прикладанні до виробу зовнішнього навантаження (розподіленого або концентрованого) достатньої величини і тривалості, спрямованого в бік, протилежний максимальним залишковим напруженням. При цьому в зонах з найбільшими залишковими напруженнями виникає пластична деформація, що сприяє їх перерозподілу і зниженню. Залежно від

завдання, навантаження може бути одноразовим або прикладатися у вигляді багаторазових циклів [27];

д) застосування методу вібраційного старіння. Це метод стабілізації геометричних розмірів металоконструкцій, що набув широкого поширення в останній час. Метод заснований на дії механічних коливань певної частоти та амплітуди, що викликають перерозподіл внутрішніх (залишкових) напружень у матеріалі без його суттєвого нагріву або структурних змін;

е) застосування методів компенсації можливих деформацій за допомогою спеціальних конструктивних рішень чи коригування в процесі виробництва:

- механічна або термічна правка, яка використовується для усунення деформацій після зварювання або обробки;

- попереднє нагрівання або контрольоване охолодження, що дає змогу зменшити температурні градієнти та пов’язані з ними деформації;

- виконання зварювальних швів у певній послідовності та їх симетричне розташування, що зменшує перекоси та мінімізує залишкові напруження при зварюванні;

- застосування технологічних пристроїв та фіксаторів, що утримують деталь у потрібному положенні під час обробки або зварювання;

- попереднє стискання або розтягування деталей до з’єднання, що дозволяє компенсувати очікувані деформації;

- попереднє виготовлення деталей з деформацією, протилежною до очікуваної після термічної обробки або зварювання;

- проєктування конструкцій з урахуванням рівномірного розподілу маси для зменшення деформацій під час транспортування або експлуатації;

- використання жорстких ребер або стяжок, що підсилюють конструкцію, для зниження гнучкості та обмеження деформацій.

1.4.3 Обчислювальні методи розрахунку механічних напружень

На даний час процес проєктування електричних машин передбачає використання сучасних обчислювальних інструментів для врахування можливих

чинників, що впливають на її міцність і надійність [28, 29], що включають в себе методи скінченних елементів (МСЕ) для визначення температур активних частин та напружено-деформованого стану (в тому числі з урахуванням термічних напружень). Визначення температур виконується на основі попередньо виконаного вентиляційного розрахунку з використанням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD).

Робочий процес проєктування на базі методу скінченних елементів та методу обчислювальної гідродинаміки включає в себе наступні основні етапи:

– моделювання геометрії вузлів електричної машини з зазначенням їх розмірів та властивостей матеріалів [30];

– побудова сітки з дискретизацією завданих вузлів електричної машини на скінченні елементи для наступного моделювання;

– встановлення граничних умов розрахунку на базі відомих значень розрахункових навантажень та інших параметрів;

– виконання обчислень теплового та напружено-деформованого стану визначених вузлів;

– аналіз результатів розрахунку з коригуванням конструкції у разі необхідності (при виявленні елементів з недостатніми запасами міцності), повторення попередніх етапів з відкоригованими конструктивними даними.

Фінальним етапом є експериментальна перевірка отриманих результатів шляхом випробувань готової електричної машини з визначенням її параметрів (в тому числі й механічних властивостей).

1.5 Висновки до першого розділу

Аналіз сучасних конструкцій машин постійного струму та проблем виробництва їх компонентів дозволяє зробити висновок про істотну увагу до вирішення проблем, пов'язаних з впливом електромагнітних причин. Великою проблемою під час виробництва, складання та експлуатації конструктивних елементів є залишкові напруження.

Характер розподілу залишкових напружень при зварюванні залежить від

багатьох факторів, серед яких найважливішими є послідовність накладання зварних швів, жорсткість та хімічний склад окремих елементів конструкції. Вплив цих чинників має важливе значення при моделюванні напружено-деформованого стану зварних з'єднань, а також на прогнозування експлуатаційної надійності конструкції загалом

Залишкові напруження після обробки тиском при низькій температурі є наслідком нерівномірного розподілу пластичної деформації та залежать від об'єму та розмірів зони деформування.

Залишкові напруження при механічній обробці суттєво залежать від технологічних режимів, таких як геометрія та стан ріжучого інструменту, охолоджувальне середовище, вид та режим обробки, а також від матеріалу виробу.

Основну увагу варто приділити контролю та коригуванню нерівномірностей, щоб запобігти деформації деталі та забезпечити стабільність її геометричних розмірів. При вирішенні конкретних завдань сучасний рівень технологічності виробництва дозволяє вибрати раціональні технологічні процеси, які мінімізують залишкові напруження та мікропластичні деформації.

Формування напружено-деформованого стану в процесі кантування, стропування та транспортування важких деталей є складним механічним завданням, що вимагає всебічного інженерного аналізу.

Недотримання вимог щодо виконання зазначених операцій здатне призвести до зниження міцності, погіршення експлуатаційних характеристик або навіть виходу виробу з ладу.

Підвищення надійності та безпеки можливе за рахунок застосування сучасних методів моделювання, оптимізації технологічних процесів та дотримання нормативних вимог.

1.6 Література до першого розділу

1. Gerling, D., “DC-Machines,” in: Lynn, P.A. (ed.), Electrical Machines. Mathematical Engineering, vol. 4 (Berlin, Heidelberg: Springer, 2015),

https://doi.org/10.1007/978-3-642-17584-8_2 ;

2. Warnes, L.A.A., “DC Machines,” in: Lynn, P.A. (ed.), Electronic and Electrical Engineering, Macmillan New Electronics Series (London: Palgrave, 1994), https://doi.org/10.1007/978-1-349-13012-2_13 ;

3. Simond, J.-J., Ramirez, C., Xuan, M., and Stephan, C.-E., “A Numerical Test Platform for Large Synchronous Machines Also Useful as a Design Optimization Tool,” in 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, QC, Canada, 2006, 7, https://doi.org/10.1109/PES.2006.1709207 ;

4. Gruboy, O.P. Kuzmin, V.V., Cheremisov, I.Ya., Kobzar, K.O. et al., “Problems and Prospects for the Development of Turbo-Generator Construction in Ukraine Hydropower of Ukraine,” 2006, no. 2, 27-35;

5. Tretiak O., Shut O. Designing of high power generators. Integrated computer technologies in mechanical engineering: materials all over Ukraine. science and technology conf. 2017: Vol. 1. Kharkiv: NAKU "KHAI", 2017. P. 91;

6. Melfi, M.J. and Umans, S.D., “DC Machines,” in: García, J. (ed.), Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering (Elsevier, 2023), 264-279, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821204-2.00005-2 ;

7. Boucht, R.J., Filippini, D., and Lupi, D.O., “Novel Characterization to DC Machines and Their Loads,” IFAC Proceedings Volumes 28, no. 19 (1995): 255-261, https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)45089-0 ;

8. Brandisky, K., Pahner, U., and Belmans, R., “Comparative Analysis of Three Classes of Experiment Design Applied to Optimization of PM DC Machines,” in: Nicolet, A. and Belmans, R. (eds), Electric and Magnetic Fields (Boston, MA: Springer, 1995), https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1961-4_15 ;

9. Sindhu, A., “A Review on Maintenance and Troubleshooting of DC Machines,” 2016. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36091.67365 ;

10. Tan X., Deng P., Chen W., Zucca S., Berruti T., Wang T., He H. Parametric instability analysis of rotors under anisotropic boundary conditions. International Journal of Mechanical Sciences. 2024. Vol. 284, 109739. ISSN 0020-7403. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109739 ;

11. Gosavi, P.R. and Wadhekar, A.R., “DC Motor Condition Monitoring Using Artificial Neural Network,” International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology 5, no. 4 (2018): 105-109. ISSN: 2394-3696;

12. Lei Y., Lin J., He Z., Zuo M. A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery. Mechanical Systems and Signal Processing. 2013. Vol. 35, № 1–2. PP. 108-126, ISSN 0888-3270. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.09.015 ;

13. Bahoo Toroody, F., Khalaj, S., Leoni, L., De Carlo, F. et al., “Reliability Estimation of Reinforced Slopes to Prioritize Maintenance Actions,” International Journal of Environmental Research and Public Health 18, no. 2 (2021): 373.https://doi.org/10.3390/ijerph18020373 ;

14. Di Bona, G., Falcone, D., and Forcina, A., “AHP-TOPSIS Model to Evaluate Maintenance Strategy Using RAMS and Production Parameters,” International Journal of Operations and Quantitative Management 25, no. 3 (2019): 175-201. https://hdl.handle.net/11367/89954 ;

15. ДСТУ IEC 60085:2015 Ізоляція електрична. Оцінювання нагрівостійкості та літерні познаки (IEC 60085:2007, IDT);

16. ДСТУ 8280:2015 Вироби електротехнічні. Методи випробовування на тривкість до дії зовнішніх кліматичних чинників;

17. ДСТУ EN 60529:2018 Ступені захисту, забезпечувані кожухами (Код IP) (EN 60529:1991, IDT);

18. ДСТУ EN 60034-9:2016 Машини електричні обертові. Частина 9. Норми на допустимі рівні шуму (EN 60034-9:2005; EN 60034-9, IDT);

19. ДСТУ EN 60034-2-1:2022 Машини електричні обертові. Частина 2-1. Стандартні методи визначення втрат та коефіцієнта корисної дії під час випробувань (за винятком машин для тягових транспортних засобів) (EN 60034-2-1:2014, IDT; IEC 60034-2-1:2014, IDT);

20. Li J., Xiao L., Tian C., Li Y., Que G. Cause analysis of low frequency vibration of flexible support stator frame for giant hydro generator. Journal of

Vibration and Control. 2014. Vol. 22, №14. PP. 3151-3156. https://doi.org/10.1177/1077546314562466 ;

21. Mollet Y., Barbierato G., Gyselinck J. Finite-element and magnetic-equivalent-circuit modelling of brushed wound-field DC machines with cross-saturation, 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland, 2016, pp. 350-356, https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2016.7732550 ;

22. Xia M., Li Y. Analysis of Hydroelectric Unit's Upper Bracket Based on Test and FEM. Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 721. PP. 131-134. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.721.131 ;

23. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський. / за ред. Г. С. Писаренка. Київ : Вища школа, 1993. 655;

24. Pogribniy, Mykola & Rebrova, Olena & Shevchenko, Svitlana & Riaboshtan, Valentyn. (2025). Research on the structure and properties of the welded metal from high-chrome steels and the influence of rapid heating during heat treatment. Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series Engineering and CAD. 84-90. https://doi.org/10.20998/2079-0775.2025.2.10 ;

25. Berezhnyts'ka, M.P. Methods for Determining Residual Welding Stresses and Their Relief (a Review). Materials Science 37, 933–939 (2001). https://doi.org/10.1023/A:1015601525897 ;

26. Khonsari, S. & Zhang, Jn & Dong, P. (2001). Residual Stresses in Welded Moment Frames and Implications for Structural Performance. Journal of Structural Engineering-ASCE - J STRUCT ENG-ASCE. 127. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(848) ;

27. Munsi, A. S. M. Y., Waddell, A. J., & Walker, C. A. (2002). Use of static stress for modification of welding residual stresses. Science and Technology of Welding and Joining, 7(1), 51–55. https://doi.org/10.1179/136217101125000514 ;

28. Tretiak, O., Kravchenko, S., Mykhailychenko, O., Nazarenko, V., Smyk, S., Vasyliev, O., Arefieva, M., Tretiak, I., **Serhiienko, S.**, &Selevko, V. (2025). Devising a method for calculating the structure of efficient cooling systems for thrust bearings

and guide bearings in hydrogenerators. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(1 (135), 38–50. (Scopus Q3) https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.329021 ;

29. Tretyak A., Shut A., Gakal P. Influence of thermal and mechanical factors on the stressed state of large components of hydrogenerator-motors. Проблеми машинобудування. 2018. Т. 21, № 3. С. 31-38. ISSN 0131-2928 https://journal-me.com/archive/en/2018_3_4_eng.pdf ;

30. Tretiak O., Kritskiy D., Kobzar I., Arefieva M., Nazarenko V. The Methods of Three-Dimensional Modeling of the Hydrogenerator Thrust Bearing. Computation.2022. Vol.10, №9, 152. https://doi.org/10.3390/computation10090152 .

РОЗДІЛ 2 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАНИНИ

2.1 Моделювання фізичних процесів в тривимірній постановці

Дослідження напружено-деформованого стану у тривимірній постановці є одним із напрямків механіки деформованого твердого тіла та широко застосовується при проєктуванні, аналізі та оптимізації різних технічних систем та конструктивних елементів. Тривимірна модель дозволяє найбільш повно та адекватно описувати внутрішні механічні процеси, що відбуваються в тілі під дією зовнішніх та внутрішніх навантажень, включаючи ефекти геометричної та фізичної нелінійності, анізотропії матеріалу, контактних взаємодій, термомеханічних та динамічних навантажень.

На відміну від плоских моделей, тривимірна постановка забезпечує врахування усіх напружень та деформацій. Це дозволяє проводити аналіз тіл складної просторової геометрії, об'ємних з'єднань та стиків (зварних, клейових, болтових), зон концентрації напружень (отвори, надрізи, тріщини, насічки), матеріалів з вираженою анізотропією (композити, армовані структури, геоматеріали), конструкцій, що знаходяться під багатокомпонентним навантаженням (кручення + вигин + розтяг) [1, 2].

Сучасні чисельні методи, насамперед метод скінченних елементів (МСЕ), дозволяють ефективно вирішувати завдання НДС у тривимірній постановці з високим ступенем деталізації [3, 4]. Це надає можливість:

- проводити оцінювання характеристик міцності конструкції (розраховувати розподіл нормальних та дотичних напружень в об'ємі тіла; визначати небезпечні зони, де досягаються граничні стани за вибраним критерієм міцності, наприклад, за Мізесом, Треска, максимальною напругою).

- досліджувати вплив геометричних та фізичних параметрів (проводити аналіз впливу розмірів, форми, товщини елементів на напружено-деформований стан; досліджувати ефекти конструктивних змін, зокрема додавання ребер жорсткості, зменшення товщини, додаткових вирізів, тощо; враховувати

неоднорідності чи анізотропії матеріалу);

- розглядати складні граничні та контактні умови (задавати комбіновані граничні умови, зокрема жорстке закріплення, пружна основа, задані напруження, переміщення, сили; моделювати контактну взаємодію між поверхнями з урахуванням тертя, відриву, ковзання; враховувати попереднє напруження або попередню деформацію);

- виконувати параметричні та оптимізаційні дослідження (вивчати вплив різних факторів, зокрема матеріалів, навантажень, граничних умов, на поведінку конструкції; пошук оптимальних форм та розмірів елементів для мінімізації напружень чи деформацій; автоматизація розрахунків та реалізація багатоваріантних сценаріїв навантаження);

- досліджувати моделі зі сполученими фізичними процесами (врахувати в межах однієї моделі ефект термопружності, зокрема вплив температурних градієнтів на НДС; врахувати п'єзоелектричні та електромеханічні ефекти, пластичність, повзучість, пошкодження та руйнування матеріалів).

Дослідження напружено-деформованого стану у тривимірній постановці є потужним інструментом для глибокої та всебічної оцінки механічної поведінки конструкцій. Такий підхід дозволяє виявити критичні зони, спрогнозувати поведінку під навантаженням, обґрунтувати проєктні рішення та підвищити надійність та безпеку інженерних об'єктів.

2.2 Метод скінченних елементів

Метод скінченних елементів в сучасних умовах розвитку науки і техніки є одним з найкорисніших інструментів числового аналізу в галузях проєктування та прикладної математики завдяки наявності суттєвих переваг порівняно з раніше використовуваними спрощеними методами. Основні переваги методу полягають у тому, що його можна застосовувати до довільних моделей як у двовимірній, так і у тривимірній постановці. Модель може бути побудована з урахуванням будь-якої кількості матеріалів для окремих її частин. За необхідності властивості матеріалу можуть бути задані неоднорідними (в

залежності від розташування) або анізотропними (залежно від напрямку, наприклад вздовж чи поперек напрямку сталевого прокату). Метод також передбачає велику кількість закріплень деталей, що дозволяють достатньо точно та зручно моделювати наявні ступені свободи та можливі напрямки переміщення елементів моделі, а також діючі на модель фактори, зокрема зусилля, тиск, тепловий потік, тощо [5, 6].

МСЕ базується на процесі перетворення керівних диференціальних рівнянь, що описують закони збереження енергії, у систему матричних рівнянь, які можуть бути наближено розв'язані з використанням комп’ютерної обчислювальної техніки [7]. Точність та швидкість отримання розв'язку для лінійних задач суттєво залежить від ступеня наближення та складності моделі .

Використовуване програмне забезпечення після отримання наближеного розв'язку з використанням МСЕ надає додаткові можливості візуалізації та аналізу отриманих результатів шляхом виконання стандартних процедур для подальших обчислень (пост-обробки), наприклад визначення інтеграла розв'язку або його похідних. Виконання пост-обробки в тому числі дає можливість оцінки похибок розрахунку шляхом обчислення відновлених вихідних даних та їх порівняння з початковими умовами, яке може показати наявні відхилення та, відповідно, напрямки можливого покращення дослідження. Наявні адаптивні процедури дозволяють шляхом виконання автоматичних виправлень та повторного розв'язання досягати заданого користувачем рівня точності.

При цьому слід зазначити, що на точність та правильність результатів розрахунку можуть суттєво вплинути фактори, пов’язані з некоректними вихідними даними або прийнятими спрощеннями або припущеннями.

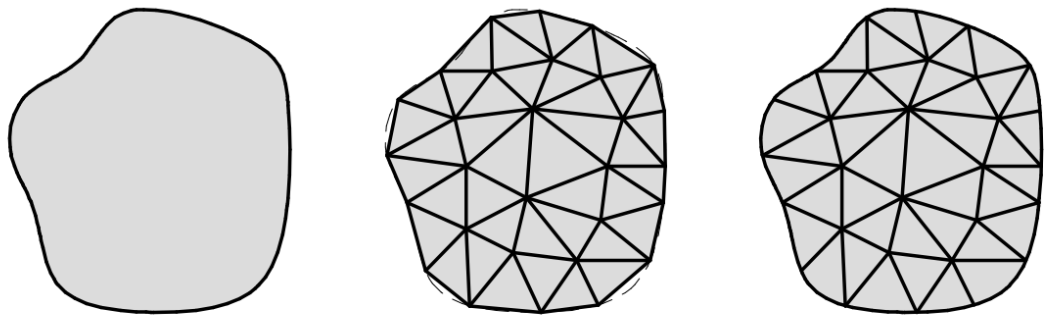
МСЕ є найпоширенішим інструментом для аналізу різних факторів, діючих всередині структур, що розглядаються. При цьому різні галузі дослідження часто пов'язані між собою, наприклад неоднорідний розподіл температур викликає термічні внутрішні напруження, що впливають на напружено-деформований стан твердих конструктивних елементів. Таким чином, логічним є виконання багатоетапних розрахунків з послідовним

урахуванням на кожному з етапів різних факторів, що впливають на модель. У якості прикладу такого послідовного аналізу з передаванням даних між етапами можна навести випадок проведення аналізу теплового стану моделі за допомогою МСЕ для отримання результатів розподілу температур, які, в свою чергу, стають вхідними даними для розрахунку напружено-деформованого стану. В ході розрахунку з використанням МСЕ також можливе отримання вхідних даних, отриманих за допомогою інших інструментів, зокрема від систем аналізу руху (кінематики) та систем обчислювальної гідродинаміки.

На цей час метод скінченних елементів є найбільш поширеним методом розрахунку конструкцій та найбільш універсальним методом числового розв'язку задач механіки. Існують численні обчислювальні комплекси, які реалізують алгоритми МСЕ на базі розробленого математичного і програмного забезпечення [8, 9].

2.2.1 Основні концепції методу

Основна концепція методу скінченних елементів полягає в представленні будь-якої складної фігури у вигляді сукупності великої кількості простих фігур (наприклад, трикутників для двовимірних фігур, або тетраедрів у випадку тривимірного моделювання), які об'єднуються для правильного відтворення вихідної деталі. Використані прості фігури називаються скінченними елементами, оскільки кожна з них займає невелику, але скінченну частину вихідної деталі. Вони дещо відрізняються від нескінченно малих (або диференціальних) елементів, які використовуються в математиці, зокрема для диференціальних рівнянь. В якості простого прикладу використаного процесу ділення та підсумовування, розглянемо обчислення площі довільної фігури, показаної на рис.2.1 (а).



а) б) в)

Рис. 2.1 – Площа, грубо розбита на лінійні та криволінійні трикутники

При наявності інформації щодо точних рівнянь обмежувальних кривих, теоретично можливим є визначення площі шляхом інтегрування, проте такий процес хоч і дозволить визначити абсолютно точне значення площі, проте потребує достатньо тривалих обчислень, незручних з точки зору їх автоматизації. Іншим способом є розділення наявної фігури на набір замкнутих трикутників (або іншими словами покриття фігури сіткою) з подальшим підсумовуванням площі окремих трикутників:

$$A = \sum_{i=1}^{n} A_i = \sum_{i=1}^{n} \int_{A_i} dA \tag{2.1}$$

Для приграничних областей фігури є кілька варіантів вибору типу трикутників. Найпростішим варіантом є використання лінійних трикутників (кожна зі сторін якого є відрізком), проте можливе використання фігур, які з точки зору геометрії є трикутниками лише умовно, зокрема криволінійні трикутники, у яких одна чи кілька сторін є квадратичними кривими (тобто параболами) або кубічними кривими.

Площу лінійного трикутника з відомими координатами вершин можливо знайти за відомим алгебраїчним виразом

$$A_i = \frac{x_1 \cdot (y_2 - y_3) + x_2 \cdot (y_3 - y_1) + x_3 \cdot (y_1 - y_2)}{2} \ , \qquad (2.2)$$

де $(x_1; y_1)$, $(x_2; y_2)$, $(x_3; y_3)$ – координати трьох вершини проти годинникової стрілки.

Центр ваги трикутника розташований у точці з координатами

$$x_{c1} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}, \quad y_{c1} = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \ . \qquad (2.3)$$

Таким чином, для обчислення площі фігури достатньо визначити координати вершин кожного з елементів даної сітки з подальшим обчисленням площ елементарних трикутників та їх суми. Також отримані вирази дають всі необхідні компоненти для подальших обчислень, зокрема моменту інерції фігури.

Обчислення площі криволінійного трикутника можливо за допомогою числового інтегрування, проте обчислювальні вирази будуть складнішими, а час виконання обчислення більшим порівняно з розглянутим випадком лінійних трикутників.

Варіанти трикутної сітки показані на рис. 2.1, де (б) – сітка з лінійних трикутників, (в) – сітка з криволінійних трикутників. Очевидно, що найпростіша трикутна сітка з прямими сторонами (б) достатньо точно апроксимує площу, але водночас вносить геометричні похибки вздовж криволінійної межі фігури, що виникають внаслідок заміни граничної кривої низкою відрізків прямих ліній. Проте на практиці цю геометричну похибку вздовж межі можна зменшити до будь-якого бажаного рівня шляхом збільшення кількості лінійних трикутників (з одночасним зменшенням їх розмірів). Відповідно таке рішення збільшує кількість обчислень та змушує знаходити оптимальний баланс між потрібною геометричною точністю та загальною кількістю та часом необхідних обчислень.

Площа є скалярною величиною, тому її розрахунок у вигляді знаходження суми площ всіх її частин виглядає природною та достатньо простою

процедурою. Проте цей метод розрахунку цілком придатний і для аналізу інших фізичних величин, таких як кінетична енергія, енергія деформації та механічна робота.

В цьому випадку МСЕ базується на певному типі описових інтегральних рівнянь, рішення яких обчислюються шляхом їх перетворення на матричну систему, з урахуванням припущень щодо змінення параметрів системи в межах типового елемента. Відповідно інтегрування перетворюється на суму інтегралів для кожного з елементів сітки.

В ході розвитку МСЕ була виконана розробка необхідних матричних співвідношень для переважною більшості параметрів що потребують обчислення в ході виконання прикладних задач. У якості прикладу розглянемо матричне представлення кінетичної енергії деталі для лінійного трикутного елемента.

Кінетична енергія масової частинки дорівнює

$$K = \frac{mv^2}{2} \quad , \tag{2.4}$$

де m – маса частинки,

v – її швидкість.

Кінетична енергія плоского тіла товщиною t з основою, зображеною на рис. 2.1 (б), отримується шляхом інтегрування за диференціальними масами

$$K = \frac{1}{2}\int v^2 dm = \frac{1}{2}\int v^2 \rho dV = \frac{t}{2}\int v^2 \rho \, dA \ . \tag{2.5}$$

де ρ – густина матеріалу тіла;

V – об’єм тіла.

Також її можна отримати шляхом підсумовування інтегралів елементів

$$K = \sum_{i=1}^{n} K_i = \frac{t}{2} \sum_{i=1}^{n} \int_{A_i} v^2 \rho \, dA \ . \tag{2.6}$$

Припустимо, що швидкість усіх точок сітки відома. Тоді для кожного з лінійних трикутних елементів можна отримати швидкість всіх трьох вершин. Для методу скінченних елементів швидкість будь-якої точки всередині елемента визначається інтерполяцією між значеннями вершин елемента. Позначимо інтерполяційну функцію вузла j як $N(x,y)_j$.

Тоді швидкість всередині трикутного елементу дорівнює

$$v(x,y) = N(x,y)_1 \cdot v_1 + N(x,y)_2 \cdot v_2 + N(x,y)_3 \cdot v_3 = \sum_{j=1}^{3} N(x,y)_j \cdot v_j . \tag{2.7}$$

Цю лінійну просторову інтерполяцію можна представити в матричному записі наступним чином:

$$v(x,y) = [N(x,y)]\{v_i\} = \{v_i\}^T [N(x,y)]^T \ . \tag{2.8}$$

Відповідно кінетичну енергію елемента можливо обчислити у вигляді матричного інтегралу

$$K_i = \frac{1}{2} \int_{A_i} \{v_i\}^T [N(x,y)]^T \rho [N(x,y)]\{v_i\} t \, dA \ . \tag{2.9}$$

В даному випадку вузлові швидкості є відомими константами (або функціями лише часу), тобто їх можна винести за межі інтеграла наступним чином:

$$K_i = \frac{1}{2}\{v_i\}^T \int_{A_i} [N(x,y)]^T \rho [N(x,y)]\{v_i\} t\, dA \quad . \tag{2.10}$$

Позначимо решту квадратного матричного інтеграла як матрицю мас:

$$[m_i] = \int_{A_i} [N(x,y)]^T \rho [N(x,y)] t\, dA \quad . \tag{2.11}$$

Тоді остаточний вираз для кінетичної енергії прийме вигляд

$$K_i = \frac{1}{2}\{v_i\}^T [m_i]\{v_i\} \quad . \tag{2.12}$$

Отриманий результат подібний до виразу кінетичної енергії окремої частинки, бо в даному випадку також кінетична енергія тіла фактично дорівнює половині добутку матриці мас і квадрату вузлових швидкостей.

Для прямого двовузлового стрижневого елемента довжиною L_i та площею поперечного перерізу A_i матриця мас дорівнює

$$[m_i] = \frac{\rho L_i A_i}{6}\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad . \tag{2.13}$$

В даному випадку загальна маса стрижневого елемента $m = \rho L_i A_i$ представлена у вигляді розподілу між його двома вузлами та їхніми швидкостями, $\{v_i\}^T = [v_{i1} v_{i2}]$. Якщо дві кінцеві швидкості однакові (тобто стрижневий елемент рухається як тверде тіло зі швидкістю$v_{i1} = v_{i2} = v$), тоді добутки матриць дають очікувану скалярну відповідь для кінетичної енергії $K_i = \frac{mv^2}{2}$.

Таким чином можна зробити висновок, що метод скінченних елементів

перетворює скалярні інтеграли на матричні вирази, припускаючи просторову інтерполяцію між вузлами типового елемента для параметрів, точний розподіл яких є невідомим на початку розрахунку, зокрема положення, переміщення, швидкості або температури. Ці просторові інтерполяції також визначають просторові градієнти, які характеризують розподіл отриманих параметрів.

2.2.2 Оператори збирання та розсіювання

Відповідно до розглянутих вище принципів розрахунку інтегральна оцінка параметрів за методом скінченних елементів вимагає попередньої побудови сітки, зазвичай це трикутна сітка для плоских чи вигнутих поверхонь та тетраедрична сітка для твердих тіл. В результаті створення сітки скінченних елементів виникає щонайменше два набори даних. Перший (вузловий) набір – це пронумерований список всіх утворених вершин разом з їхніми просторовими координатами. Другий (елементний) набір – це пронумерований набір елементів у поєднанні зі списком номерів вершин елементів, з якими з'єднаний цей елемент (також він має назву список зв'язності елементів). На рис. 2.2 проілюстровано такі дані для лінійних елементів.

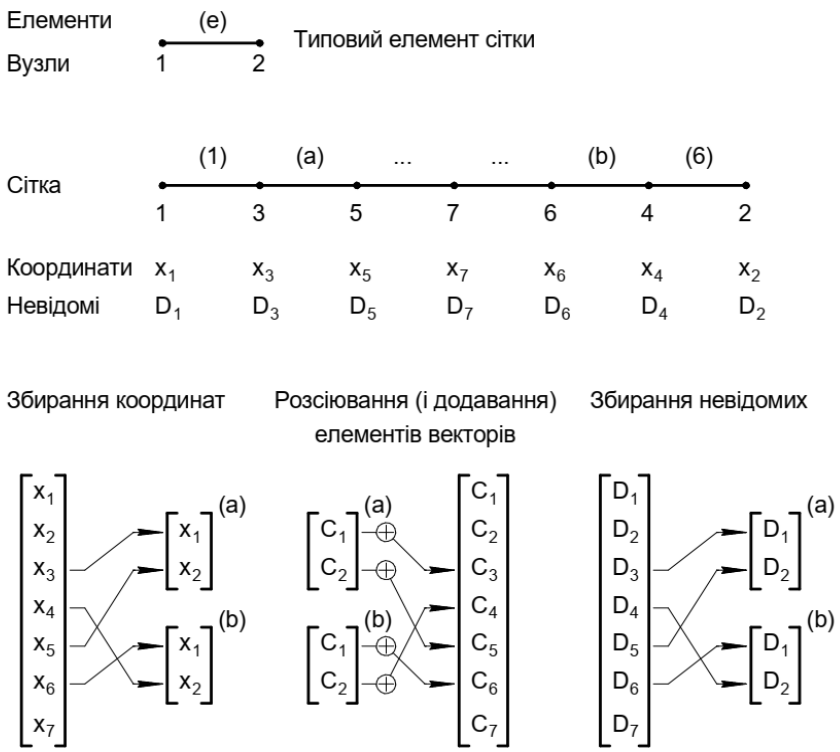


Рис. 2.2 – Операції збирання та розсіювання матриць

Список зв'язності – це критично важливі дані, які дозволяють автоматизувати обчислення методом скінченних елементів. Будь-який розрахунок за допомогою МСЕ використовує операції, що базуються на конкретних номерах вузлів (вершин) одного елемента. Ці дві операції зазвичай називаються операціями збирання та розсіювання (або додавання).

Операція збирання використовується для простого повернення відомих вузлових даних у повній сітці назад до одного елемента.

Зазвичай координати та швидкості, що використовуються у вищезгаданих інтегралах елементів, зберігаються разом з вузловими даними сітки. Хоча сітка може мати величезну кількість вузлів, кожен елементарний лінійний трикутний елемент має лише три вузли. Оператор збирання використовує список зв'язків елементів для вилучення даних для поточного елемента в підсумовуванні, щоб отримати три його вузлові швидкості.

Зворотною до операції збирання є операція розсіювання (або додавання). Ця операція виконує часткове підсумовування параметрів елементів з занесенням їх до матриць, пов'язаних з даними сітки.

Розсіювання бере значення якогось параметру, пов'язаного з локальними вузлами елемента, та додає ці значення до відповідного елемента матриці на рівні повної сітки. Операції розсіювання (або додавання), заповнюють записи в матричних рівняннях, які необхідно розв'язати для невідомих параметрів задачі.

Хід виконання цих двох поширених операцій схематично зображений на рис. 2.2. Необхідні дані зв'язності елементів (два вузли, що відносяться до кожного з лінійних елементів) можна побачити в третьому рядку цього рисунка.

2.2.3 Геометричні похибки межі

Теоретично геометрична похибка межі, згадана для лінійних трикутників, усувається шляхом вибору використання сітки криволінійних трикутників з параболічною стороною, зображених на рис. 2.1 (а). Проте на практиці для таких трикутників похибка форми межі справді зменшується за рахунок складніших розрахунків площі, але повністю вона не усувається, оскільки більшість

практичних кривих є дугами кола, сплайнами або іншими кривими, що не відповідають формулі параболи. Таким чином, найпоширенішим способом зменшення геометричної похибки сітки є зменшення розмірів елементів сітки.

Вибір елемента за замовчуванням у SolidWorks Simulation являє собою криволінійний трикутник зі стороною, що виражається квадратичним поліномом. Інші системи можуть пропонувати ширший діапазон ступенів поліномів ребер (наприклад, кубічний поліном), а також інші форми осередків сітки, зокрема чотирикутники або прямокутники. Для тривимірних твердотільних моделей деякі обчислювальні системи пропонують десятки варіантів порядку поліномів ступенів ребер сітки, а також використаних форм осередків (включаючи гексаедричні, клиноподібні та тетраедричні елементи). SolidWorks Simulation для досліджень твердих тіл використовує лише тетраедричні елементи,які дозволяють набагато легшу автоматичну побудову сітки порівняно з іншими можливими елементами.

2.2.4 Етапи аналізу та їх невизначеності

Аналіз за допомогою МСЕ завжди включає низку невизначеностей, які впливають на точність кожного етапу розрахунків та його результатів.

Типові етапи дослідження МСЕ та можливі причини виникнення невизначеностей на кожному з етапів перелічені далі.

а) Створення тривимірної моделі в програмі моделювання твердих тіл

В процесі створення моделі існує вірогідність випадкового утворення дефектів побудови(наприклад ліній, поверхонь або внутрішніх порожнин з дуже малими розмірами). В цьому випадку візуально помітити похибку може бути вкрай важко, за винятком випадків екстремального збільшення, але ця похибка може заважати створенню сітки. Більшість систем мають процедури перевірки, які можуть знайти та виправити такі проблеми, перш ніж перейти до безпосереднього дослідження за допомогою МСЕ. Іноді корисною може бути процедура експортування деталі, з наступним імпортуванням її назад з новою назвою, оскільки імпортовані деталі зазвичай піддаються більш тривалим

перевіркам порівняно з оригінальними деталями. Коли кілька деталей утворюють збірку, доцільною є попередня перевірка можливості створення сітки для окремих деталей. Також рекомендується вводити в модель додаткові чітко визначені "майданчики" для полегшення моделювання сполучень вузлів та визначення областей навантаження та обмеження (кріплення чи опори).

б) Видалення надлишкових елементів з моделі твердотільної деталі для створення сітки

Твердотільна деталь може містити елементи, такі як рельєфний логотип, які не є необхідними з точки зору виготовлення деталі або для точного аналізу, але можуть суттєво ускладнити побудову сітки. Такі елементи можна виключити з твердого тіла за допомогою відносно простої операції, що підтримується більшістю програм для моделювання твердих тіл (наприклад, опція "гасіння" в SolidWorks). Однак слід обережно використовувати вказану функцію, бо її некоректне використання може призвести до серйозних помилок у наступному інженерному дослідженні. Наприклад, видалення внутрішніх заокруглень малого радіуса може значно зменшити кількість елементів і спростити створення сітки, проте це створює гострі зворотні кути, які можуть призвести до хибних нескінченних напружень. В свою чергу наявність таких областей хибних високих напружень може призвести до того, що можуть залишитись непоміченими інші області зі справжніми критично високими рівнями напружень.

Наявність малих отворів також призводить до появи багатьох дрібних елементів сітки та тривалого часу її побудови. Такі отвори також спричиняють концентрації напружень, що в декілька разів підвищують локальні рівні напружень. Рішення про їх видалення з моделі залежить від місця їх розташування в деталі (збереження отворів в області високих напружень, та видалення в області низьких напружень). При цьому слід враховувати можливість наявності різних умов навантаження, коли область низьких напружень в одному випадку навантаження може стати областю високих напружень в іншому випадку навантаження.

в) Об'єднання кількох деталей у збірку.

Отримана збірка може мати очікуваний візуальний вигляд, однак непомітні відхилення геометричного сполучення різних деталей може суттєво впливати на результат аналізу за допомогою МСЕ. Вибір фізичного описання сполучень моделі часто може бути незрозумілим з першого погляду, і потребуватиме введення ряду припущень, вивчення кожного з них та визначення найгіршого результату. Необхідність використання опису фізичних контактів може призвести до необхідності ітераційного рішення задач, які займають багато часу та зрештою можуть не зійтися.

г) Раціональний вибір типу елемента

Система SolidWorks має наступні доступні основні типи елементів: елементи ферм (стержні), елементи каркасу (балки), тонкі оболонки (або плоскі пластини), товсті оболонки та тверді тіла. Система моделювання SolidWorks вибирає тип елемента на основі форми деталі, користувач має можливість перетворити область нетвердотільного елемента на область твердотільного елемента і навпаки.

Неправильний вибір типу елементу також може призвести до появи невизначеностей.

д) Створення сітки

При створенні сітки для деталей або вузлів слід пам'ятати, що побудоване сітчасте тіло може відрізнятися від твердого тіла деталі. На практиці це може означати, що в деяких випадках складності задач необхідно використовувати достатньо грубу сітку (або принаймні грубу в деякій області) та вдаватися до умов симетрії чи антисиметрії. Поліпшення точності розрахунку в даному випадку вимагає ущільнення сітки в областях можливих невизначеностей, пов’язаних з занадто дрібними розмірами елементів в цих місцях моделі.

Локальна похибка розв'язку також залежить від відносних розмірів сусідніх елементів, тобто наявності дрібних елементів поруч з великими. Для зниження цього ефекту автоматичні генератори сіток мають функцію поступового змінення розмірів сусідніх елементів від найменшого до

найбільшого.

Твердотільна модель, для якої виконується побудова сітки, може мати області навантаження або обмеження (кріплення) в окремо виділених в моделі елементах ("майданчиках"), навіть якщо такі елементи не потрібні з точки зору виготовлення деталей. В такому випадку сітка зазвичай повинна мати ущільнення в подібних областях.

Сітка повинна виглядати як деталь, але цього може бути недостатнім для задовільної точності дослідження. У випадку значних викривлень або згинань, для досягнення необхідної точності потрібно зазвичай щонайменше п'ять шарів елементів (в крайньому найгіршому випадку три шари) у разі використання криволінійних елементів, а для лінійних елементів ця кількість має бути щонайменше подвоєна.

е) Визначення матеріалу деталей

Сучасні системи скінченного елементного аналізу мають бібліотеку матеріалів, яка містить лінійні механічні, теплові та/або рідинні властивості більшості стандартизованих матеріалів. Також ці системи дозволяють користувачу визначати власні властивості матеріалу.

Слід зазначити, що значення властивостей у наявних таблицях часто може бути неправильно інтерпретоване. Це пов’язане з тим, що заявлені значення властивостей визначені шляхом усередненні багатьох значень, взятих з багатьох випробувань. Достатньо рідко можна знайти інформацію про розподіл результатів випробувань був насправді. Більшість випробувань дають результати, які відповідають "дзвоноподібній" кривій нормального розподілу, вужчій (як для сталі) або ширшій (як для чавуну) в залежності від виду матеріалу.

Урахування цього фактору вимагає додаткового збільшення загального коефіцієнту запасу міцності у разі можливого відхилення фактичного значення властивості від її табличного значення.

є) Визначення навантажень

Визначення навантажень, що діють на деталь, як правило виконується

шляхом вибору областей деталі, на які діють ці навантаження, та вказати тип діючого навантаження (момент, зусилля, тиск)та його значення.

У математичній термінології умови навантаження або потоку на граничній області називаються граничними умовами Неймана. Геометричні області можуть бути точками (теоретично), лініями, поверхнями або об'ємами. В деяких випадках необхідне введення в модель додаткових елементів, що визначатимуть точне місце прикладення навантаження.

При визначенні навантажень слід обмежити використання точкових сил (або джерела тепла), бо такі елементи як правило є причиною появи хибних нескінченних напружень або теплових потоків. Замість точкових навантаження краще використовувати зусилля або тиск, що діє на невелику площу. Принцип Сен-Венана стверджує, що дві різні, але статично еквівалентні системи сил, що діють на невелику частину поверхні тіла, створюють однаковий розподіл напружень на відстані, невеликій порівняно з лінійними розмірами навантаженої частини.

Вказаний принцип швидкого перерозподілу зосередженого навантаження проілюстрований рис. 2.3. В даному випадку точкове осьове зусилля на правому кінці було замінено невеликою областю постійного тиску, при цьому напруження в інших частинах деталі практично дорівнюють нулю. Як видно з рисунку, на відносно невеликій глибині осьове напруження перерозподілилося та зрівнялося з напруженням в основному об’ємі деталі.

Рис. 2.3 – Принцип Сен-Венана

Величини прикладених навантажень часто визначаються шляхом

виконання розрахунків, що базуються на деяких припущеннях або визначаються керівним стандартом проєктування. При цьому залишається вірогідність, що реальні значення навантажень або умови їх прикладення можуть дещо відрізнятися від розрахункових (навіть для найбільш жорстких умов згідно з використаною методикою). Відповідно прийнятий загальний коефіцієнт запасу міцності має враховувати можливі варіації невизначеності значення навантаження або фактичного просторового розподілу прикладених навантажень.

ж) Визначення закріплень моделі

Взаємодія модель з оточенням визначається за допомогою її закріплень. Закріплення являють собою області обмеження (опорні або кріпильні), які у математичній термінології називаються основними граничними умовами.

Як правило модель досліджуваної деталі не може включати до себе навколишні елементи, що взаємодіє з деталлю. Для відображення цієї взаємодії існують спрощені концепції, що використовувалися ще на етапах аналітичних розрахунків (наприклад жорстке защемлення, жорсткі або податливі опори, роликові опори, тощо). Ці концепції також використовуються і для розрахунків за допомогою МСЕ.

При цьому такий підхід в окремих випадках може надмірно спрощувати справжню дію опор та призводити до появи суттєвих помилок у результатах. Навіть невеликі зміни в опорах можуть призвести до значних змін у результатах. Для зменшення вірогідності помилки в окремих випадках буває доцільним дослідити низку ймовірних умов опори зі знаходженням найгіршого можливого випадку.

Знов таки, можливу невизначеність умов закріплення можливо компенсувати за рахунок збільшення загального коефіцієнту запасу міцності.

з) Отримання розв'язання задачі та перевірка результатів

Сучасні числові алгоритми розв’язку алгебраїчних систем або задач на як правило не вносять суттєвої невизначеності в отримані результати. Проте отримані невідомі необхідно перевірити на достовірність, наприклад шляхом

порівняння з передбачуваними значеннями параметрів (отриманими, наприклад, шляхом наближених аналітичних розрахунків).

і) Виконання пост-обробки рішення

Як правило отримане рішення потребує пост-обробки для визначення вторинних змінних. Для визначення напружено-деформованого стану це можуть бути значення прогинів, реакцій опор та розподілу напружень; для теплових досліджень – це температури, вектори теплового потоку та теплові потоки реакцій; для дослідження власних частот – кілька форм деформацій. Графічні візуалізація допомагає зручно відобразити отримані розподіли параметрів, а також їх максимальні та мінімальні значення.

и) Визначення критерію руйнування

Необхідно визначити, який саме критерій руйнування застосовується до виконаного дослідження. Існує ряд теорій для цього, більшість з яких базується на значеннях напружень або рівнях енергії формозміни (зокрема критерій Мізеса), але деякі беруть до уваги значення деформації. Вибраний критерій руйнування може вносити власну невизначеність в отримані результати.

2.3 Постановка задачі тривимірного розрахунку станини

Метою тривимірного механічного розрахунку є визначення напружень в станині ВМПС.

На різних етапах виробництва станина ВМПС багаторазово піддається технологічним операціям кантування, стропування та перенесення. У даній роботі для технологічної обробки станини використовується плавне перекидання вантажу на підвісці, тобто кантування. При цьому вантаж перевертається узгодженими рухами крана: підйомом або опусканням гака, переміщенням моста або візка. Перевертання здійснюється безпосередньо за рахунок руху моста або візка. Деталь при цьому кріпиться обхватом або гаком крану.

Кантування пов'язане з рядом серйозних ризиків, пов'язаних з перерозподілом навантажень, дією динамічних інерційних сил, концентрацією

напружень у вузлах підвіски та кріплення, а також можливими небажаними деформаціями, особливо в зварних та несиметричних конструкціях. Зважаючи на це, аналіз напружено-деформованого стану станини при кантуванні є актуальним інженерним завданням, від якого безпосередньо залежить безпека технологічних процесів та збереження геометричної точності виробу.

Для повноцінного визначення та аналізу напружено-деформованого стану зварної станини при кантуванні необхідно врахувати вплив гравітаційних та інерційних навантажень, конфігурацію опорних точок, а також технологічні особливості конструкції.

Для моделювання напружено-деформованого стану був використаний прикладний програмний пакет SolidWorks Simulation із застосуванням тетраедричної сітки змінної щільності. Особлива увага приділялася зонам кріплення та потенційним місцям концентрації напружень. У якості критерію оцінки НДС застосовувалися еквівалентні напруження за Мізесом та поля переміщень.

На рис. 2.4 наведено блок-схему запропонованого методу аналізу НДС станини ВМПС на основі тривимірних моделей.

Рис. 2.4 – Блок-схема методу

2.3.1 Початкові та граничні умови

Для цілей чисельного аналізу було побудовано тривимірну CAD-модель станини (рис. 2.5), що включає основні елементи: силовий каркас, ребра жорсткості, монтажні майданчики та технологічні отвори. Геометрія моделі була частково спрощена зі збереженням ключових несучих елементів задля зниження обчислювальних витрат.

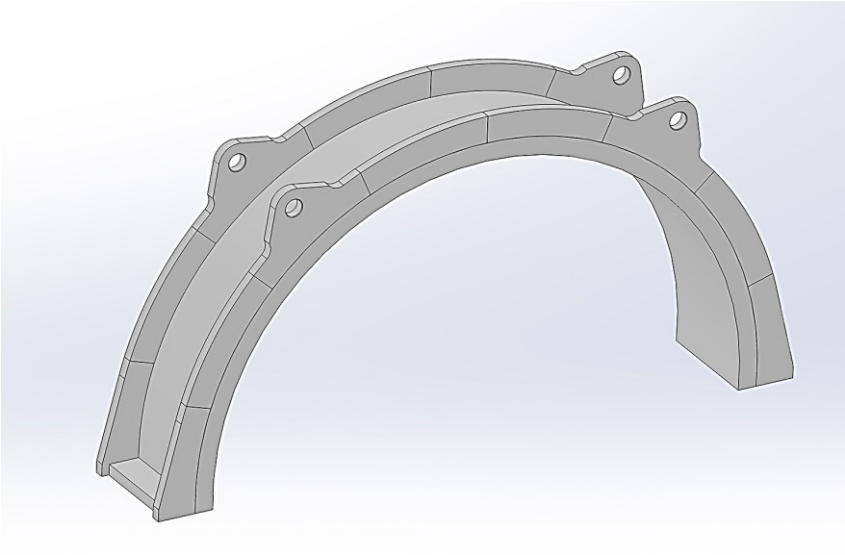


Рис. 2.5 – Базова конструкція станини

Процес кантування моделювався як квазістатичний, з накладенням наступних умов:

- поступова зміна положення конструкції від горизонтальної до вертикальної орієнтації;
- врахування сили тяжкості як основного зовнішнього навантаження, величина зусилля приймалася рівною масі конструкції;
- імітація підтримуючих та підвісних елементів через шарнірні або через жорсткі опори;
- завдання інерційних навантажень під час аналізу динамічного кантування.

2.3.2 Розрахункова сітка

Для проведення чисельного аналізу напружено-деформованого стану станини найважливішим етапом є формування якісної та адекватної розрахункової сітки кінцевих елементів. Правильна побудова сітки безпосередньо впливає на точність результатів, обчислювальну ефективність і виявлення критичних зон концентрації напружень.

Для моделювання тривимірної конструкції станини, що включає вигини, отвори та зварні з'єднання, була використана тетраедрична елементна сітка, що

забезпечує гнучке адаптування до складних поверхонь [10].

У зонах з високою очікуваною концентрацією напружень (таких як зварні шви, місця підвіски та кріплення, а також у місцях сполучення тонкостінних та масивних частин) застосовувалося локальне уточнення сітки. Розмір кінцевих елементів у цих областях змінювався від 2 до 5 мм. У менш навантажених і геометрично простих областях, наприклад, у плоских стінках і великих корпусних елементах, було використано більший розмір елементів – близько 10…15 мм.

Для оцінки впливу розміру елементів на результати моделювання було проведено перевірку збіжність розрахунку по сітці. Моделі з різним розміром елементів порівнювалися за максимальними значеннями напружень та деформації. При зменшенні розміру елементів зміни результатів не перевищували 3…5 %, що засвідчило про досягнення необхідної точності розрахунку.

Таким чином, сформована розрахункова сітка забезпечила достатню деталізацію геометрії та дозволила виявити зони максимальних напружень при кантуванні. Застосування локального уточнення та перевірок якості елементів підвищило надійність та обґрунтованість проведеного чисельного аналізу.

2.4 Тривимірний розрахунок базової конструкції станини

Нижче наведено результат розрахунку технологічного процесу кантування станини класичної базової конструкції. Напруження під час підйому цієї конструкції представлені на рис. 2.6, при кантуванні – на рис 2.7. На рис 2.8 показано напруження під час кантування.

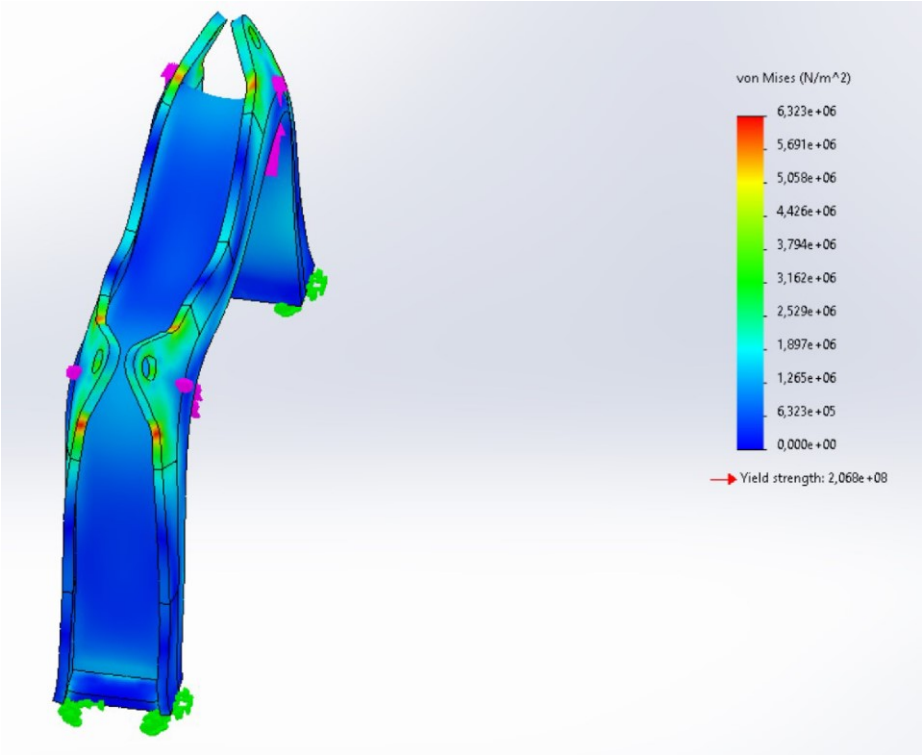


Рис. 2.6 – Епюра напружень під час підйому базової конструкції станини

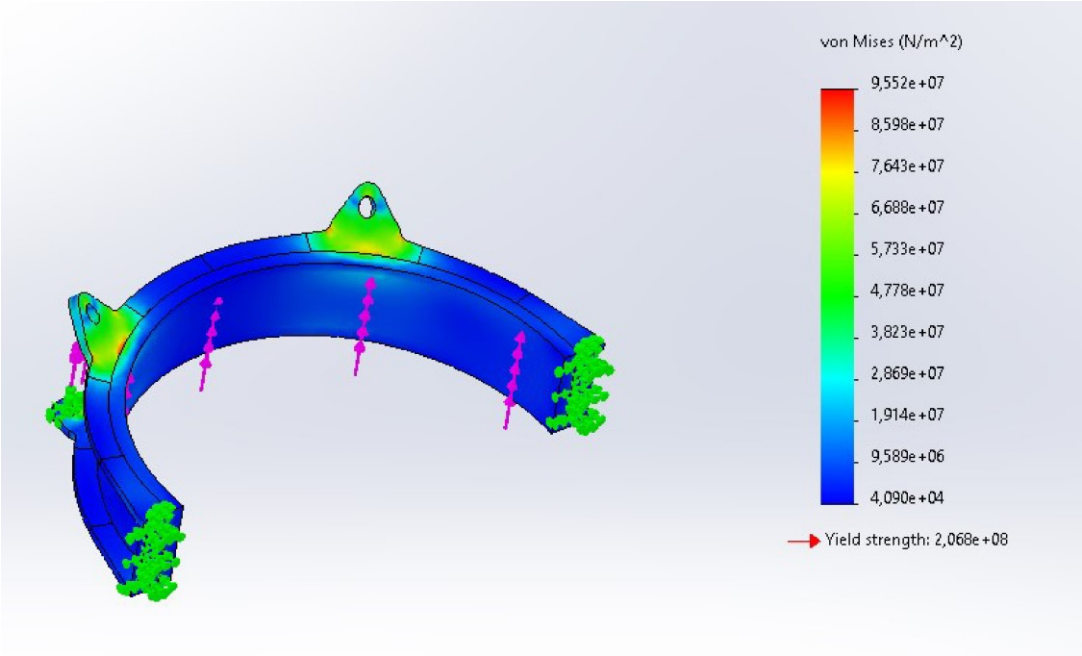


Рис. 2.7 – Епюра напружень при кантуванні базової конструкції станини

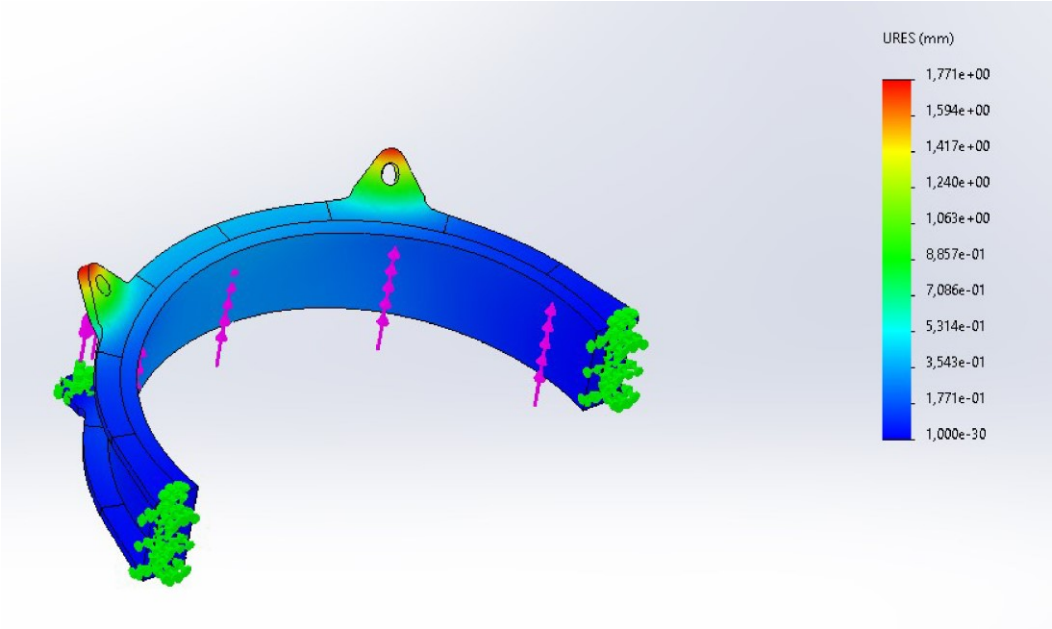


Рис. 2.8 – Деформації при кантуванні базової конструкції станини

При встановлених полюсах деформація при підйомі станини і напруження при її перевертанні представлені на рис 2.9 та 2.10.

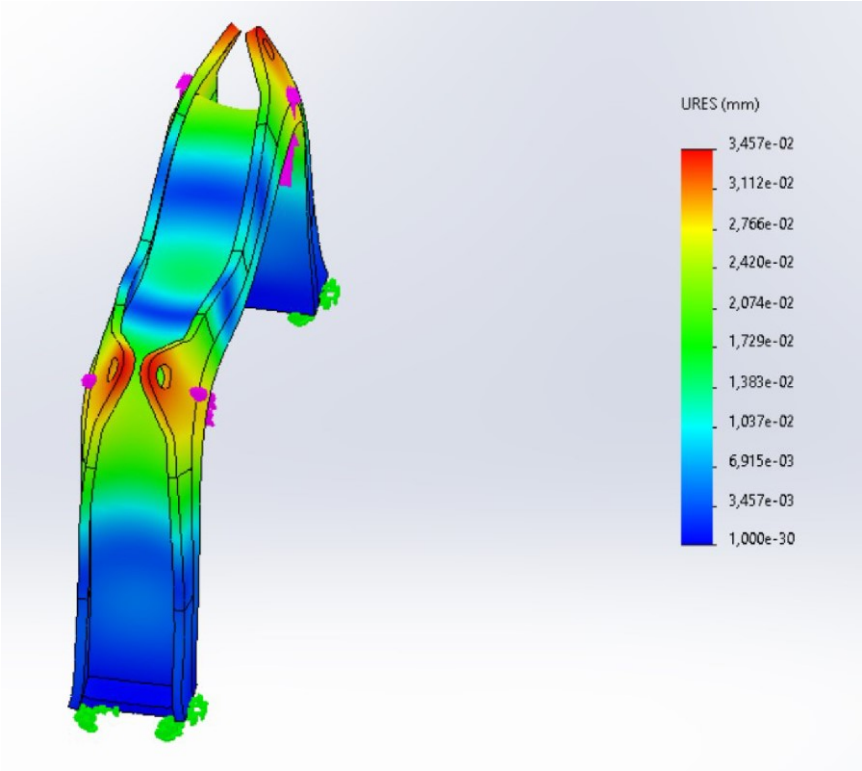


Рис. 2.9 – Деформації під час підйому станини із встановленими полюсами

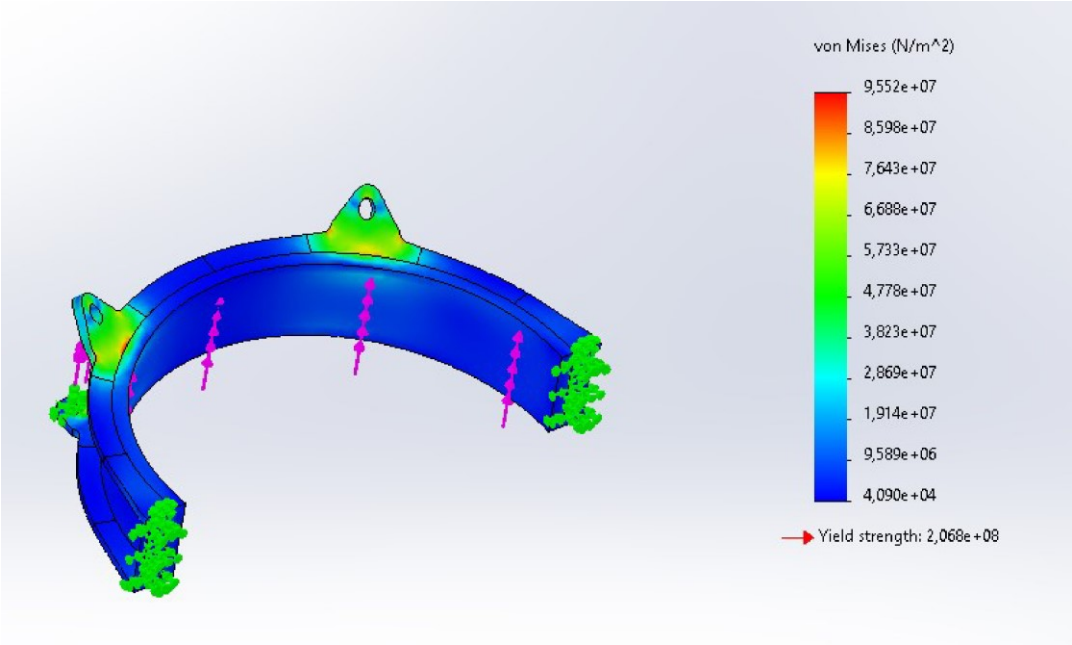


Рис. 2.10 – Епюра напружень при кантуванні станини із встановленими полюсами

Результати розрахунків напружень і деформацій станини базової конструкції показали, що деформації виходять за межі пружної зони конструкції. Напруження для зварних швів перевищує допустимі, а деформації в майбутньому можуть вплинути на зміну повітряних зазорів.

2.5 Тривимірний розрахунок станини з одним поясом кріплення

За результатами розрахунків напружень і деформацій станини базової конструкції було прийнято рішення про її модернізацію шляхом додавання додаткового поясу кріплення рами (рис. 2.11).

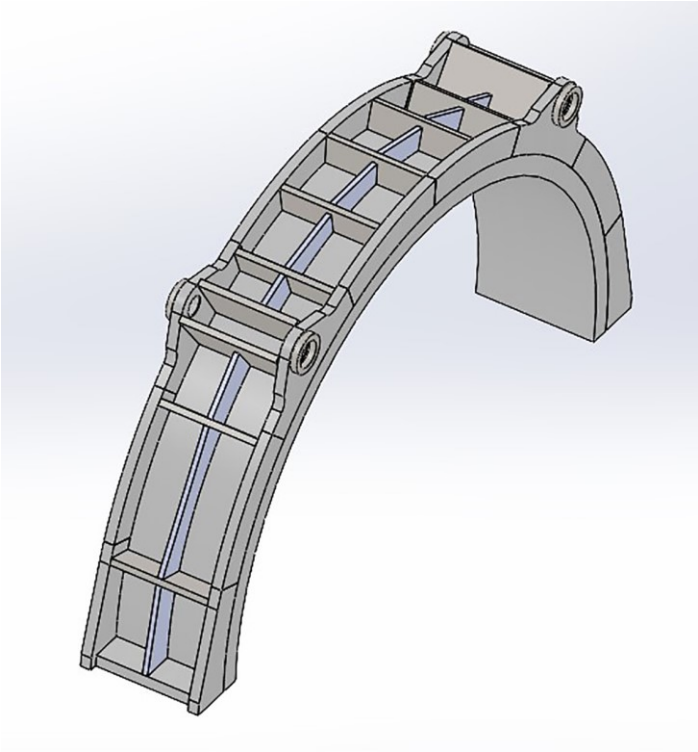


Рис. 2.11 – Конструкція станини з одним поясом кріплень

При встановленому додатковому поясі кріплень напруження та деформації при підйомі станини представлені на рис 2.12 і 2.13.

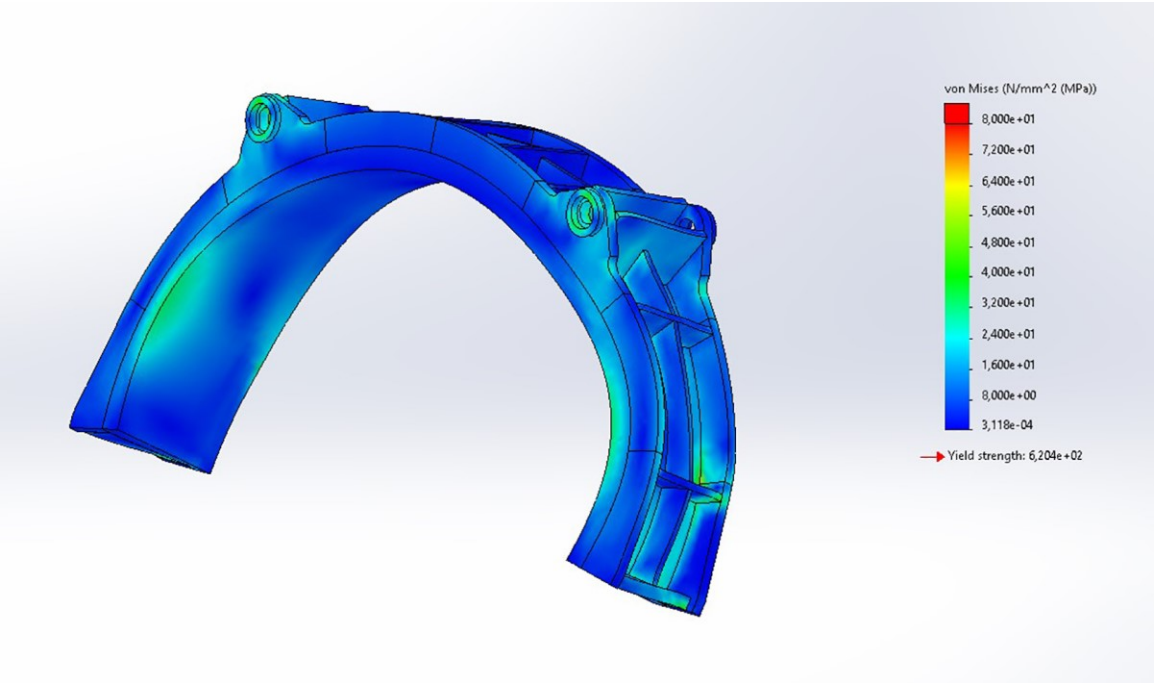


Рис. 2.12 – Епюра напружень при підйомі станини з одним поясом кріплень

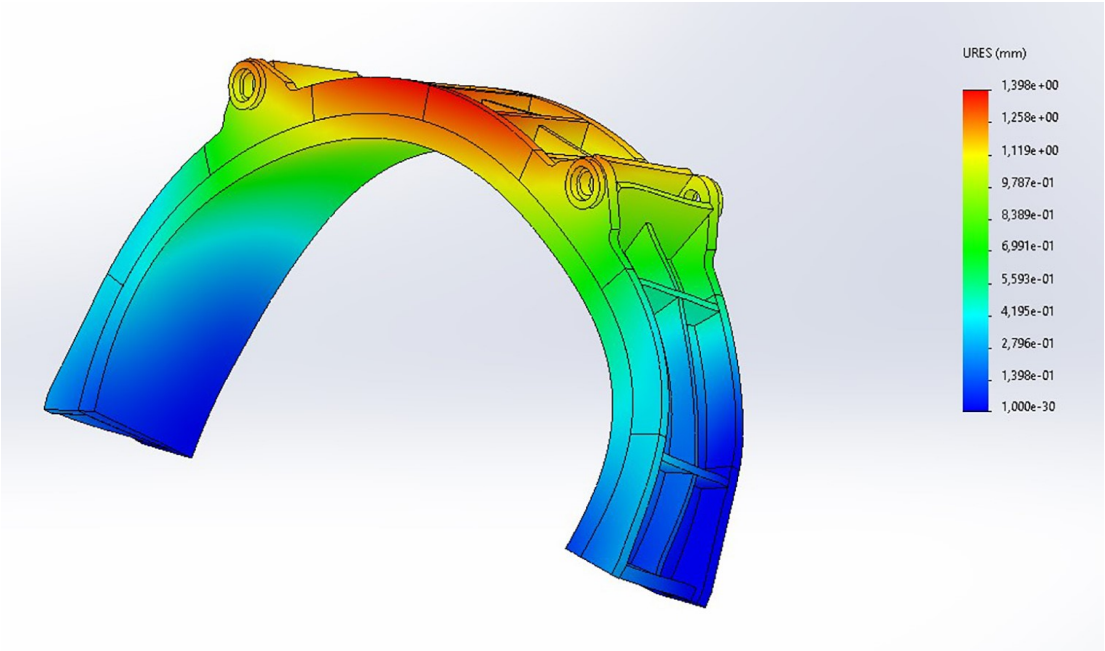


Рис. 2.13 – Деформації під час підйому станини з одним поясом кріплень

Результати розрахунків напружень і деформацій станини з одним поясом кріплень показали, що така модернізація не вирішила проблему з деформаціями, які виходять за межі пружної зони конструкції. Напруження для зварних швів перевищують допустимі, а деформації в майбутньому можуть вплинути на зміну повітряних зазорів, як наслідок потрібне подальше посилення конструкції.

2.6 Тривимірний розрахунок станини з двома поясами кріплення

Після більш детального аналізу конструкції станини в умовах технологічних і робочих навантажень було вирішено посилити конструкцію каркаса шляхом додавання другого поясу та додаткових поперечних та поздовжніх ребер, а також круглих пластин в районі "вушок". Товщина всіх доданих елементів складає 40 мм. Зовнішній вигляд модернізованого каркаса з додатковими ребрами наведено на рис. 2.14.

Рис. 2.14 – Зовнішній вигляд модернізованої станини
з двома поясами кріплення та додатковими ребрами.

Діючі навантаження при підйомі станини з двома поясами кріплення та встановленими додатковими ребрами показані на рис 2.15.

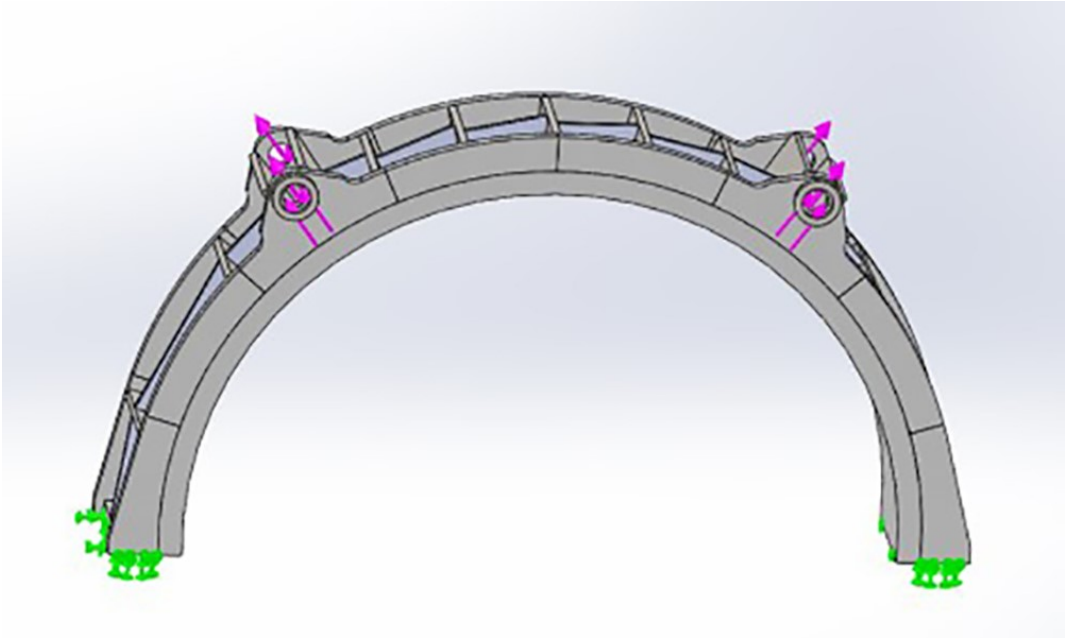


Рис. 2.15 – Навантаження при підйомі модернізованої станини
з двома поясами кріплення та додатковими ребрами

При встановлених двох поясах кріплення та додаткових ребрах отримані напруження та деформації при підйомі станини представлені на рис. 2.16 та 2.17.

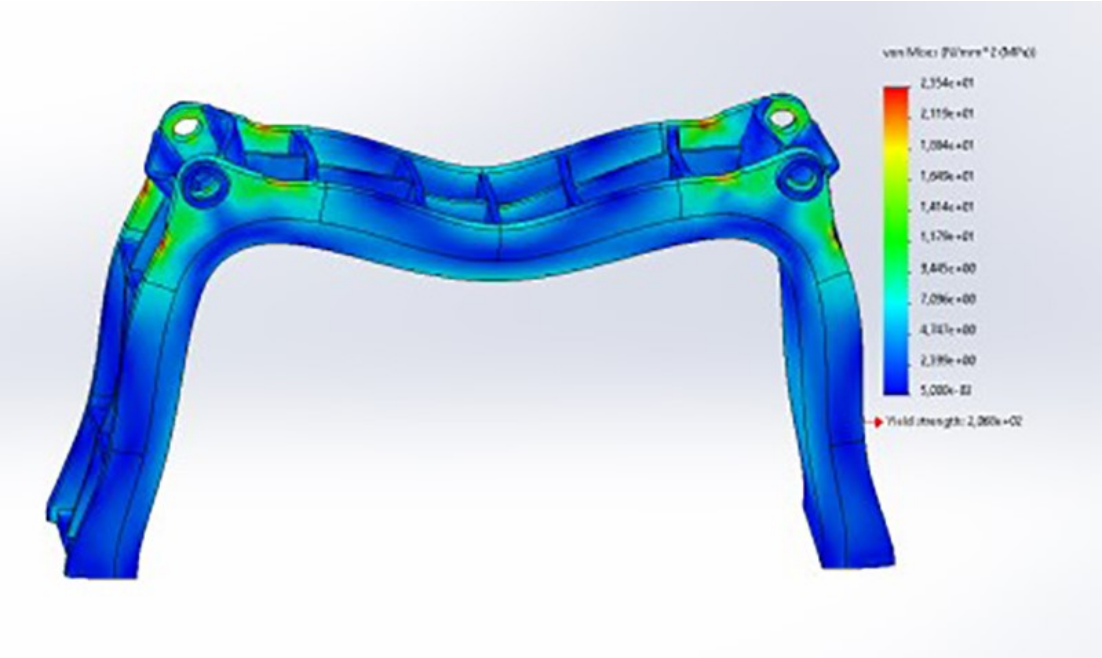


Рис. 2.16 – Епюра напружень при підйомі модернізованої станини з двома поясами кріплення та додатковими ребрами

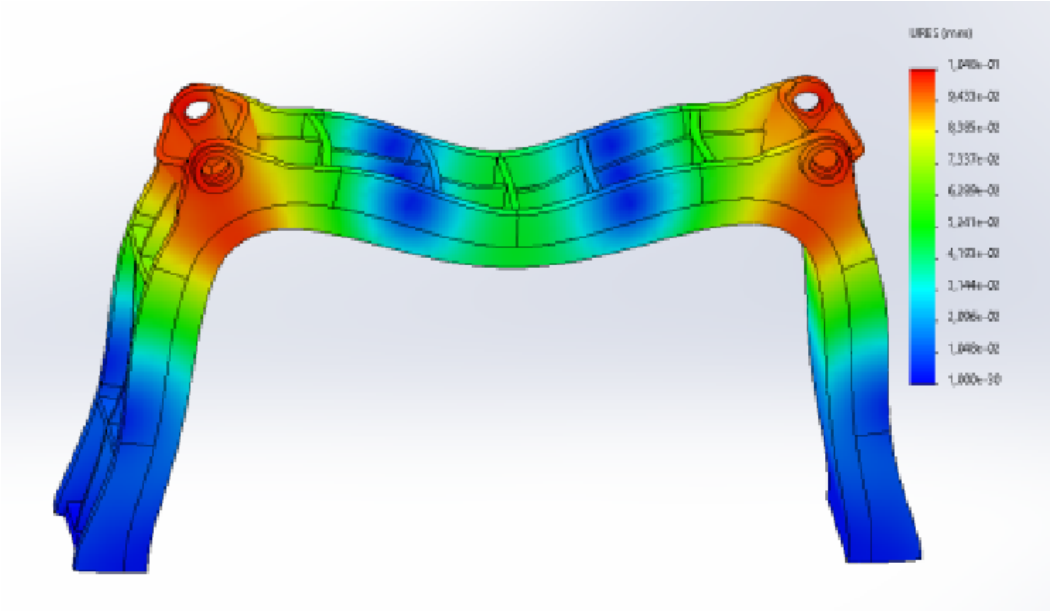


Рис. 2.17 – Деформації при підйомі модернізованої станини з двома поясами кріплення та додатковими ребрами

Навантаження, діючі під час кантування станини з встановленими двома поясами кріплення та ребрами, показані на рис 2.18.

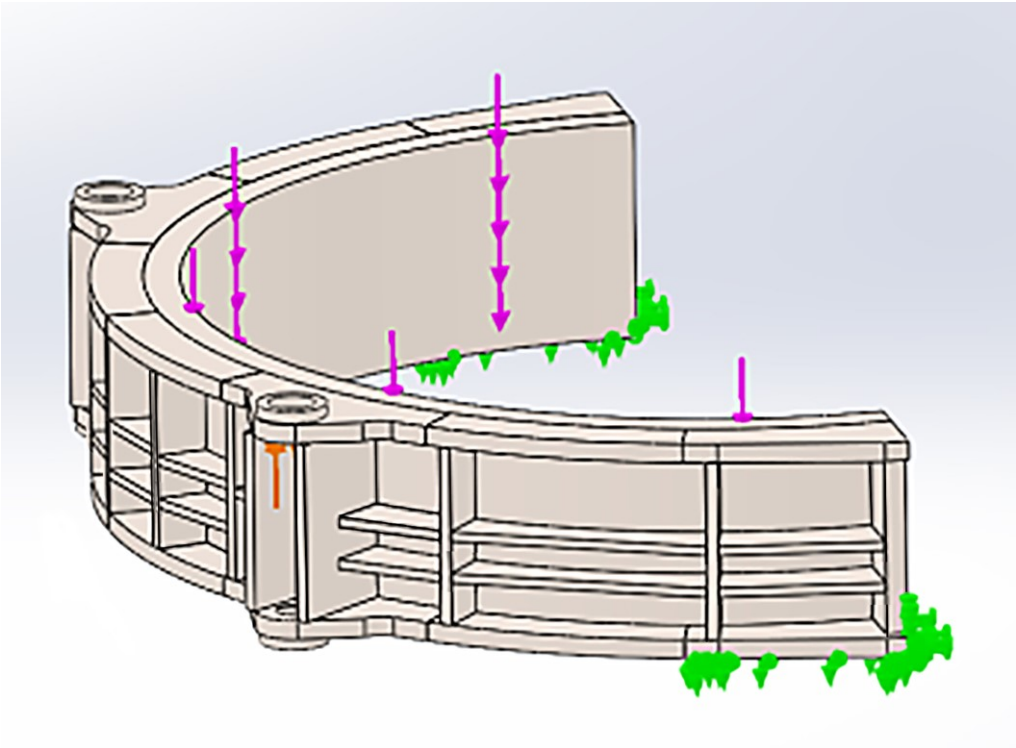


Рис. 2.18 – Навантаження під час кантування модернізованої станини з двома поясами кріплення та додатковими ребрами

При встановлених двох поясах кріплень та додаткових ребрах отримані напруження та деформації при кантуванні станини представлені на рис. 2.19 та 2.20.

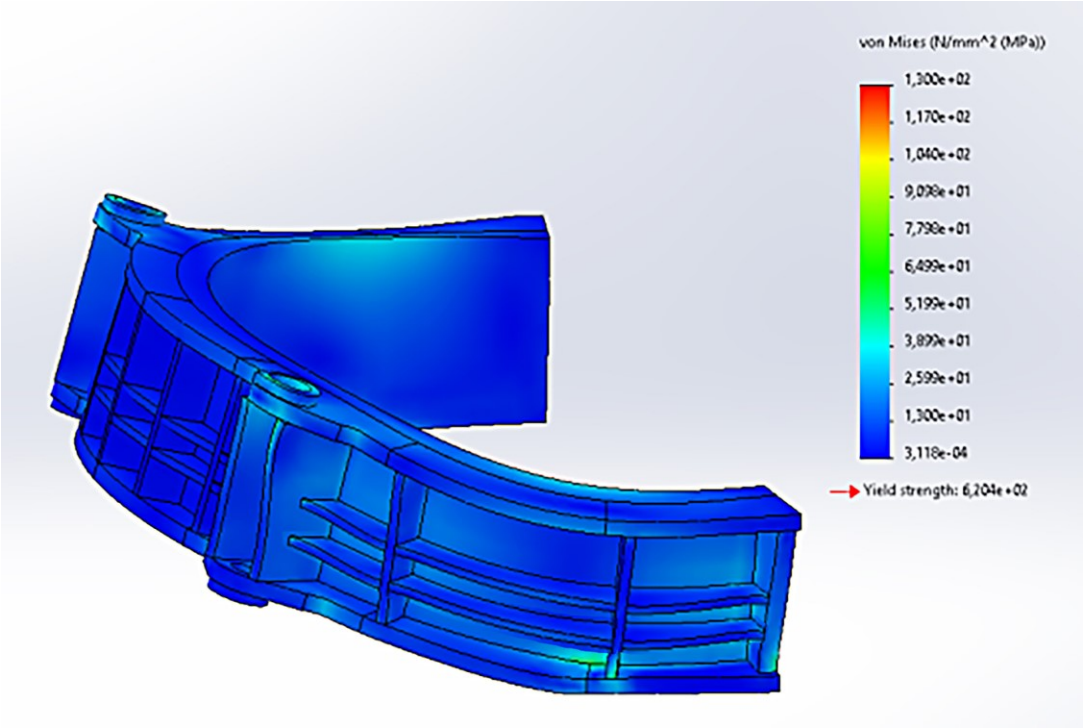


Рис. 2.19 – Епюра напружень під час кантування модернізованої станини з двома поясами кріплення та додатковими ребрами

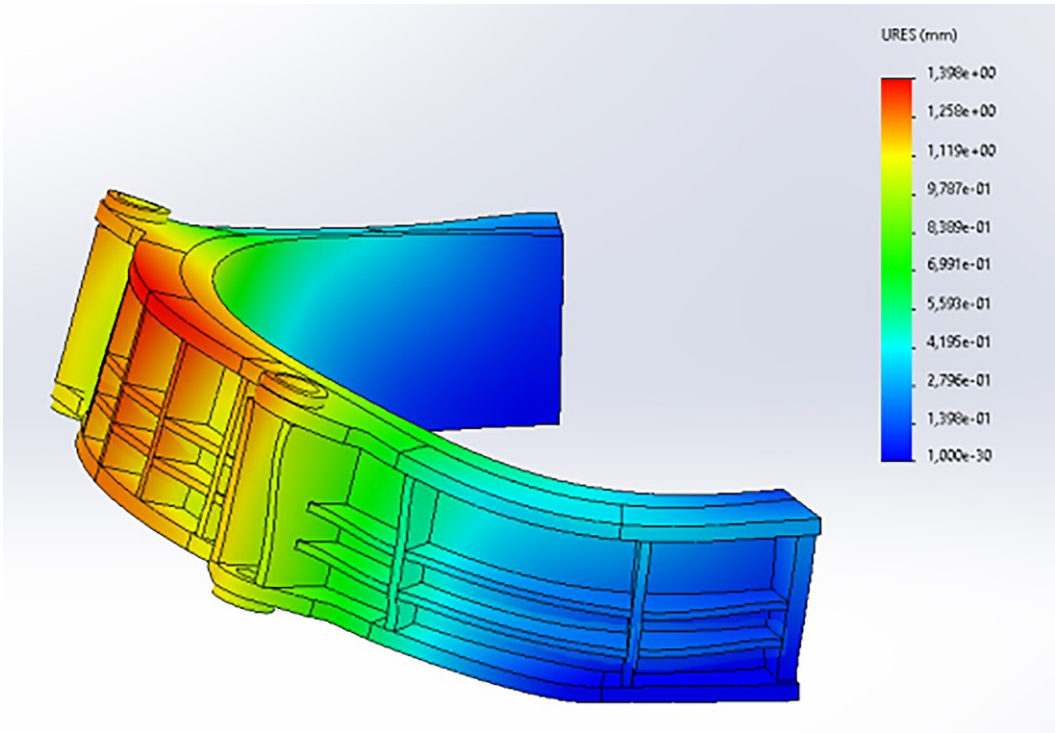


Рис. 2.20 – Деформації під час кантування модернізованої станини з двома поясами кріплення та додатковими ребрами

Діючі на станину з встановленими двома додатковими поясами та ребрами навантаження, під час роботи електродвигуна, показані на рис 2.21.

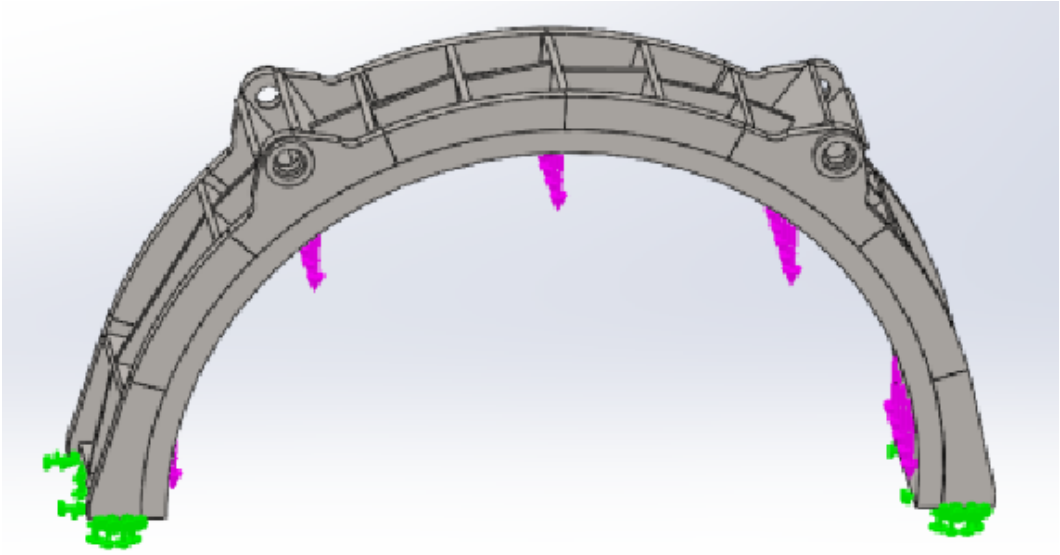


Рис. 2.21 – Навантаження в робочому стані модернізованої станини з двома поясами кріплення та додатковими ребрами

Напруження та деформації під час роботи електродвигуна, діючі на станину при встановлених двох поясах кріплення та додаткових ребрах, наведені на рис. 2.22 та 2.23.

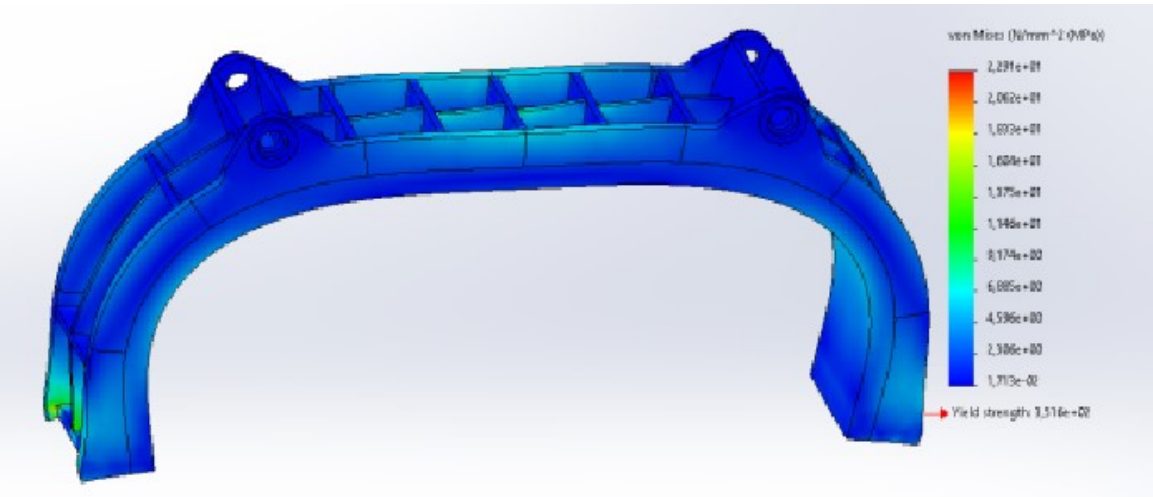


Рис. 2.22 – Епюра напружень у робочому стані модернізованої станини з двома поясами кріплення та додатковими ребрами

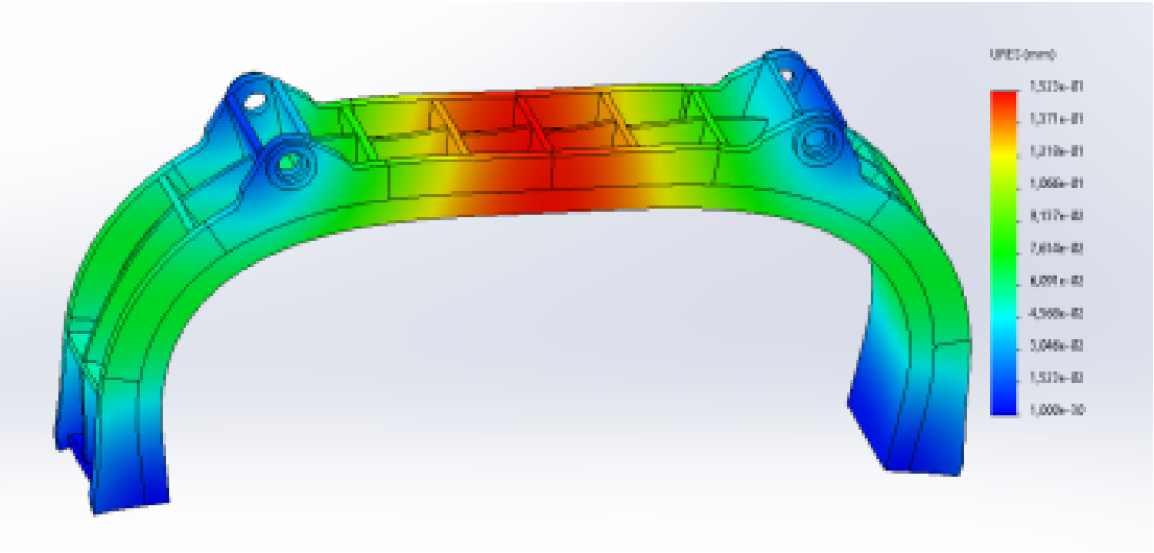


Рис. 2.23 – Деформації в робочому стані модернізованої станини з двома поясами кріплення та додатковими ребрами

Як видно з наведених результатів розрахунків, отримані значення напружень та деформацій станини з двома поясами кріплень та додатковими ребрами жорсткості задовольняють вимогам міцності та надійності при технологічних операціях в ході виготовлення, а також при довготривалій експлуатації виробу.

2.7 Висновки до другого розділу

Виконаний розрахунок у тривимірній постановці дозволив визначити розподіл внутрішніх напружень станини, пов’язаних з особливостями виконання технологічних процесів піднімання та кантування.

Напруження і деформації станини базової конструкції, а також зварних швів перевищили допустимі межі пружної зони конструкції.

Додавання в конструкцію станини одного додаткового поясу кріплень не дало поліпшення показників напружень та деформацій, після чого було прийнято рішення щодо подальшого посилення конструкції.

Додавання в конструкцію станини другого поясу кріплень та ребер дозволило зменшити деформації та напруження, задовольнивши всі вимоги

технології та експлуатації. Механічні напруження при підйомі та в умовах тривалої експлуатації двигуна не перевищують 25 МПа (для зварювальних швів допустимо 60 МПа), переміщення при підйомі та в робочому стані не перевищують 0,2 мм. Напруження при кантуванні досягають за основним металом до 130 МПа, а переміщення не перевищують 2 мм, при цьому всі деформації відбуваються в пружній зоні.

Представлена конструкція була створена на ТОВ «Харківський електромашинобудівний завод» та пройшла всі стендові випробування на власній випробувальній станції підприємства [11].

2.8 Література до другого розділу

1. Pidgurskyi M., Pidgurskyi I., Stashkiv M., Ihnatieva V., Danylchynko S., Bykiv D., Pidluzhnyi O. (2023) Peculiarities of studying the stress-strain state of structural steel perforated beams using the finite element method. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol 111, no 3, pp. 126–138. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.03.126 ;

2. Hahalyuk A., Krupa V. (2023) Modeling of a lathe bed using the method of topological optimization. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol 111, no 3, pp. 67–75. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.03.067 ;

3. Martynov, I., Kalabukhin, Y., Trufanova, A., & Martynov, S. (2025). Study of stress-strain state of passenger car body. Transport Systems and Technologies, (45). Retrieved from https://tst.duit.in.ua/index.php/tst/article/view/433 ;

4. Ripetskyi, E., Ripetskyi, R., & Nepelyak, O. (2024). Analysis of stress-strain state of the metal plate based on discrete data of displacement values. Physics and Chemistry of Solid State, 25(3), 595–604. https://doi.org/10.15330/pcss.25.3.595-604;

5. Дубенець В.Г., Хільчевський В.В., Савченко О.В. Д79 Основи методу скінченних елементів: Навчальний посібник. – Чернігів: ЧДТУ, 2007. – 288 с.;

6. Tretiak, O., Smyk, S., Kravchenko, S., Smakhtin, S., Brega, D., Zhukov, A., **Serhiienko, S.**, & Don, Y. (2024). Devising a calculation method for modern structures of current-conducting elements in large electric machines in a

three-dimensional statement. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1 (130), 87–96, (Scopus Q3) https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310049 ;

7. Третяк О.В., Арефьєва М.О., Кобзар І.В., Репетенко М.В., **Сергієнко С.А.**, Жуков А.Ю., Пеньковська Н.С., Селевко В.Б., Назаренко В.В. Методи та концепції розрахунку турбо- та гідрогенераторів у тривимірній постанові: монографія - Харків: КП «Міська друкарня», 2023 – 138 с.ISBN 978-617-619-284-8;

8. Tretiak, O., Kravchenko, S., Gakal, P., Shestak, B., **Serhiienko, S.**, & Nazarenko, V. (2025). Створення методу визначення запасів міцності елементів конструкцій бандажних вузлів турбогенераторів. Авіаційно-космічна техніка і технологія, 0 (4sup2), 149-159. https://doi.org/doi.org/10.32620/aktt.2025.4sup2.17 ;

9. Tretiak O., Kravchenko S., Zhukov A., **Serhiienko S.**, Application of the finite element method to determine the limit geometric dimensions of the shaft journal of a synchronous electric motor: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. October 8-10, 2025. Seville, Spain. 149-154 p. URL: https://isu-conference.com/en/archive/the-integration-of-research-innovation-and-economy-08-10-25/ ;

10. Tretiak, O., Kritskiy, D., Kobzar, I., Arefieva, M. et al., “Stress-Strained State of the Thrust Bearing Disc of Hydrogenerator-Motor,” Computation 11 (2023): 60, https://doi.org/10.3390/computation11030060 ;

11. Tretiak, O., **Serhiienko, S.**, Zhukov, A., Gakal, P., Don Y., Arefieva M., Tretiak I., Kravchenko S., Bohozhavets O.: "Peculiarities of the Design of Housing Parts of Large Direct Current Machines", SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 17(1):59-72, 2024. (Scopus Q3) https://doi.org/10.4271/05-17-01-0005 .

РОЗДІЛ 3 ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для підвищення точності розрахунків методом скінченних елементів використовується локальне згущення сітки в місцях моделі з наявними дрібними порівняно з основною сіткою деталями. Також подібне згущення сітки з використанням дрібних елементів застосовується в зонах очікуваних концентрацій механічних напружень з метою забезпечення збіжності отриманих результатів. Проте в деяких випадках при практичних розрахунках не вдається отримати очікуваного покращення точності, а навпаки, при зменшенні розміру елементів в певних ділянках моделі (зазвичай в зонах стикування конструктивних елементів під кутом сполучення, відмінним від нуля) значення напружень починають розходитись, але при цьому збіжність результатів для переміщень у цих зонах залишається задовільною. Таке явище має назву сингулярності напружень [1].

Виконання верифікації результатів тривимірного числового моделювання для мінімізації впливу сингулярності була виконана двома незалежними методами:

- метод Hot Spot Stress (HSS) у постановці лінійної поверхневої екстраполяції (LSE);
- метод збіжності за розміром елементів розрахункової сітки.

3.1 Аналіз результатів дослідження НДС елементів конструкції HSS-методом

Достовірність результатів тривимірного числового моделювання, проведеного для модернізованої конструкції станини, може бути підтверджена шляхом їх верифікації за допомогою методу Hot Spot Stress (HSS) у постановці лінійної поверхневої екстраполяції (LSE), що рекомендований міжнародними стандартами для оцінки напруженого стану у зонах концентрації напружень. Використання HSS-методу дозволяє виконати порівняння розподілу напружень, отриманого за допомогою числового моделювання, із результатами додатково

виконаної поверхневої екстраполяції та перевірити збіжність результатів у характерних елементах конструкції.

У даному дослідженні особливу увагу приділено внутрішньому та зовнішньому краям дисків, поперечним ребрам, транспортне "вушкам" та зварним з’єднанням ребер та дисків, оскільки саме ці зони сприймають найбільші навантаження згинання та зрізу. Отримані результати порівняння є основою для оцінки достовірності розроблених методів розрахунку та підтверджують можливість їх застосування для визначення міцності й довговічності станини та інших подібних конструкцій [2-4].

3.1.1 Методика оцінки збіжності визначених механічних напружень HSS-методом

Для мінімізації впливу сингулярності напружень, визначених засобами МСЕ, застосовується метод HSS [5], який дозволяє скоригувати отримані результати та надати їм фізично коректні значення.

Метод базується на проведенні лінійної екстраполяції напружень на поверхні деталі в зоні навколо концентратора напруження. В якості прикладу розглянемо розрахунок НДС моделі з наявним накладним зварним швом (рис. 3.1). В даному випадку розрахункова сітка поблизу зони зварного шва має бути згущена для досягнення розміру елементу не більше половини товщини листа h.

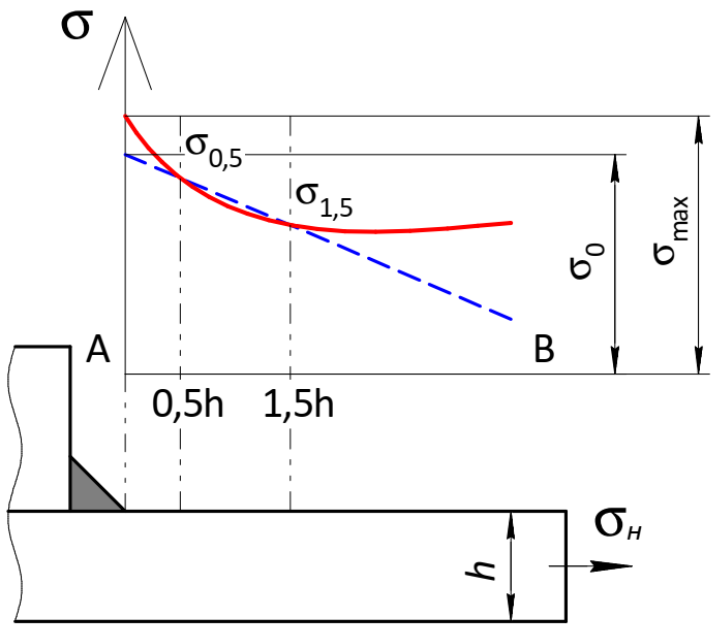


Рис. 3.1 – Застосування HSS-методу для оцінки збіжності результатів визначення механічних напружень в зоні зварного шва

Значення напружень визначаються у точках на відстані 0,5h та 1,5h від межі шва. Лінія екстраполяції (AB) будується перпендикулярно до шва, а розмір елементів сітки обирається таким чином, щоб точки розрахунку напружень $\sigma_{0,5}$ та $\sigma_{1,5}$ відновились до різних елементів сітки.

Номінальні (геометричні) напруження σ_0 в концентраторі визначаються шляхом виконання лінійної інтерполяції за наступною формулою [6]:

$$\sigma_0 = 1,5\sigma_{0,5} - 0,5\sigma_{1,5}$$

3.1.2 Перевірка збіжності механічних напружень в модернізованій станині HSS-методом

Перевірка збіжності отриманих методами тривимірного моделювання механічних номінальних (геометричних) напружень на ділянках станини з піковими навантаженнями HSS-методом виконувалась для модернізованої конструкції станини з двома додатковими поясами кріплень та поперечними ребрами.

Епюра напружень в модернізованій станині під час роботи електродвигуна в номінальному режимі наведена на рис. 3.2, додатково на рисунку вказані ділянки з піковими навантаженнями.

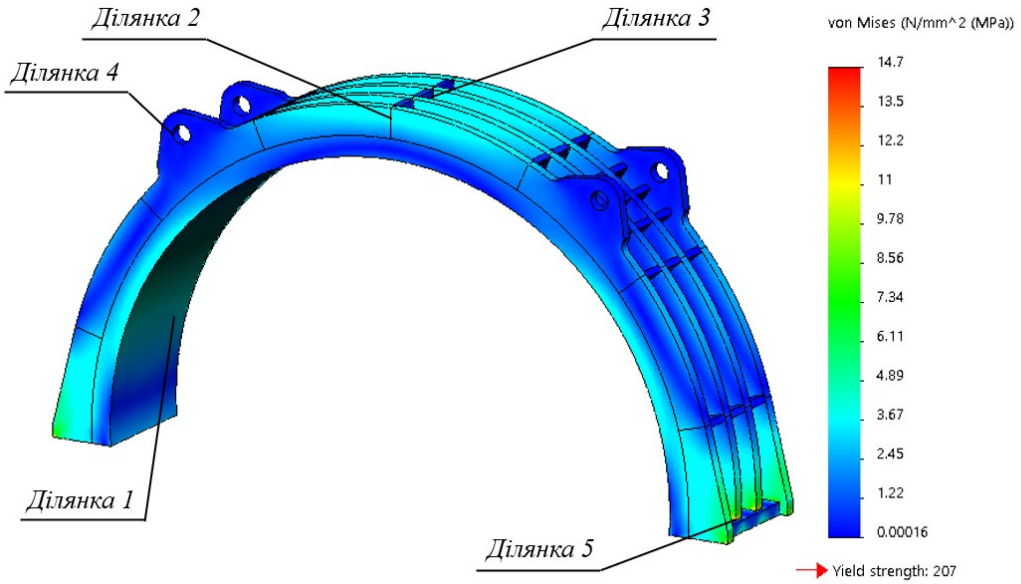


Рис. 3.2 – Епюра напружень модернізованої станини

Епюри напружень ділянок з піковими навантаженнями в модернізованій станині та діаграми перевірки збіжності за HSS-методом визначених напружень, представлені на рис. 3.3…3.12.

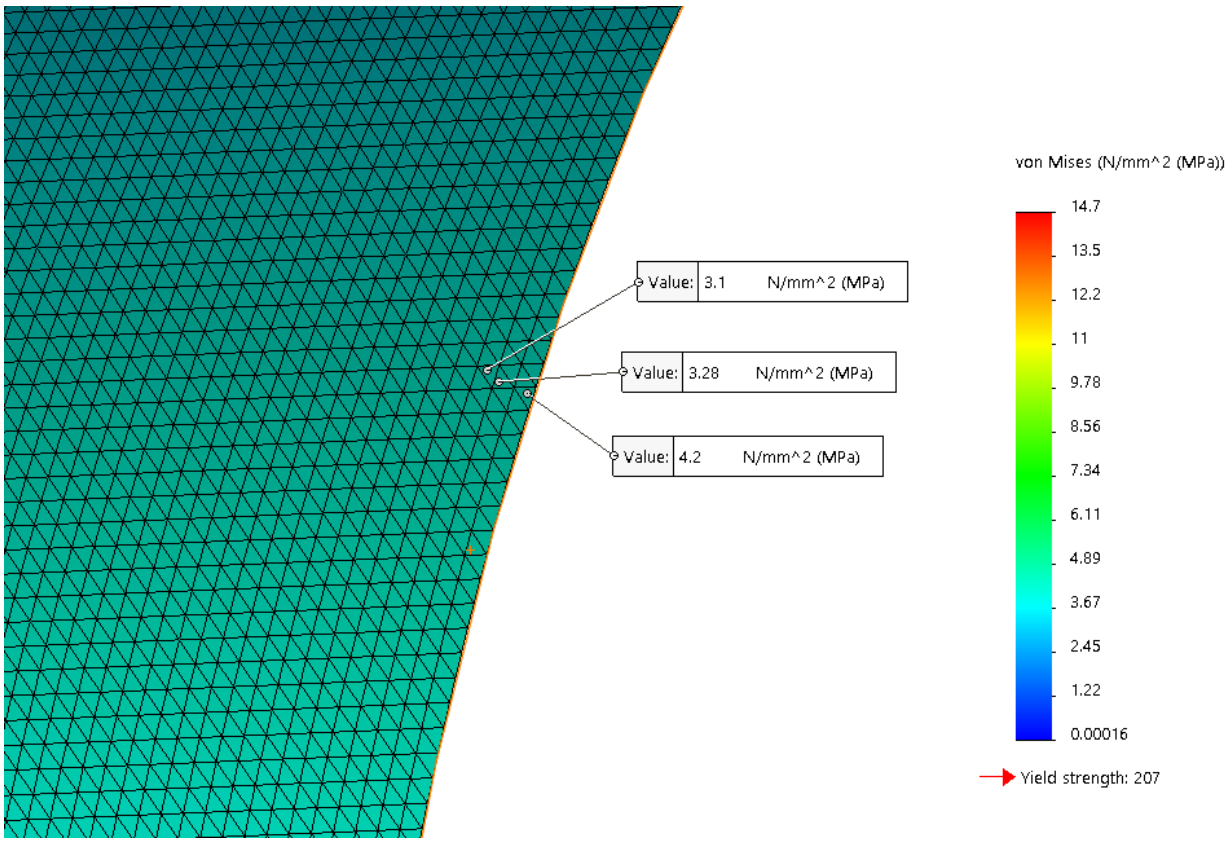


Рис. 3.3 – Локальні значення напружень модернізованої станини для ділянки 1

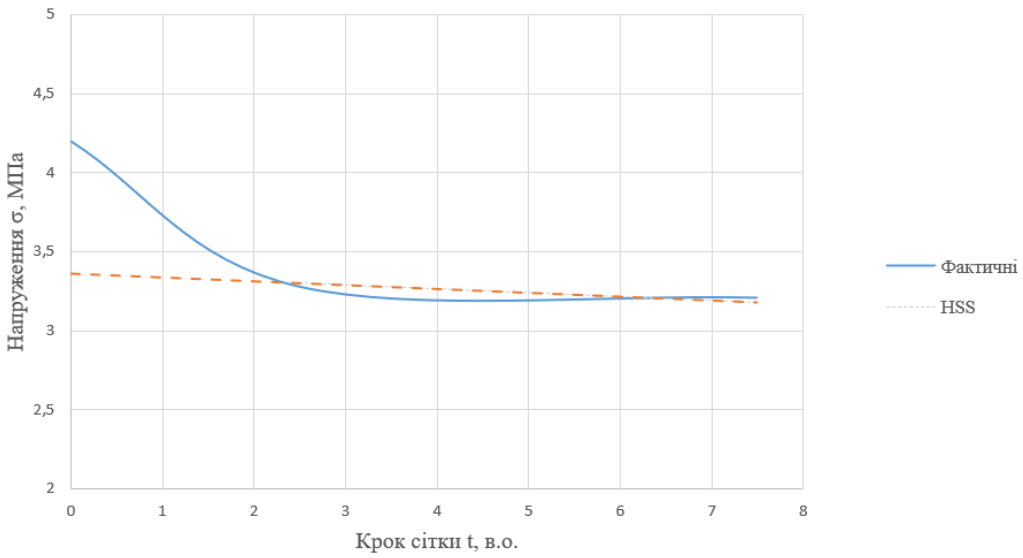


Рис. 3.4 – Діаграма зіставлення визначених геометричних напружень модернізованої станини для ділянки 1

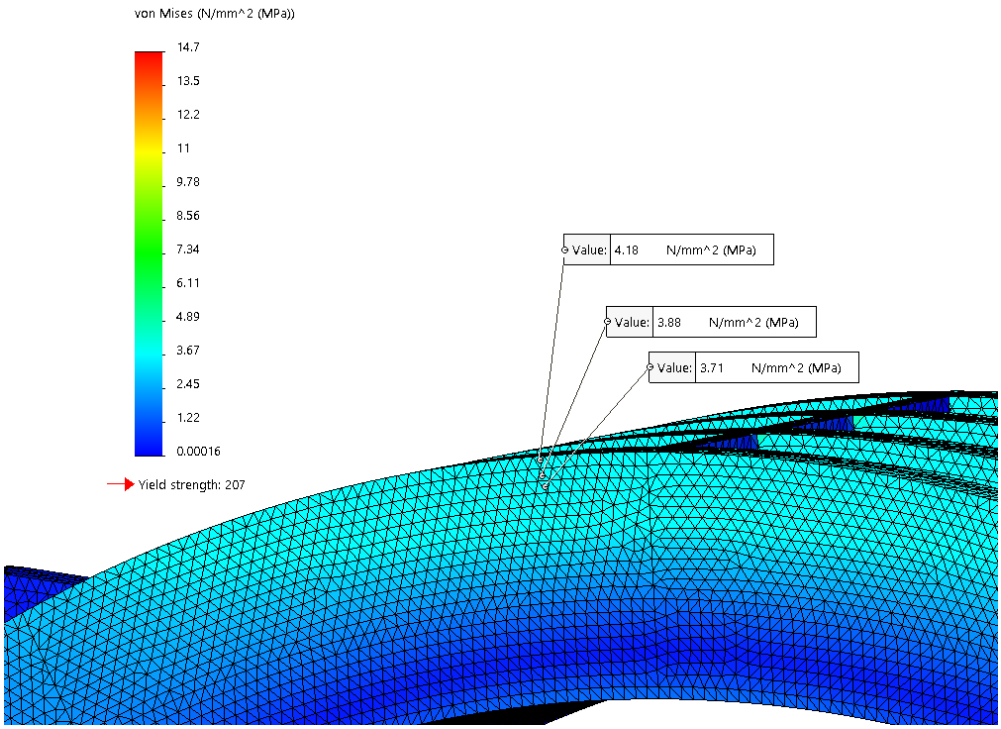


Рис. 3.5 – Локальні значення напружень модернізованої станини для ділянки 2

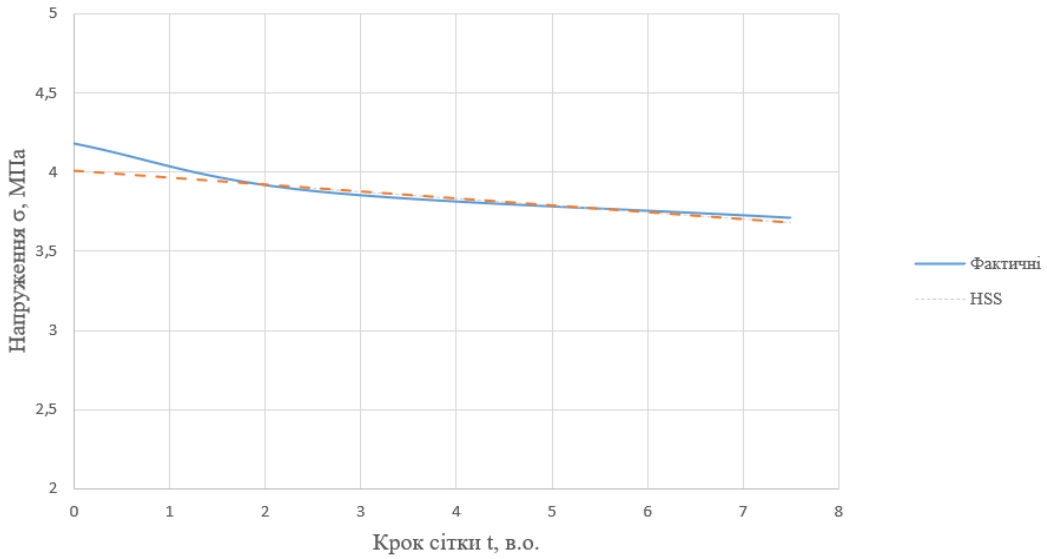


Рис. 3.6 – Діаграма зіставлення визначених геометричних напружень модернізованої станини для ділянки 2

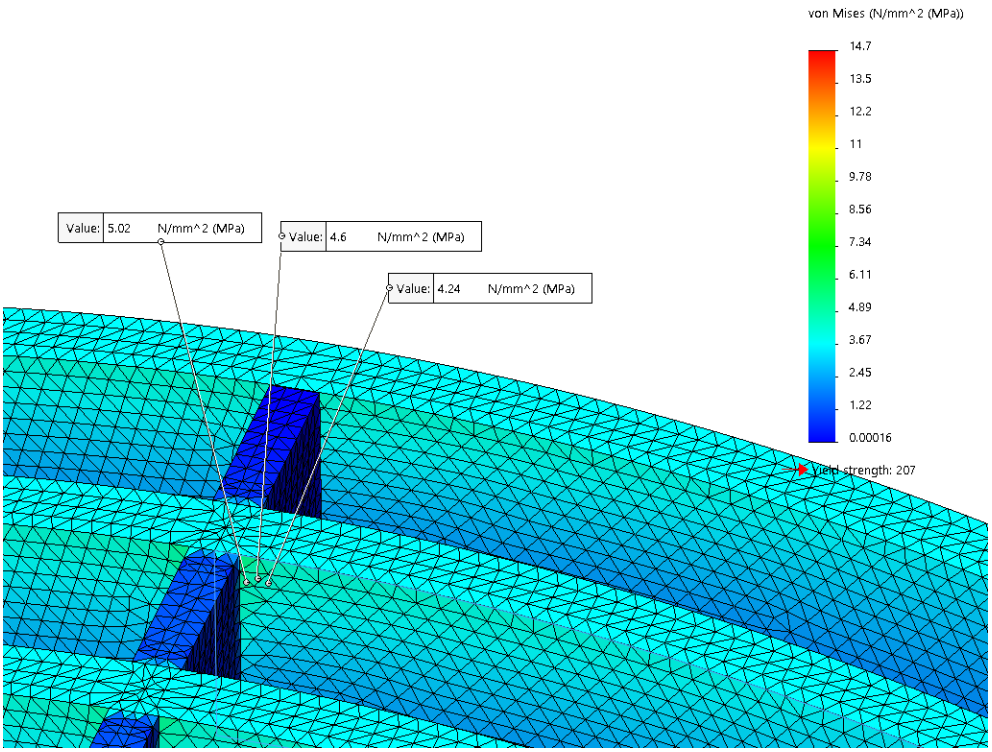


Рис. 3.7 – Локальні значення напружень модернізованої станини для ділянки 3

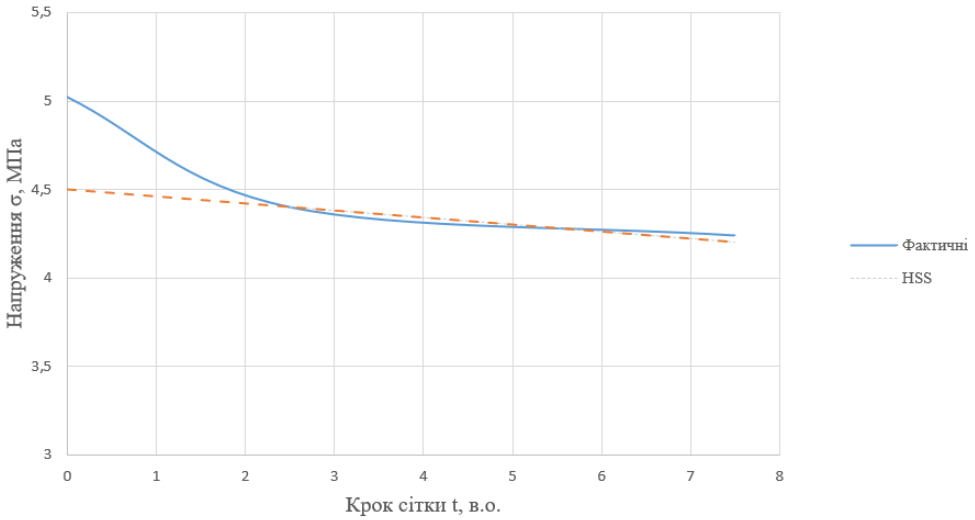


Рис. 3.8 – Діаграма зіставлення визначених геометричних напружень модернізованої станини для ділянки 3

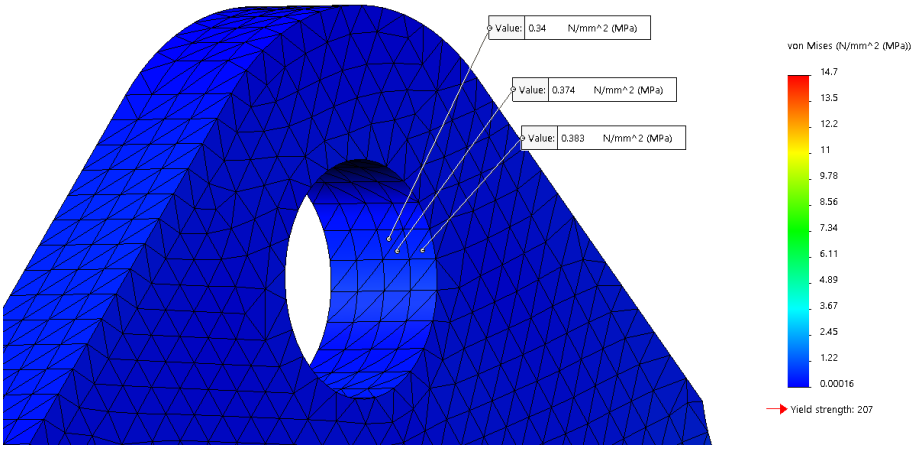


Рис. 3.9 – Локальні значення напружень модернізованої станини для ділянки 4

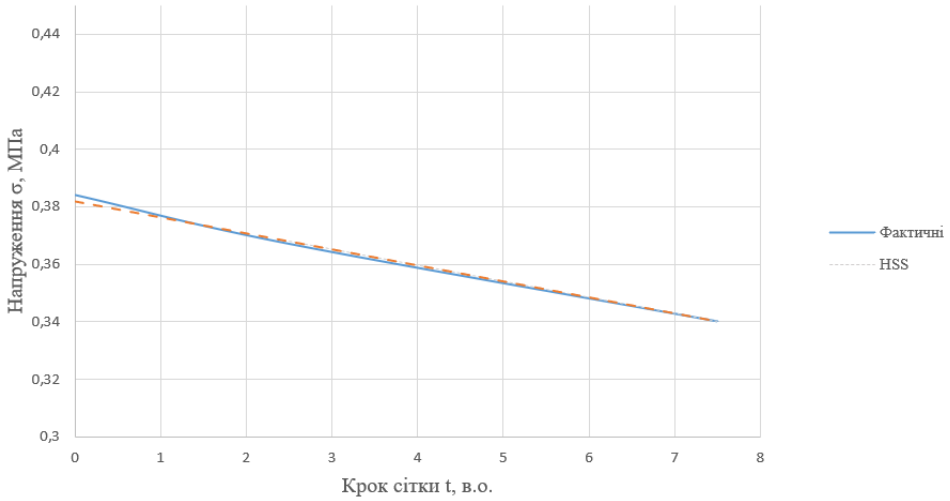


Рис. 3.10 – Діаграма зіставлення визначених геометричних напружень модернізованої станини для ділянки 4

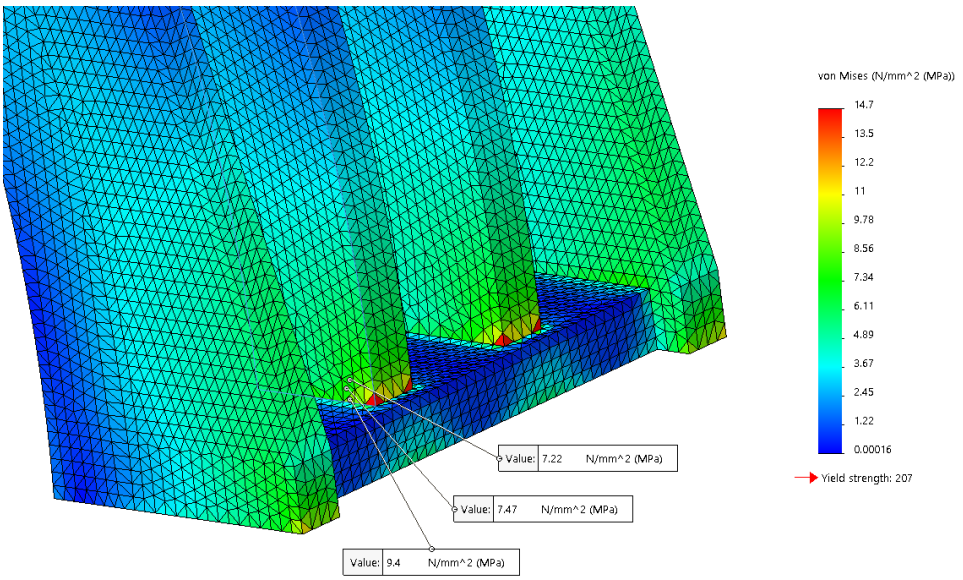


Рис. 3.11 – Локальні значення напружень модернізованої станини для ділянки 5

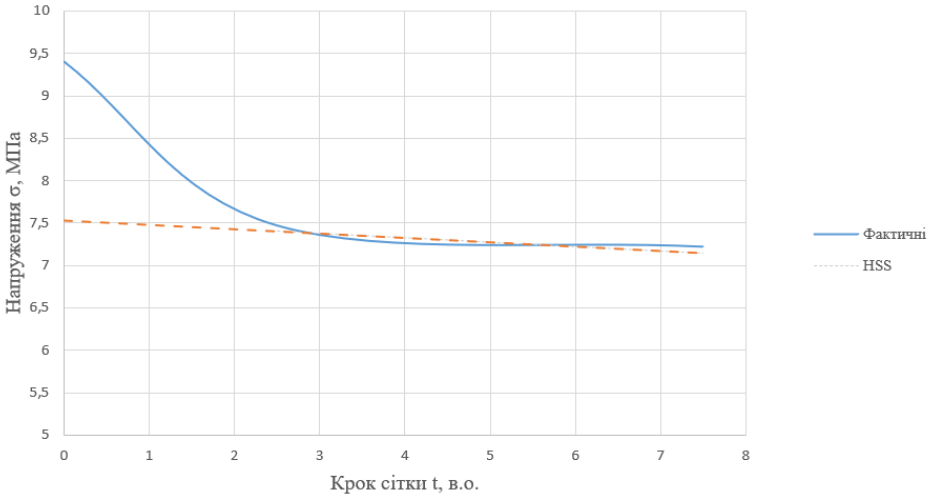


Рис. 3.12 – Діаграма зіставлення визначених геометричних напружень модернізованої станини для ділянки 5

3.1.3 Уточнені запаси міцності елементів конструкції станини

Розрахунки геометричних напружень, обчислених за допомогою розроблених методів тривимірного моделювання, та перевірку їх збіжності HSS-методом були зведені в порівняльну таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Перевірка збіжності напружень елементів станини

Найменування деталей станини	**Напруження, МПа**	
	Запропоновані методи 3D-моделювання	HSS-метод
1. Внутрішній радіус диску	3,28	3,3
2. Зовнішній радіус диску	3,88	3,91
3. Поперечне ребро	4,6	4,65
4. Транспортне вушко	0,367	0,371
5. Зварне з’єднання диску та фланцю	7,47	7,53

Таким чином, збіжність результатів розрахунків механічних напружень елементів станини запропонованими методами тривимірного моделювання з використанням МСЕ становить близько 1 %, що свідчить про високу точність розроблених в роботі методів.

3.2 Аналіз результатів дослідження НДС елементів конструкції методом збіжності за розміром елементів розрахункової сітки

Іншим методом перевірки збіжності результатів чисельних методів аналізу НДС є перевірка шляхом варіювання параметрів розрахункової сітки. Порівняння отриманих результатів для декількох варіантів сітки (за зменшенням або укрупненням елементів) дозволяє оцінити достовірність отриманих результатів та підтвердити стійкість рішення відносно рівня дискретизації [7, 8]. Зазначений підхід є одним із відомих способів верифікації результатів МСЕ, який дозволяє визначити, чи досягнуті фізично коректні значення напружень у критичних зонах конструкції.

Для верифікації результатів даного дослідження було проведено п’ять механічних розрахунків модернізованої конструкції станини з двома додатковими поясами кріплення та поперечними ребрами під час роботи електродвигуна в номінальному режимі з використанням різних розмірів

максимального та мінімального елементів. Максимальний та мінімальний розміри елементів сітки послідовно зменшувались до значень, при яких відносна різниця значень контрольного еквівалентного напруження у двох сусідніх розрахунках стала меншою за 1 %. В якості контрольного еквівалентного напруження було обрано ділянку зварного з'єднання дисків та фланцю (ділянка 5 згідно з рис. 3.2).

В таблиці 3.2 наведено основні параметри розрахункових сіток. Епюри напружень модернізованої конструкції станини з двома додатковими поясами кріплення та поперечними ребрами, які були отримані при розрахунках з різними розмірами максимального елементу сітки наведені на рис. 3.13…3.17.

На діаграмі рис. 3.18 показано залежність значень контрольного еквівалентного напруження від максимального елементу розрахункової сітки.

Таблиця 3.2 – Параметри розрахункової сітки модернізованої станини

Назва параметру	**Значення**				
Тип сітки	Сітка на твердому тілі				
Розбиття, що використовується	Стандартна сітка				
Максимальний розмір елементу, мм	80	60	40	30	20
Мінімальний розмір елементу, мм	8	5	3	2,5	2
Всього вузлів, од.	70758	164396	343952	739568	2190444
Всього елементів, од.	41929	102970	222210	491355	1507785
Відсоток елементів із співвідношенням сторін < 3, %	95,7	97,1	98,4	99,7	99,7
Відсоток елементів із співвідношенням сторін > 10, %	0,0382	0,0175	0,0257	0,0193	0,0097
Напруження в зварному з'єднанні, МПа	8,72	9,01	10,3	11,4	11

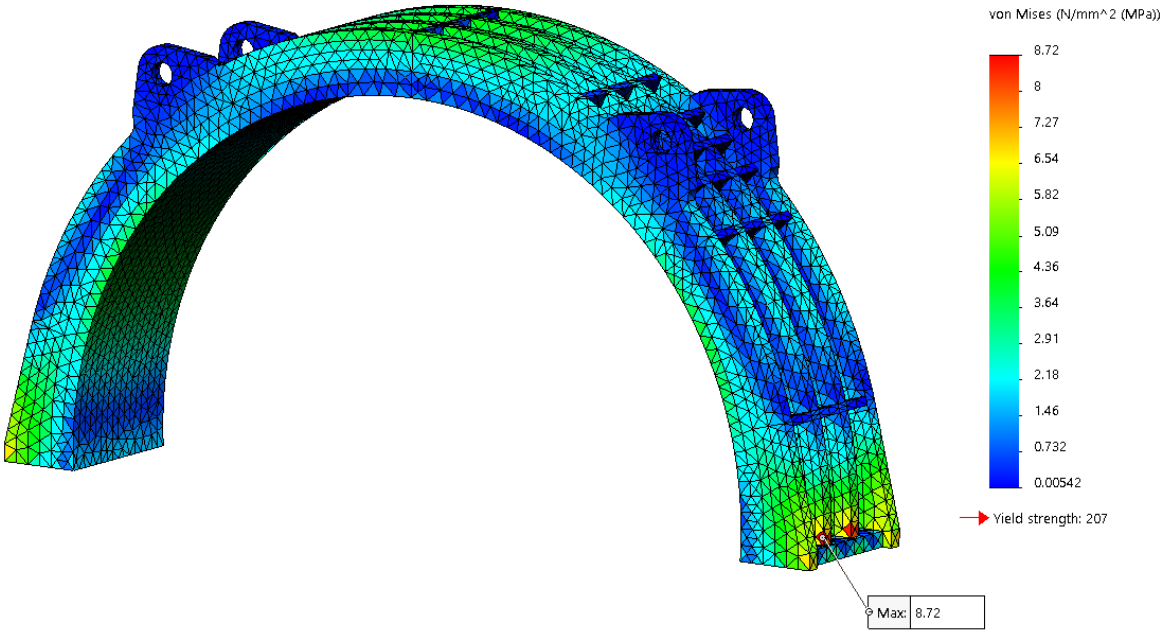


Рис. 3.13 – Епюра напружень в модернізованій станині при номінальних навантаженнях (напруження в контрольній ділянці 8,72 МПа, розмір максимального елементу 80 мм)

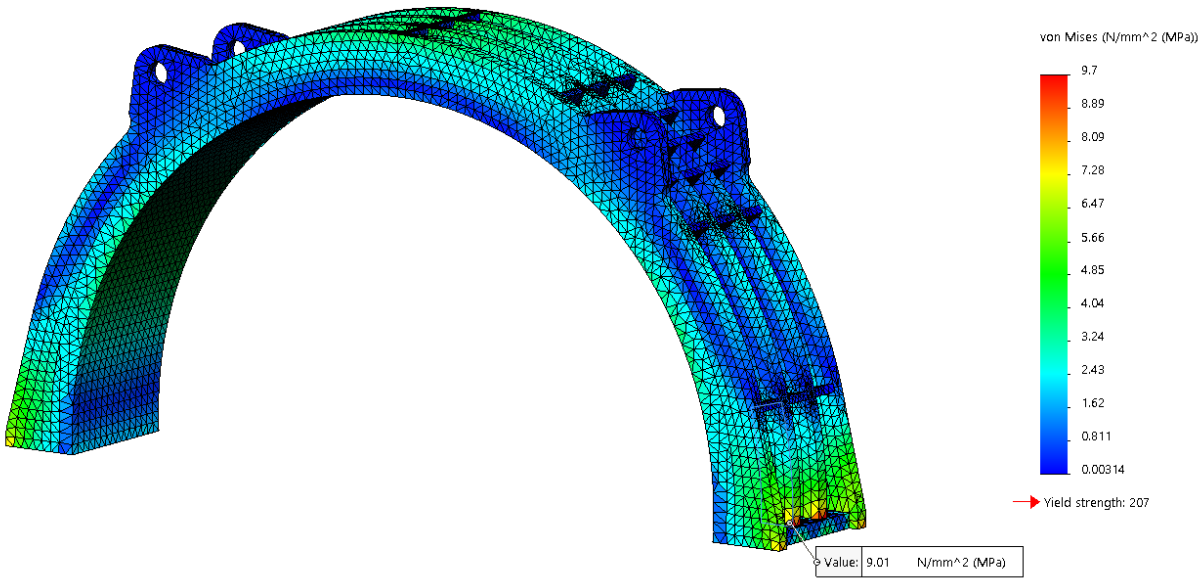


Рис. 3.14 – Епюра напружень в модернізованій станині при номінальних навантаженнях (напруження в контрольній ділянці 9,01 МПа, розмір максимального елементу 60 мм)

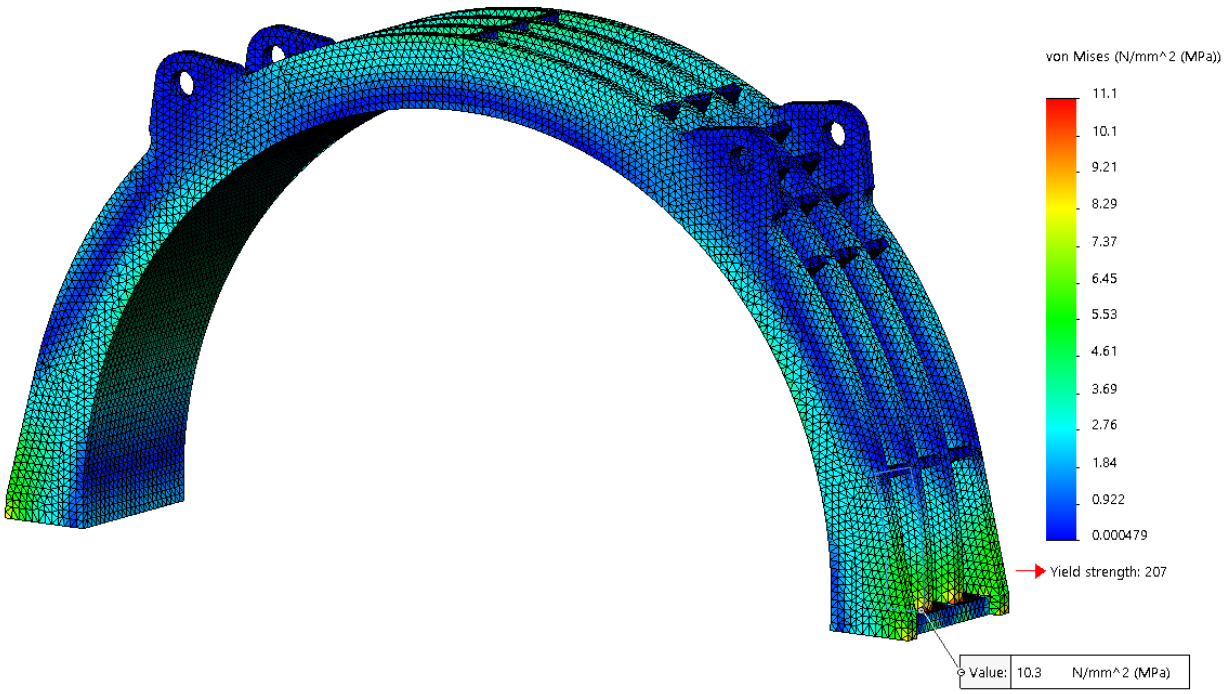


Рис. 3.15 – Епюра напружень в модернізованій станині при номінальних навантаженнях (напруження в контрольній ділянці 10,3 МПа, розмір максимального елементу 40 мм)

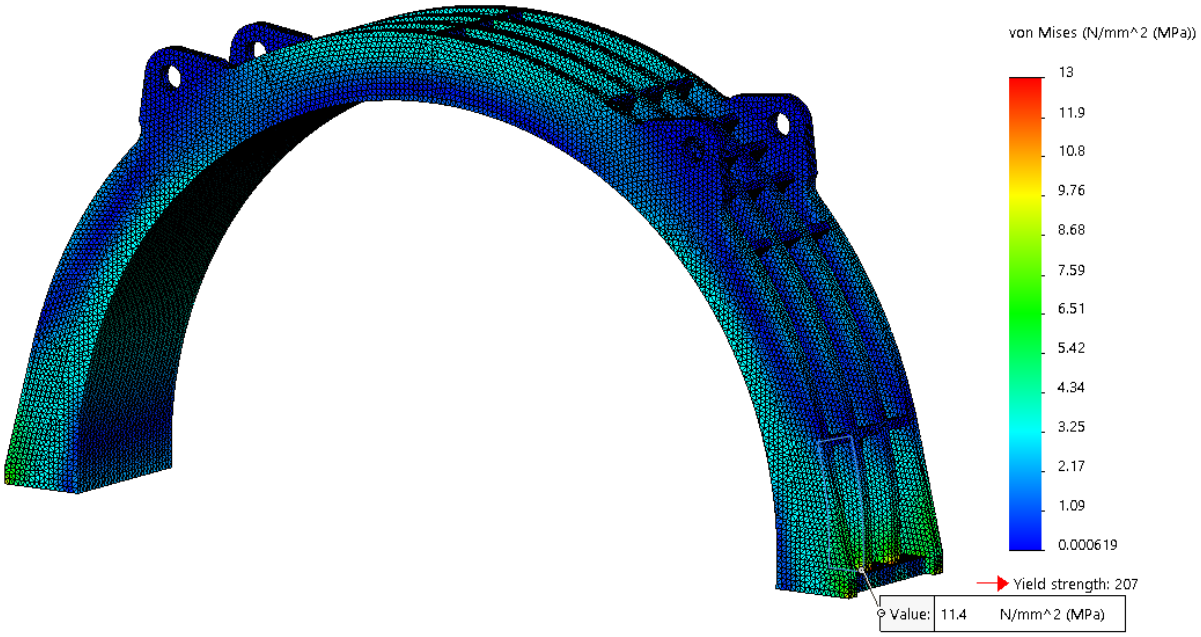


Рис. 3.16 – Епюра напружень в модернізованій станині при номінальних навантаженнях (напруження в контрольній ділянці 11,4 МПа, розмір максимального елементу 30 мм)

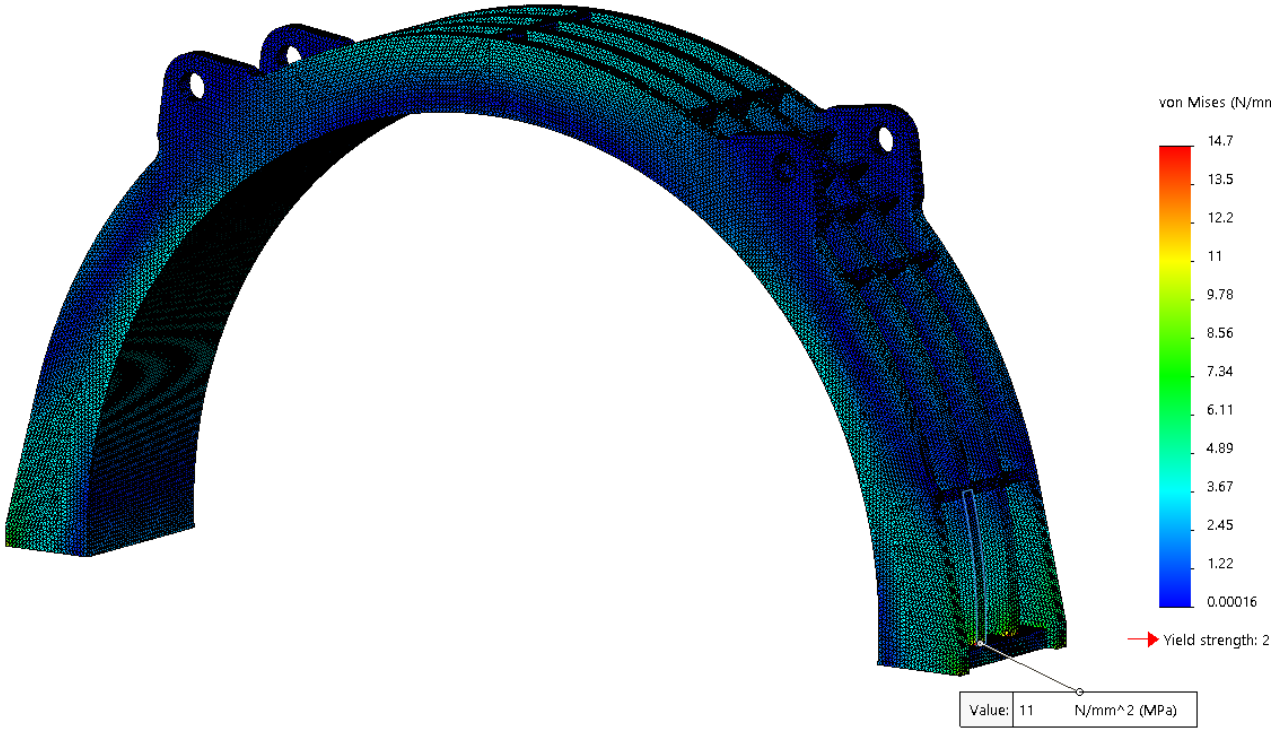


Рис. 3.17 – Епюра напружень в модернізованій станині при номінальних навантаженнях (напруження в контрольній ділянці 11 МПа, розмір максимального елементу 20 мм)

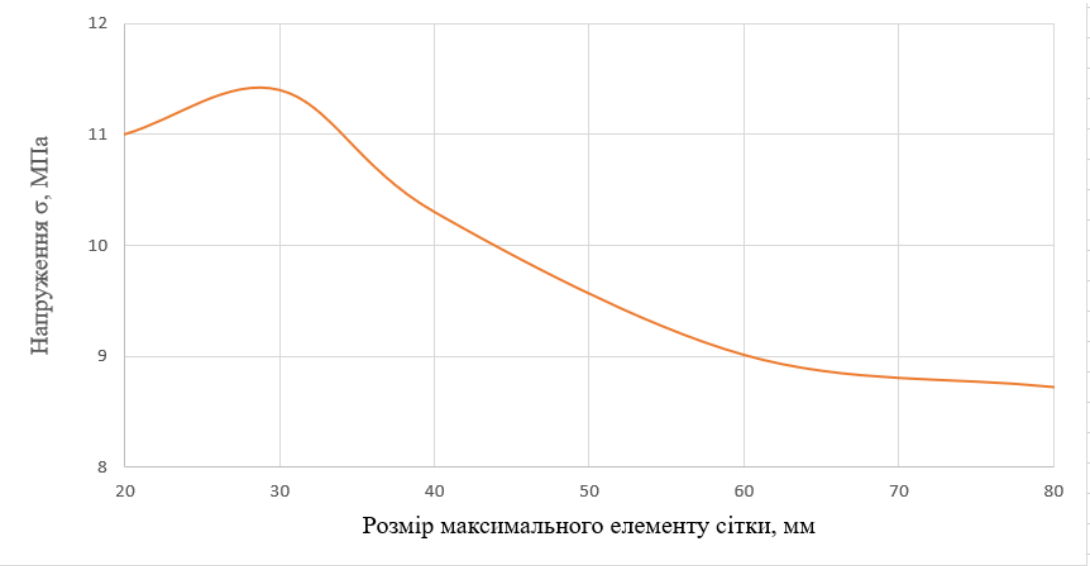


Рис. 3.18 – Залежність значень контрольного еквівалентного напруження від максимального елементу розрахункової сітки.

3.3 Висновки до третього розділу

Верифікація результатів тривимірного моделювання НДС модернізованої станини з двома додатковими поясами кріплень та ребрами була виконана двома незалежними способами: методом HSS у постановці лінійної поверхневої екстраполяції та за допомогою дослідження збіжності за розміром елементів розрахункової сітки.

Застосовані методи верифікації дозволити підтвердити коректність прийнятої розрахункової моделі та методики оцінки НДС модернізованої станини. Отримані результати верифікації засвідчують високу точність методики розрахунку НДС станини. Значення напружень та переміщень в критичних зонах задовольняють вимогам щодо допустимих рівнів для вибраного матеріалу конструкції у всіх розглянутих випадках навантажень: як при роботі електродвигуна, так і в процесі виконання технологічних операцій з підйому та кантування станини.

Наведена верифікація результатів підтверджує адекватність розробленої методики та прийнятих конструктивних рішень та може слугувати підставою для використання отриманої моделі у подальшому інженерному проєктуванні та експлуатаційній діагностиці модернізованої станини та подібних конструктивних елементів електричних машин.

3.4 Література до третього розділу

1. Zhao W., Ji S. Mesh Convergence Behavior and the Effect of Element Integration of a Human Head Injury Model. Ann Biomed Eng. 2019. Vol. 47, №2. pp. 475-486. https://doi.org/10.1007/s10439-018-02159-z ;

2. Csaki E. Mathematical Statistics. In: Horváth, J. (eds) A Panorama of Hungarian Mathematics in the Twentieth Century I. Bolyai Society Mathematical Studies. Springer, Berlin, Heidelberg. 2006. Vol 14. pp. 491-521. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-30721-1_16 ;

3. Milovanović, M.: The Measurement Problem in Statistical Signal Processing. Mathematics. 2023. Vol. 11, №22, 4623.

https://doi.org/10.3390/math11224623 ;

4. Birolini A. Basic Mathematical Statistics. In: Reliability Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, 1999. pp. 435-464. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03792-8_16 ;

5. Bannikov D., Huslista A.E. Correcting accounting results of tensions using FEM by HSS method. Science and Transport Progress Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. 2011. Vol. 38, №38.PP. 134-141. http://dx.doi.org/10.15802/stp2011/6824 ;

6. Кобзар І., Полієнко В., Гнитько О., Третяк О.: Динаміка і міцність корпусів та опорних елементів конструкції гідрогенераторів. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2021. Вип. 1. с. 19-24, https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.01.03 ;

7. Chirkov A. Змішане формулювання методу скінченних елементів у теорії пружності з градієнтом деформації. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2025. Vol. 3. pp. 61-70. https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.03.0611 ;

8. What is Convergence in Finite Element Analysis? SimScale. SimScale. URL: https://www.simscale.com/blog/convergence-finite-element-analysis/ .

РОЗДІЛ 4 ВПРОВАДЖЕННЯ ТА СТВОРЕННЯ МЕТОДІВ ВИПРОБУВАНЬ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

В даний час в Україні проходять процеси відміни застарілих стандартів та впровадження нових європейських норм для великої номенклатури виробів різних галузей виробництва, в тому числі для електромашинобудівної промисловості.

В зв’язку з тим, що досліджуваний двигун призначений для постачання до країни члена Європейського Союзу, то для втілення автором представлених конструктивних та технологічних рішень була вперше розроблена оновлена програма іспитів, що поєднує в собі вимоги норм Європейських норм EN та підтверджується українськими стандартами ДСТУ.

Далі розглянуті порядок проведення випробувань, які забезпечують об’єктивну оцінку якості та працездатності електричних машин постійного струму після їх виготовлення, а також методи, засоби та умови випробувань та вимірювань відповідно до вимог сучасних стандартів.

Технічні параметри, що підлягають перевірці, для конкретних типів електричних машин як правило наведені у програмі випробувань на ці машин, що створюється на основі вимог стандартів та в деяких випадках на базі вимог замовника електричної машини, що враховує особливості її призначення та місця експлуатації [1, 2].

Електричні машини можуть піддаватися наступним видам випробувань:

- приймально-здавальним;
- приймальним (кваліфікаційним);
- періодичним;
- типовим.

Метою випробувань є перевірка відповідності електродвигуна вимогам стандартів, в першу чергу ДСТУ IEC 60034-1 [3], СОУ-Н ЕЕ 20.302 [4], а також вимогам комплекту конструкторської документації, та контрактних вимог замовника.

Випробування матеріалів, заготовок та покупних вузлів, що використовуються при виготовленні електричних машин, виконуються в основному безпосередніми постачальниками матеріалів та відображені у сертифікатах, що перевіряються під час вхідного контролю.

Проміжні контрольні операції, випробування та вимірювання, можуть бути не вказані в основній програмі випробувань, при цьому вони мають виконуватися відповідно до вимог креслень та технологічних процесів та бути оформлені відповідними актами перевірок.

Приймально-здавальні випробування за складеною програмою випробувань проводяться персоналом заводу-виробника, для окремих перевірок може бути передбачена участь у випробуваннях представників замовника.

Приймальні випробування проводять визначення відповідності дослідного зразка вимогам технічного завдання або інших контрактних документів, а також під час освоєння виробництва новим виробником, за програмою, затвердженої міжвідомчою комісією.

Кваліфікаційні випробування електричної машини із настановної серії (першої промислової партії) проводяться з метою визначення готовності виробництва до серійного (масового) випуску продукції на підставі відпрацьованого виробничого процесу, що забезпечує стабільну якість продукції.

Кваліфікаційні випробування допускається поєднувати з приймальними.

Періодичні випробування проводять з метою оцінки відповідності електричних машин вимогам нормативно-технічної документації, а також стабільності показників якості продукції, випущеної за певний період.

Періодичні випробування проводять на електричних машинах серійного виробництва, яка правило один раз на два роки, якщо інший термін не обумовлений у відповідних технічних умовах. Для випробувань представник замовника вибирає один електродвигун з числа тих, що пройшли приймально-здатні випробування та визнаних придатними.

Якщо при періодичних випробуваннях серійна електрична машина не

відповідає вимогам одного з пунктів програми випробувань, то випробування повинні проводитися повторно на подвоєній кількості електричних машин.

Якщо при повторних періодичних випробуваннях виявиться, що хоча одна електрична машина не відповідає одному з пунктів програми випробувань, то випуск таких машин повинен бути припинений до отримання задовільних результатів випробувань.

Типові випробування проводять після внесення змін у конструкцію, використовуваних матеріалів або технологію виготовлення електричної машини для оцінки ефективності та доцільності змін, що вносяться.

4.1 Загальні вимоги до умов, забезпечення і проведення випробувань

4.1.1 Умови пред'явлення електричної машини на випробування

Для проведення приймально-здавальних випробувань пред'являється електрична машина разом з обладнанням допоміжних систем (за наявності) та комплектом ЗІП (за наявності) відповідно до відомості комплекції, опитувального листа або рекомендованої специфікації.

Разом із обладнанням електричної машини на випробування пред'являються такі документи:

- комплект конструкторської документації (включаючи креслеників, схеми, технічний опис), інструкція з монтажу та настанова з експлуатації;

- технічні умови підприємства-виробника на електричну машину (за наявності);

- паспорт на пред'явлену електричну машину з відміткою про приймання ВТК заводу-виробника;

- паспорти на комплектуючу апаратуру та покупні вузли;

- протоколи заводських визначальних контрольних операцій та випробувань, що були проведені під час виготовлення електричної машини на заводі.

4.1.2 Вимоги до умов та засобів проведення випробувань

Випробування електричної машини повинні проводитися в закритому опалюваному приміщенні. Приміщення має бути обладнане вантажопідйомними механізмами для розвантаження-завантаження та переміщення обладнання під час випробувань. У приміщенні повинна бути можливість підключення випробувальних установок до мережі змінного струму 380/220 В. Приміщення має відповідати вимогам відповідних стандартів з техніки безпеки.

Випробування та вимірювання електродвигунів необхідно проводити за нормальних умов навколишнього середовища (якщо випробування не потребує специфічних умов) згідно вимог ДСТУ IEC 60034-1 та СОУ-Н ЕЕ 20.302:

- температура навколишнього повітря плюс 25 ± 10 °С;
- атмосферний тиск від 84 до 106 кПа;
- відносна вологість повітря від 45 до 80 %.

У разі коли умови при проведенні випробувань відрізняються від зазначених, в результати вимірювань вносяться поправки, якщо це передбачено методом випробувань.

Випробувальні установки, вимірювальні прилади та інструменти, що використовуються при випробуваннях електричних машин, повинні бути справними, відповідати всім вимогам безпеки, бути повіреними в установленому порядку та мати відповідні сертифікати.

Перед проведенням випробувань вимірювальні прилади мають бути відкалібровані.

Випробування електричних машин, пов'язані з включенням до мережі, повинні проводитись на спеціальному заводському стенді. Потужність мережі живлення повинна бути достатньою для пуску і роботи двигуна у зазначених в програмі випробувань режимах. Повинна бути забезпечена працездатність допоміжних систем електричної машини (змащування, охолодження, тепловий контроль та ін.).

4.1.3 Вимоги до підготовки та завершення випробувань

Перед початком приймально-здавальних випробувань електрична машина має бути доставлена на місце випробувань та встановлена на рівну тверду поверхню.

Устаткування електричної машини повинно бути звільнене від транспортного пакування, при цьому необхідно, по можливості, забезпечити збереження елементів пакування для подальшого використання. Складові частини електричної машини мають бути розконсервовані (видалені мастило, обгортковий матеріал, тощо).

Після розпакування та розконсервації електричну машину необхідно встановити на випробувальний стенд та надійно закріпити. Допоміжне обладнання має бути змонтоване та підключене відповідно до вимог конструкторської документації, інструкції з монтажу та настанови з експлуатації.

Після закінчення випробувань повинні бути відключені всі випробувальні установки, демонтовані всі допоміжні ланцюги та пристрої, встановлені на штатне місце всі зняті на час випробувань елементи конструкції електродвигуна.

Після успішного завершення приймально-здавальних випробувань електродвигун та допоміжне обладнання мають бути законсервовані та упаковані, також має бути проведене транспортне маркування.

4.1.4 Вимоги до персоналу, що здійснює випробування

До підготовки та проведення випробувань електричних машин допускається професійно підготовлений електротехнічний персонал, який задовольняє наступним вимогам:

- має відповідні знання з устрою та принципу дії електричної машини та його допоміжних систем;

- пройшов навчання та атестований за загальними правилами техніки безпеки, правилами пожежної безпеки, правилами безпеки при обслуговуванні електроустановок, має кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче III для

членів бригади та не нижче IV – для керівника робіт, що підтверджується відповідним посвідченням встановленої форми;

- керівник робіт повинен мати відмітку в посвідченні на право проведення високовольтних випробувань;

- принаймні один із членів бригади повинен бути атестований на право проведення робіт з вантажопідйомними механізмами та мати посвідчення стропальника.

Перед початком робіт весь персонал, який бере участь у випробуваннях, включаючи членів комісії, повинен вивчити програму випробувань та розписатися в аркуші ознайомлення.

Безпосередньо на місці проведення випробувань, весь персонал повинен пройти інструктаж з правил техніки безпеки, правил пожежної безпеки із записом у журналі інструктажів.

4.1.3 Похибки вимірювання

Допустимі похибки вимірювання електричних параметрів електродвигуна, що залежать від класу точності вимірювальних приладів, наведені в Таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Допустимі похибки вимірювання електричних параметрів

Параметр	**Допустима похибка**	**Примітки**
Напруга, В	±1 %	
Струм, А	±1 %	
Частота, Гц	±0,1 %	Для машин змінного струму
Активна потужність, Вт	±1,5 %	
Коефіцієнт потужності (cos φ), в.о.	±0,01 в.о.	Для машин змінного струму
Опір обмоток, Ом	±1 %	При 20 °С
Опір ізоляції, МОм	±10 %	В залежності від температури

Абсолютна похибка для приладів з класом точності, що нормується за діапазоном вимірювання, розраховується за формулою

$$\Delta X = \pm\left(\frac{K \cdot X_N}{100}\right), \tag{4.1}$$

де К – клас точності приладу;

X_N – верхня межа діапазону вимірювання.

Для приладів з класом точності, що нормується за відносною похибкою δ (± %), абсолютна похибка залежить від поточного значення виміряної величини X та розраховується за формулою

$$\Delta X = \pm\left(\frac{K \cdot X}{100}\right). \tag{4.2}$$

У разі використання вимірювальних трансформаторів (струму та напруги) загальна похибка вимірювання збільшується. Наприклад, для вимірювального трансформатора струму та амперметра сумарна похибка буде розраховуватися за формулою

$$\Delta_{сум} = \sqrt{\Delta_{TT}^2 + \Delta_A^2}, \tag{4.3}$$

де Δ_{TT}, Δ_A – гранично допустимі похибки за класом точності відповідно трансформатора струму та амперметру, %.

Допустимі похибки вимірювання механічних параметрів електричної машини, що залежать від класу точності вимірювальних приладів, наведені в Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Допустимі похибки вимірювання механічних параметрів

Параметр	**Допустима похибка**
Крутний момент, Н·м	±1 %
Віброшвидкість, мм/с	±1 %
Віброприскорення, мм/с^2	±1 %
Рівень шуму, дБА	±1 дБА

4.2 Випробування машин постійного струму

Для машин постійного струму стандарт ДСТУ IEC 60034-1 регламентує наступну програму приймальних випробувань:

- вимірювання опору ізоляції обмотки відносно корпусу машини і між обмотками і опором обмоток при постійному струмі в практично холодному стані;

- випробування машину при підвищеній частоті обертання;

- випробування ізоляції обмоток на електричну міцність відносно корпусу машини та між обмотками та електричну міцність міжвиткової ізоляції обмоток;

- визначення струму збудження генератора або частоту обертання двигуна при холостому ході (для двигунів з послідовним збудженням – при незалежному збудженні);

- визначення характеристики холостого ходу;

- перевірка комутації при номінальному навантаженні і короткочасному перевантаженні по струму (для машин потужністю понад 500 кВт допускається проводити ці випробуванням у режимі короткого замикання);

- визначення зовнішньої характеристики генератора або механічну (швидкісну) характеристику двигуна та регулювальну характеристику генератора або двигуна;

- випробування машини на нагрівання;

- визначення діапазону роботи без іскріння (для машин з додатковими полюсами);

- визначення коефіцієнту корисної дії;

- вимірювання вібрації, биття колектора;

- вимірювання рівня радіоперешкод;
- вимірювання шуму.

4.2.1 Перевірка стану обмоток і колектора до початку випробувань

До початку випробувань машин постійного струму слід перевірити відповідність з'єднань обмоток машини конструкторській документації та стан колектора.

Перевірка правильності з'єднання обмоток між собою в зібраній та підготовленій до випробування машині полягає у визначенні правильності позначень виводів всіх обмоток та правильності з'єднання цих обмотки між собою.

При цьому принципово поняття початок та кінець для обмоток машин постійного струму достатньо умовні. Тому визначення початку обмотки зазвичай визначається на наступним принципом: якщо дивитися на машину з боку приводного кінця валу (а в машинах з двома приводними кінцями валу – з боку, протилежного колектору), то при роботі машини в режимі двигуна та обертанні її за годинниковою стрілкою струм у всіх обмотках повинен протікати від початку до кінця.

Початком обмотки якоря вважається та частина обмотки, яка з'єднана зі щітками полярності, приєднаними до позитивного проводу мережі (це правило справедливо для генератора і двигуна). Щітки на колекторі зазвичай розміщуються приблизно проти середини головних полюсів, полярність щіток відносно полярності головних полюсів в залежності від вибраної схеми обмотки якоря та напрямку обертання наведена в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Визначення полярності щіток

Тип обмотки якоря	Позначення полярності щітки при обертанні			
	За годинниковою стрілкою		Проти годинникової стрілки	
	Полюс N	Полюс S	Полюс N	Полюс S
Петлева прямоходова	+	–	–	+
Петлева зворотноходова	–	+	+	–
Хвильова прямоходова	–	+	+	–
Хвильова зворотноходова	+	–	–	+

Полярність додаткових полюсів має відповідати наступному правилу: за напрямком обертання двигуна після кожного головного полюса слідує додатковий полюс тієї ж полярності, а в генераторах – додатковий полюс протилежної полярності.

Правильність з'єднання обмоток можна перевірити також наступним чином: при збереженні напрямку обертання машини при переході від режиму роботи двигуна до генератора або назад струм у якорі та в обмотках послідовного ланцюга повинен змінити напрямок, а в обмотках паралельного або незалежного збудження зберегти напрямок; при зміні напрямку обертання та збереженні режиму роботи машини (генератор або двигун) струм має змінити напрям або в послідовному ланцюзі, або в обмотках паралельного чи незалежного збудження.

Перевірка стану поверхні колектора перед початком випробувань машини і, за необхідністю, у процесі випробувань є вкрай важливою та відповідальною операцією. При цьому перевіряються наступні фактори:

- правильність циліндричної форми поверхні, тобто прямолінійність утворюючих ліній циліндру;

- відсутність биття щіток через ексцентричність поверхні колектора, яка може виникнути від неправильного центрування при обточуванні колектора, виступу або провалу окремих колекторних пластин;

- відсутність виступів ізоляції між пластинами за робочу поверхню колектора;

- відсутність стружки, сторонніх предметів, пилу в проміжках між пластинами;

- відсутність на пластинах гострих країв, задирок.

Після припрацювання поверхні колектора зі щітками необхідно перевірити шорсткість поверхні відповідно до вимог технічної документації.

4.2.2 Перевірка якості складання машини та встановлення щіток у нейтральне положення

Перед випробуваннями машини постійного струму крім перевірки стану обмоток і колектора зазвичай виконується перевірка якості збирання, в тому числі:

- відповідність встановлювальних розмірів вимогам креслення;

- рівномірність повітряного зазору між головними і додатковими полюсами і якорем;

- рівномірність розстановки полюсів по колу магнітної системи і щіток по колу колектора;

- сила натискання на щітки;

- відстань від нижньої кромки щіткотримачів до робочої поверхні колектора;

- аксіальна симетрія осердя якоря та полюсів.

Величину повітряного зазору зазвичай вимірюють за допомогою щупів під серединою кожного полюса, при цьому якщо довжина осердя якоря перевищує 300 мм, тоді рекомендується проводити вимірювання з обох торців машини. Якщо вимірювання повітряного зазору ускладнене через конструктивні особливості машини, наприклад при наявності склобандажу на якорі, то допускається визначення повітряного зазору проводити за різницею діаметрів полюсної системи та якоря. Для машин з ексцентричним зазором зазвичай проводиться вимірювання лише мінімального зазору.

Перевірка форми зовнішньої поверхні якоря та магнітної системи виконується одночасно шляхом поступового провертання якорю на рівні частини обороту (зазвичай на один полюсний поділ) та фіксації у кожному з кутових положень повітряного зазору під одним з полюсів (для перевірки форми зовнішньої поверхні якоря) та повітряного зазору в одній точці якоря (для визначення форми внутрішньої поверхні магнітної системи). Якщо таке поступове провертання якоря важко здійснити, допускається вимірювання повітряного зазор під усіма полюсами при двох діаметрально протилежних кутових положеннях якоря відносно магнітної системи.

Перед початком випробувань також перевіряється встановлення щіток у нейтральне положення, тобто таке положення щіток, при якому напруга на них за відсутності навантаження якорі приймає максимально можливе значення. Встановлення щіток в нейтральне положення виконується одним з наступних методів: індуктивним методом при нерухомому якорі або методом реверсування при роботі машини під навантаженням.

Індуктивний метод заснований на тому, що при знаходженні щіток на нейтралі ЕРС, що наводиться в обмотці нерухомого якоря, повинна дорівнювати нулю. Тому якщо при нерухомому якорі щітки різної полярності з'єднати з чутливим магнітоелектричним приладом (краще з нулем посередині шкали), а обмотку головних полюсів короткочасно підключати до джерела постійного струму, то при положенні щіток, що відповідає нейтралі, стрілка прибору не повинна відхилятися або відхилення повинні бути мінімальними та направлені у різні боки. Для знаходження нейтрального положення щітки попередньо встановлюються проти середини головних полюсів, а потім, регулюючи їх положення та спостерігаючи за відхиленнями стрілки згаданого приладу, знаходиться позиція щіток з мінімальними відхиленнями. Досвід повторюється при встановленні якоря різні кутові положення по відношенню до полюсів.

Метод реверсування полягає у тому, що при роботі машини під навантаженням положення щіток, що відповідає нейтралі, визначається шляхом змінення напрямку обертання машини.

Для двигунів постійного струму при постійній напрузі, струмі навантаження та струмі збудження щітки пересуваються таким чином, щоб досягти практично постійної частоти обертання при реверсуванні; це положення щіток буде відповідати нейтральному. Як правило такий дослід проводиться за номінальної частоти обертання.

Для генераторів постійного струму при незмінній частоті обертання, струмі навантаження та струмі збудження при положенні щіток, що відповідає нейтралі, напруга на затискачах генератора при реверсуванні має практично не змінюватися. При цьому живлення обмотки збудження має бути незалежним.

У машин зі змішаним збудженням, як відомо, обмотки збудження можуть створювати однонаправлені або зустрічні магнітні потоки. В процесі пошуку нейтрального положення щіток в машинах зі змішаним збудженням методом реверсування необхідно зберігати систему збудження (тобто однонаправлений або зустрічний напрямок магнітних потоків обмоток збудження), проте при цьому допускається відключення послідовної обмотки.

Остаточно щітки в нейтральне положення мають бути встановлені після припрацювання щіток до контактної поверхні колектора.

4.2.3 Вимірювання опору обмоток постійному струму

Вимірювання омічного опору обмоток постійному струму проводиться, як правило, мікроомметром (з класом точності не нижче 0,05) або методом вольтметра та амперметра.

Практично холодним станом обмотки називається такий стан, при якому температура будь-якої частини електричної машини відрізняється від температури навколишнього середовища не більше ніж ± 3 ºС.

При вимірі опору обмоток кожен опір має бути виміряний не менше трьох разів за різних значень вимірювального струму. За дійсний опір приймають середнє арифметичне зі всіх виміряних значень. Результати вимірювань одного і того ж опору не повинні відрізнятися від середнього арифметичного значення більш ніж на ± 0,5 %.

Значення вимірювального струму не має перевищувати 15…20 % номінального струму цієї обмотки, а тривалість його протікання – 1 хв.

При вимірюванні опору обмоток провідники ланцюгів струму і напруги слід приєднувати до обмотки окремо, щоб до падіння напруги в опорі, що вимірюється, не додавалося падіння напруги в перехідних контактах провідників ланцюга струму.

Виміряний опір $R_{вим}$ може бути представлено як результат поділу виміряної напруги U на виміряний струм I:

$$R_{вим.} = \frac{U}{I}. \tag{4.4}$$

У разі вимірювання за схемою вольтметр-амперметр як джерело струму живлення вимірювальної схеми застосовують батареї акумуляторів, окремий генератор постійного струму або статичний випрямляч, що живиться від мережі змінного струму постійної напруги. Вимірювання опору обмоток слід проводити приладами магнітоелектричної системи класу точності не нижче 0,5. Для підвищення точності прилади слід налаштовувати так, щоб значення, що вимірюються, знаходилися в межах 30…95 % шкали.

Результати вимірювань та температуру обмоток записують у протокол випробувань, при цьому виміряні значення опору мають бути приведені до температури плюс 20 °С за формулою:

$$R_{20} = \frac{1 + a \cdot 20}{1 + a \cdot \vartheta_x} \cdot R_x, \tag{4.5}$$

де R_{20} – опір обмотки, наведений до 20 ºС, Ом;

α – температурний коефіцієнт опору матеріалу обмотки, 1/К;

ϑ_x – температура обмотки при вимірюванні в практично холодному стані, ºС;

R_x – виміряний опір обмотки при температурі ϑ_x, Ом.

Результати вимірювань вважаються задовільними, якщо виміряні опори обмоток не відрізняються від розрахункового значення більш ніж ± 2 %.

Вимірювання опору обмоток головних полюсів та додаткових полюсів проводиться безпосередньо на виводах обмоток.

Вимірювання опору обмотки якоря можливе лише через колекторні пластини. Особливістю обмотки якоря машини постійного струму є те, що вона фактично не має ні початку, ні кінця (за них можуть бути прийняті будь-які дві точки, приєднані до колектору). При цьому необхідно знати тип і схему обмотки якоря, наявність та кількість зрівняльних сполук, оскільки результати вимірювань мають бути перераховані для визначення розрахункового опору, що може бути необхідним для розрахунку втрат в обмотці при визначення ККД.

При простих хвильових або простих петлевих обмотках з повним числом зрівняльних сполук вимірювання опорів слід проводити між колекторними пластинами, що віддалені одна від одної на К/2р пластин (де К – кількість колекторних пластин, 2р – кількість полюсів). Якщо відношення К/2р є дробовим числом, то воно округлюється до найближчого цілого.

Оптимальним є вимірювання опору обмотки якоря при піднятих або ізольованих щітках. В окремих випадках, коли підняття щіток пов’язане зі складнощами, допускається вимірювання опору обмотки якоря проводити при опущених щітках. При цьому вимірювальні прилади слід підключати до колекторних пластин, що знаходяться поблизу осі щіток.

Зручним є застосовування для вимірювання опору обмотки якоря подвійних голчастих щупів, при цьому по одній парі щупів підводиться вимірювальний струм, а інша пара щупів використовується для вимірювання падіння напруги.

4.2.4 Вимірювання опору ізоляції, випробування електричної міцності ізоляції обмоток

Вимірювання опору ізоляції обмоток електричної машини відносно

корпусу та між обмотками проводиться за допомогою мегомметра з класом точності не нижче 2,5.

Вимірювання опору ізоляції слід проводити у практично холодному стані до початку випробувань машини та у нагрітому стані не пізніше ніж через 5 хвилин після закінчення випробувань.

Вимірювання опору ізоляції обмоток відносно корпусу і між обмотками проводиться по черзі для кожного електричного ланцюга, що має окремі виводи, при цьому всі інші ланцюги заземлені на корпус електричної машини.

Мінімально допустиме значення опору ізоляції при температурі обмотки плюс 10…30 °С приймається на основі технічної документації на електричну машину або діючих стандартів. При вимірюванні опору ізоляції за іншої температури обмотки мінімально допустиме значення зменшується вдвічі на кожні 20 °С збільшення температури вище плюс 30 °С.

Опір ізоляції в практично холодному стані фіксується через 15 секунд після початку випробування ($R_{15''}$), через 60 секунд після початку випробування ($R_{60''}$) та через 600 секунд після початку випробування ($R_{600''}$). Для електричної машини в практично холодному стані значення коефіцієнту абсорбції $R_{60''}/R_{15''}$ повинно бути не менше 1,3; значення коефіцієнту поляризації $R_{600''}/R_{60''}$ має бути не менше 2.

Випробування електричної міцності ізоляції обмоток відносно корпусу та між обмотками виконується постійною (випрямленою) напругою на нерухомій електричній машині в практично холодному стані.

Випробувальна напруга піднімається в кілька етапів, на кожному етапі проводиться витримка протягом не менше 10 с з вимірюванням струмів витоку. Повна випробувальна напруга витримується протягом 1 хв.

Випробовування ізоляції проводиться по черзі для кожного ланцюгу, що має окремі виводи. Перед випробуванням електричної міцності ізоляції окремі обмотки треба роз’єднати. При випробуванні один вивід джерела випробувальної напруги підключається до одного з виводів обмотки, а інший надійно з’єднується з корпусом електричної машини, з яким на час

випробування даної обмотки електрично з'єднуються всі інші обмотки, які не беруть участь у випробуванні (якщо ці обмотки не з'єднані між собою).

Результати випробувань ізоляції обмотки відносно корпусу та між обмотками слід вважаються задовільними, якщо під час випробування не відбулося пробою ізоляції.

Величина випробувальної напруги для машин постійного струму зазвичай розраховується окремо для різних електричних ланцюгів за формулою:

$$U_{випр} = 2 \cdot U_{ном} + 1000, \ \ В, \tag{4.6}$$

де $U_{ном}$ – номінальна напруга для даного електричного ланцюга, В.

4.2.5 Перевірка працездатності термоперетворювачів опору

Перевірка працездатності термоперетворювачів опору виконується шляхом вимірювання їх опору постійному струму та опору ізоляції.

Вимірювання опору ізоляції термоперетворювачів опору відносно корпусу проводиться за допомогою мегомметра. При проведенні вимірювань усі термоперетворювачі опору, крім того, ізоляція якого зараз вимірюється, повинні бути заземлені. Опір ізоляції у практично холодному стані має бути не менше 1,0 МОм.

Вимірювання опору постійному струму термоперетворювачів опору проводять мультиметром з класом точності не нижче 1,0.

Вимірювання опору проводяться між усіма виводами термоперетворювача опору (може бути два, три чи чотири виводи в залежності від виконання термоперетворювача опору). Вимірювання проводяться у практично холодному стані із фіксацією температури корпусу електричної машини (або навколишнього повітря) с точністю до 0,1 °С.

В процесі вимірювання опору постійному струму необхідно відповідним чином врахувати наявний опір з’єднань.

Отриманий опір постійного струму порівнюється з очікуваним значенням

за номінальною статичною характеристикою термоперетворювача опору при вказаній температурі, відхилення не повинні перевищувати заданого значення в залежності від класу точності термоперетворювача опору.

Приведений до температури t = 0 °C опір термоперетворювача опору R_0 розраховується за наступною формулою:

$$R_0 = R_e - t_e \cdot R_{1C}, \tag{4.7}$$

де R_e – виміряний опір термоперетворювача, Ом

t_e – виміряна температура корпусу (навколишнього повітря), °C;

R_{1C} – змінення опору термоперетворювача при зміненні температури на 1 °C, Ом.

4.2.6 Визначення характеристики холостого ходу

Під час досліду холостому ходу визначаються струм збудження генератора або частота обертання двигуна.

Характеристика холостого генератора – це залежність напруги на виході генератора як функції струму збудження $U_0=f(i_в)$. Характеристику холостого ходу визначають при незалежному збудженні чи самозбудженні. Якщо машина має змішане збудження, то при знятті характеристики холостого ходу обмотка послідовного збудження не повинна бути навантажена струмом обмотки паралельного збудження. Для машини з послідовним збудженням характеристику холостого ходу знімають за незалежного живлення обмотки збудження.

При знятті характеристики холостого ходу випробувану машину приводять до обертання двигуном будь-якого виду з постійною частотою обертання. Якщо при випробуванні не вдається підтримувати частоту обертання постійною, то одночасно з вимірюванням напруги та струму слід вимірювати частоту обертання в момент вимірювання напруги U, а потім приводити виміряну напругу U до номінальної напруги $U_Н$ перерахунком за формулою

$$U_н = U \cdot \frac{n_н}{n}\,. \qquad (4.8)$$

Визначення характеристики холостого ходу проводиться за одним із наступних методів.

Перший метод полягає в тому, що струм збудження плавно знижується, від найбільшого значення до нуля. Внаслідок впливу залишкового намагнічування полюсів при нульовому струмі збудження напруга холостого ходу може не дорівнювати нулю, тоді отриману характеристику необхідно змістити по осі абсцис до перетину характеристики з початком координат.

При іншому методі струм збудження, починаючи з найбільшого значення, плавно зменшується до нуля, потім полярність обмотки збудження змінюється на зворотну і струм збудження збільшується до максимально можливого значення. Після цього цей процес повторюється у зворотному напрямку. В цьому випадку за характеристику холостого ходу приймається усереднена крива, абсциси якої дорівнюють середньоарифметичним абсцис двох знятих кривих.

Струм збудження генератора визначається у режимі холостого ходу при номінальній напрузі на якорі та номінальній частоті обертання, а для генераторів з самозбудженням – також при температурі, близькій до робочої.

Частоту обертання електродвигуна при холостому ході визначають при номінальній напрузі в ланцюзі якоря та номінальному струмі збудження. При цьому температура обмотки збудження та підшипників має бути близькою до робочої. Якщо двигун має послідовне збудження, то такий дослід проводиться при незалежному збудженні.

4.2.7 Визначення характеристик електричної машини

Зовнішньою характеристикою генератора називається залежність напруги на виході генератора від струму навантаження U=f(I). Як правило вона знімається при номінальному струмі збудження (при незалежному збудженні) або нерегульованому опорі ланцюга збудження, відповідному номінальному

режиму (при паралельному збудженні) при температурі обмоток, близькій до робочої [5]. При знятті зовнішніх характеристик струм навантаження рекомендується змінювати від струму холостого ходу до струму, що дорівнює 150% від номінального.

Регулювальна характеристика машини постійного струму є залежністю струму збудження від струму навантаження (при U=const), ця залежність має дві гілки: при зменшенні та збільшенні струму навантаження. Зазвичай допустиме зняття тільки однієї гілки – при зменшенні струму навантаження. Однак якщо згідно з вимогами до машини необхідне зняття обох гілок цієї характеристики, то за регулювальну характеристику приймають усереднену криву, кожна ордината якої є середньоарифметичною ординатою першої та другої гілок. При знятті регулювальної характеристики струм навантаження регулюється від холостого ходу до 150% від номінального.

Робоча характеристика двигуна постійного струму являє собою залежність частоти обертання від струму якоря при незмінній напрузі якоря і незмінному струмі збудження (при незалежному збудженні) або нерегульованому опорі ланцюга збудження, що відповідає номінальному режиму роботи (при паралельному збудженні). При знятті цієї характеристики температура обмоток має бути близькою до робочої. Для електродвигунів із незалежним або паралельним збудженням при знятті характеристики струм навантаження регулюється від холостого ходу до 150% від номінального.

Для електродвигунів з послідовною обмоткою збудження мінімальне навантаження при знятті робочої характеристики має вибиратися таким, щоб частота обертання двигуна при цьому не перевищувала гранично допустиму.

4.2.8 Випробування на нагрівання

Випробування проводяться з метою визначення відповідності температури різних вузлів електричної машини при номінальному навантаженні стандартам та технічним умовам, а також з метою дослідного визначення залежності температури цих вузлів від навантаження та інших параметрів, здатних

змінювати тепловий стан машини.

Відповідно до вимог ДСТУ IEC 60034-1 гранично допустимі перевищення температури обмоток електричних машин в залежності від класу нагрівостійкості ізоляції не повинні перевищувати значень, наведених в Таблиці 4.4. Застосована ізоляційна система повинна відповідати вимогам до термічної стійкості, що регламентуються ДСТУ EN 60034-18-1.

Таблиця 4.4 – Граничні допустимі перевищення температури обмоток

Вузли електричної машини постійного струму	**Метод вимірювання**	**Клас нагрівостійкості ізоляції**		
		130 (B)	155 (F)	180 (H)
		Максимальне перевищення температури (абсолютна температура), °C		
Обмотка збудження, обмотка додаткових полюсів	Термоперетворювачі опору, метод опору	80 (120)	105 (145)	125 (165)
Обмотка якоря	Тепловізор, пірометр, електронний термометр	80 (120)	105 (145)	125 (165)
Підшипники	Термоперетворювачі опору	(100)		

Максимально допустима температура охолоджуючого повітря на вході в машину як правило становить 40 °C [6], в окремих випадках (зокрема для використання в тропічному кліматі) ця цифра може бути збільшена за вимогами замовника обладнання. В такому випадку перевищення температур, вказані в таблиці 4.4, також можуть бути переглянуті задля уникнення можливого перевищення абсолютних допустимих температур.

В окремих випадках для підвищення надійності електричної машини передбачається її використання в зоні температур, знижених на один клас нагрівостійкості порівняно з використаною ізоляцією (наприклад при ізоляції класу нагрівостійкості F допустимі температури можуть прийматися на рівні класу нагрівостійкості B).

Електрична машина має випробуватися на нагрівання повністю зібраною разом з усіма деталями, призначеними для вибраного способу охолодження. Всі кожухи, сітки, жалюзі та інші деталі, які відносяться до електричної машини та можуть вплинути на її тепловий стан, при випробуванні повинні бути встановлені [7].

Електродвигуни з незалежною системою вентиляції випробовуються при витратах охолоджуючого повітря, що дорівнюють 100, 75 і 50 % від номінальної витрати.

У тривалому режимі випробування на нагрівання допускається почати з практично холодного або з нагрітого стану і проводити до досягнення практично усталеної температури обмоток та інших вузлів електродвигуна.

Якщо температура якоїсь з обмоток має визначатися методом опору, то початкова температура цієї обмотки перед випробуванням не повинна відрізнятись від температури охолоджуючого повітря більш ніж на 2 °С.

Фіксація показників вимірювальних приладів в процесі випробування при тривалому режимі роботи слід проводити не рідше, ніж через кожні 30 хв.

Фіксацію показників вимірювальних приладів при короткочасному режимі роботи (менше 30 хвилин) необхідно проводити на початку, середині та наприкінці періоду вимірювань.

Для машин з повітроохолоджувачами за температуру охолоджуючого повітря приймають середньоарифметичне значення за показаннями датчиків температури на виході з повітроохолоджувачів, знятих через рівні проміжки часу протягом останньої чверті періоду випробування в заданому режимі.

Для відкритих чи закритих машин без охолоджувачів (які охолоджуються навколишнім повітрям) температура навколишнього повітря має бути виміряна кількома термометрами, розташованими в різних точках навколо машини, на висоті, що дорівнює половині висоти машини, на відстані від 1 до 2 м від машини. Кожен термометр має бути захищений від можливості впливу теплового випромінювання та потоків повітря. За температуру навколишнього повітря приймається середнє арифметичне значення показань термометрів,

отриманих через рівні проміжки часу.

Для машин, що охолоджуються повітрям від віддаленого джерела по вентиляційним трубопроводам, а також для машин з окремо встановленими охолоджувачами, температуру охолоджуючого середовища слід вимірювати на вході в машину.

Під час випробувань на нагрівання методом безпосереднього навантаження випробовувана електрична машина виводиться на номінальний режим за допомогою регулювання її навантаження.

Під час випробувань вимірюються наступні параметри: електричні величини (напруга, струм, потужність), частота обертання, температура повітря на вході та виході з повітроохолоджувача, температура навколишнього повітря, температура обмоток, активної сталі осердя статора, підшипників. Також протягом режиму слід контролювати вібраційний стан.

Температура якоря повинна бути виміряна не пізніше ніж через 120 с після закінчення випробувань та відключення електричної машини. За результат вимірювань приймають найбільше значення температури.

Режим вважається сталим, коли температури вузлів електричної машини змінюються не більше, ніж на 2 °С за годину. Тривалість режиму зазвичай становить не менше 2…3 годин.

За результатами вимірів будуються криві нагрівання (охолодження).

Вважається, що електрична машина витримала випробування на нагрівання, якщо протягом випробувань були відсутні сторонні звуки в підшипниках та двигуні, а температури у сталому режимі при номінальному навантаженні не перевищили допустимих значень, вказаних в таблиці 4.4.

4.2.9 Визначення витрати повітря

В ході проєктування електричних машин значна увага приділяється зниженню маси на одиницю потужності, що може бути досягнуте різними способами, одним з яких є покращення охолодження машини за рахунок збільшення витрати охолоджуючого повітря. Для перевірки ефективності

впроваджених або існуючих систем вентиляції електричних машин виникає необхідність проводити випробування з метою визначення витрати повітря [8].

Такі вимірювання як правило проводять під час роботи електричної машини з номінальною частотою обертання без навантаження. Елементи машини, що забезпечують циркуляцію охолоджуючого газу, наприклад, вентилятори з незалежним приводом, при цьому мають працювати в номінальному режимі. Дуже важливо при вимірах забезпечити збереження умов руху повітря на вході в машину, всередині машині та на виході з неї такими, як і при її експлуатації. Якщо електрична машина призначена для роботи з регульованою частотою обертання та регульованою подачею охолоджуючого газу, то вимірювання витрати повітря зазвичай проводять при найбільшій частоті обертання.

Дуже важливо, щоб при визначенні витрати охолоджуючого повітря приєднання пристроїв та приладів до електричної машини було щільним, що виключає витік повітря у місцях з'єднання. Вимірювання можуть проводитися при різних атмосферних тисках і різній температурі, тому для порівняння результатів вимірювання їх слід привести до атмосферного тиску і температури 20 °C.

Для проведення вимірювань необхідно встановити вимірювальний пристрій, що складається з вимірювального патрубка та вимірювального елементу. У якості вимірювального елементу може використовуватись ручний анемометр чашкового або крильчатого типу (обидва з рахунковим механізмом), під час вимірювань вісь крильчатого анемометра має бути встановлена назустріч напрямку повітряного потоку, а вісь чашкового – перпендикулярно напрямку потоку. Швидкість повітряного потоку у вимірювальному патрубку має бути нижче швидкості, допустимої для використаного типу анемометра.

4.2.10 Вимірювання рівню вібрації

Електрична машина для вимірювання рівню вібрації має бути встановлена на жорсткій основі (наприклад, на сталевій плиті або бетонному фундаменті).

Температура обмоток повинна знаходитися у межах робочого діапазону (усталений тепловий режим).

Вимірювання рівня вібрації проводять під час роботи електричної машини при номінальній частоті обертання в режимі холостого ходу та з номінальним навантаженням [9].

Вимірювання вібрації виконується вібраційними датчиками (акселерометрами) або портативним віброметром з діапазоном вимірювання 2…1000 Гц з класом точності не нижче 2.

Величина вібрації електричної машини при випробуваннях повинна вимірюватися у трьох напрямках (вертикальному, горизонтальному та осьовому) у трьох контрольних точках: на підшипникових щитах чи опорах (зі сторони приводу та протилежного боку) по осях X, Y та Z, якомога ближче до осі обертання. За вісь Z приймають напрямок уздовж осі обертання ротора, за вісь Y – вертикальний напрямок, за вісь X – напрямок, перпендикулярне осям Y і Z. Способи кріплення віброперетворювачів повинні відповідати вимогам технічної документації на віброперетворювачі.

Допустимі рівні вібрації мають бути вказані в технічній документації на електричну машину.

4.3 Налаштування комутації

4.3.1 Фізичні процеси у вузлах струмознімання

Розглянемо фізичні процеси при проходженні струму через ковзний контакт у вузлах струмознімання, тобто між щітками та колектором електричної машини постійного струму.

Процеси в ковзному контакті залежать від ряду електричних факторів: індуктивності ланцюгів, в яких він працює, щільності струму під щіткою, а також від напруги між пластинами колектора і збалансованості реактивної та комутуючої ЕРС в секціях якоря, замкнених щіткою [10].

При збільшенні частоти обертання та окружної швидкості робочих

поверхонь колекторів на роботу ковзного контакту все більше впливають механічні фактори, зокрема відхилення форми поверхні від циліндричної, шорсткість поверхні, рівень вібрації вузлів.

Істотно впливають на тертя та знос контактних поверхонь у ковзному контакті параметри навколишнього середовища, а саме хімічний склад, температура та вологість охолоджуючого повітря.

При дотику двох плоских струмопровідних поверхонь дійсний контакт наявний лише між окремими виступами, площа яких становить незначну частину (як правило менше одного відсотка) від загальної площі контакту. Загалом площа дійсного контакту залежить від пружних властивостей, чистоти поверхні, питомого натискання, наявності оксидних плівок тощо.

Таким чином дійсна густина струму в точках контакту у багато разів перевищує середню. Передача струму відбувається за рахунок електронної провідності без взаємного перенесення матеріалу електродів та їх руйнування електроерозійними процесами [11]. Зношування контактуючих поверхонь відбувається через термічні фактори (розжарювання та згоряння окремих виступів при надмірній щільності струму), електрохімічних факторів, пов'язаних з проникненням хімічно активних речовин з навколишнього середовища, та механічного зносу (тертя) при взаємному переміщенні поверхонь.

При роботі щітки на колекторі, що обертається внаслідок неминучої вібрації і відхилення форми поверхні колектора від циліндричної кривизна поверхні щітки виходить меншою, ніж у колектора (рис. 4.1). Поверхню дотику при цьому можна розділити на дві зони:

- зона безпосереднього контактування 1, площа або тангенціальна ширина зменшується зі зростанням вібрації щітки (при вкрай високих вібраціях ця зона може періодично зникати);

- зона газорозрядного процесу 2, що являє собою клиновидний повітряний зазор, який виникає внаслідок провертання (нахиляння) щітки під дією сил тертя при обертанні колектора, у нормально працюючих машинах зазор під збігаючим краєм щітки складає 4…10 мкм.

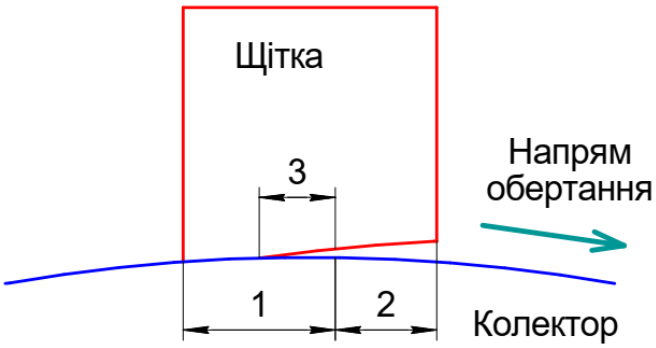


Рис. 4.1 – Контактні зони під щіткою
(1 – зона безпосереднього контактування;
2 – зона газорозрядного процесу; 3 – пилова зона)

При цьому на початковій ділянці клиноподібного зазору проходження струму можливе через продукти зносу ковзного контакту, а саме вугільний та мідний пил, що проводять струм. Ця пилова зона 3 умовно може бути включена до зони безпосереднього контакту 1. При цьому всі зазначені зони не мають чітко визначених кордонів і переміщуються в тангенціальному напрямі зі зміною вібрації щітки.

Проходження струму через зону 2 відбувається у вигляді іскрового або дугового газорозрядного процесу. Ці процеси викликають взаємне перенесення матеріалу катода та анода та руйнування (електричну ерозію) їх поверхні. Вони мають коливальний характер і супроводжуються іскрінням та радіоперешкодами [12].

За відсутності процесів електроерозії (або при їх дуже слабкому ступені) колектор має гладку блискучу поверхню, покриту "політурою", а щітки мають дзеркальну контактну поверхню. Політура є тонкою плівкою закису міді і втертих в поверхню колектора частинок графіту. Вона відіграє істотну роль роботі ковзного контакту, за її допомогою (за наявності вологи в навколишньому повітрі) утворюється рідинна плівка, що знижує тертя. Вона впливає також на падіння напруги між щіткою та колектором, а також обумовлює його залежність від полярності.

За наявності ерозійних процесів на збігаючих краях колекторних пластин з'являються чорні матові смужки, а при більш сильному ступені ерозійних процесів чорні матові плями – відбитки щіток на поверхні пластин. Ці смужки та відбитки утворюються за рахунок розпилення матеріалу щітки та перенесення його на колектор. На поверхні пластин утворюються стійкі сполуки матеріалу пластин з вугіллям, які не змиваються розчинниками, політура в цих місцях частково руйнується, що викликає збільшення коефіцієнта тертя та підвищене зношення щіток. В подальшому це також призводить до посилення вібрації щіток, погіршення їх контакту з колектором та прогресуючого погіршення комутації.

Ерозія щіток проявляється у вигляді матових поперечних смуг на блискучій контактній поверхні. При сильніших ерозійних процесах може мати місце перенесення міді на контактну і навіть бічну поверхню щітки, оплавлення країв пластин, розтріскування країв щітки. За таких явищ робота машини стає неможливою навіть у короткочасних режимах.

4.3.2 Оцінка комутації електричних машин постійного струму

Головним критерієм якості комутації згідно з ДСТУ IEC 60034-1 є надійне виконання електричною машиною її робочих функцій, тобто стабільність ступеня іскріння при роботі машини за встановленим робочим циклом.

Комутація електричних машин постійного струму зазвичай оцінюється візуально за ступенем іскріння під збігаючим краєм щітки. Зазвичай при перевірці використовується шкала, що складається з п'яти ступенів для оцінки класу комутації або ступеня іскріння: 1; $1^1/_4$; $1^1/_2$; 2 та 3.

Ступінь іскріння 1 характеризується повною відсутністю іскріння, або «темною комутацією».

Для ступеня іскріння $1^1/_4$ характерним є слабке точкове іскрінням під невеликою частиною щітки. При ступенях іскріння 1 і $1^1/_4$ почорніння колектора не відбувається, а сліди нагару на щітках відсутні.

Ступінь іскріння $1^1/_2$ характеризується слабким іскрінням під більшою

частиною щітки, але можуть з'являтися сліди нагару на щітках та почорніння колектору, що легко усуваються протиранням його поверхні.

При ступені іскріння 2 спостерігається іскріння під усім краєм щітки, поява слідів почорніння колектору, що не усуваються протиранням його поверхні, і поява нагару на щітках.

Ступінь іскріння 3 характеризується значним іскрінням під усім краєм щітки, почорнінням колектора, яке не усувається протиранням його поверхні, підгорянням і руйнуванням щіток.

Допустимий ступінь іскріння залежить від умов роботи машини і тому зазвичай вказується в стандартах або технічних умовах на конкретні види машин. Якщо ступінь іскріння не обумовлена, то вважається, що при номінальному та нормальному режимах роботи вона повинна бути не вищою за клас $1^1/_2$.

При короткочасному навантаженні по струму під час випробувань можливе зростання при іскріння на один ступінь, наприклад з $1^1/_4$ до $1^1/_2$. Якщо ступінь іскріння не перевищувала 2, то через деякий час як правило відновлюється ступінь іскріння, що відповідає номінальному навантаженню.

Слід зазначити, що візуальна оцінка стану поверхні колектору певною мірою є суб'єктивною та може залежати від зовнішніх факторів (наприклад, характеру освітленості).

Очищення поверхні колектора, в тому числі з застосуванням бензину, не дає гарантії виключення невірної візуальної оцінки комутації. В деяких випадках почорніння пластин колектора не є результатом неприпустимого іскріння, зокрема поперечні чорні риски на колекторній поверхні можуть бути результатом початкової фази утворення політури та, відповідно, цілком допустимі. Слід наголосити, що для сучасних високонавантажених електричних машин постійного струму з достатньо напруженими умовами комутації почорніння країв пластин та матові смуги на контактній поверхні щіток у ряді випадків стають неминучими.

Загалом головним критерієм якості комутації є надійне виконання

електричною машиною її робочих функцій, тобто стабільність ступеня іскріння колектору при експлуатації за встановленим робочим циклом. Через це в особливо відповідальних випадках є доцільним впровадження методів кількісної оцінки комутації, зокрема фотоелектричного або радіоперешкодного методів, а також методу вимірювання комутаційної складової напруги на колекторі [13].

Фотоелектричний метод оцінки комутації заснований на використанні фотодатчиків, вихідний сигнал яких підсилюється та подається на реєструючий прилад. При цьому фотодатчики мають кріпитися у безпосередній близькості від щіток, що вимагає спеціальних заходів для їх захисту від впливу вібрацій і надлишкового нагрівання. Також при використанні цього методу має бути передбачений захист фотодатчиків від стороннього засвічування зовнішніми джерелами світла.

Радіоперешкодний метод використовує таку особливість комутаційних процесів в електричних машинах, як поява електромагнітного вимірювання із широким спектром частот. Недоліками радіоперешкодного методу оцінки комутації є залежність рівня радіоперешкод від частоти обертання електричної машини, а також можливий вплив зовнішніх електромагнітних полів, що стало особливо актуальним в сучасних умовах розвитку систем зв’язку.

Метод оцінки комутації, заснований на вимірюванні комутаційної складової напруги на колекторі, базується на тому допущенні, що амплітуда цієї напруги пропорційна ступеню іскріння. При цьому методі напруга знімається з різнополярних щіток та подається на вимірювальний прилад. Такий спосіб вимагає попереднього ефективного гасіння зворотних, зубчатих і колекторних пульсацій (що мають меншу частоту від досліджуваних пульсацій) напруги, що виконується шляхом високочастотної або смугової фільтрації. Нижня частота зрізу фільтра становить 15 кГц, що дозволяє ефективно позбавитись складових пульсації, що не мають комутаційного походження. Комутаційна складова пульсацій має вигляд коротких різнополярних імпульсів, полярність яких визначається параметрами обмотки якоря досліджуваної електричної машини.

4.3.3 Визначення зони роботи без іскріння

Додаткові полюси в машинах постійного струму використовуються для покращення комутації. При випробуваннях машини важливо встановити, в яких межах зміни МРС додаткових полюсів машина матиме комутацію без іскріння при різних струмах навантаження (від холостого ходу до номінального навантаження, а якщо можливо, то і вище номінальної). У результаті визначають область роботи без іскріння. Випробування проводять за номінальної частоти обертання, при практично усталеній температурі активних частин машини, що відповідає номінальному режиму роботи [14].

Змінення МРС обмотки додаткових полюсів виконують одним з наступних способів:

- стороннє джерело постійного струму підключається до затискачів обмотки додаткових полюсів, включеної в загальний ланцюг машини;

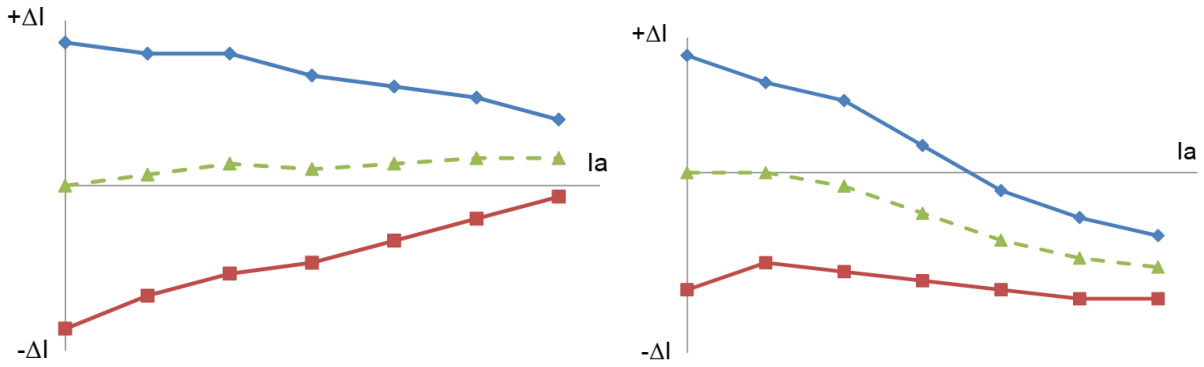
- стороннє джерело постійного струму підключається до затискачів обмотки додаткових полюсів, яку відключають від інших ланцюгів машини;

- на додаткові полюси на час випробувань накладається тимчасова обмотка, що живиться від стороннього джерела постійного струму.

- шунтування зовнішнім опором обмотки додаткових полюсів.

Обмотка додаткових полюсів під час досліду живиться додатковим струмом ($\pm\Delta I$), який спочатку змінюється в позитивну сторону, а потім у негативну (від нульового значення); в обох випадках фіксується, за якого саме струму з’явилося іскріння.

Випробування проводиться при різних значеннях струму якоря (I_a), в результаті можна отримати дві залежності $+\Delta I=f(I_a)$ та $-\Delta I=f(I_a)$, що визначають відповідно верхню і нижню межі області роботи машини без іскріння (рис.4.2). В області, що розташовується між цими межами, можливо побудувати усереднену лінію отриманої зони зникнення іскріння, яка в ідеальному випадку має наближатися до осі абсцис.



а) б)

Рис. 4.2 Зони роботи без іскріння при недостатній (а) та надлишковій (б) МРС додаткових полюсів

За характером отриманої усередненої лінії можливо зробити висновок щодо оптимальних параметрів додаткових полюсів. Відхилення середньої лінії вгору від осі абсцис (рис.4.2, а) свідчить про недостатню МРС обмоток додаткових полюсів (в цьому випадку необхідно збільшити кількість витків в обмотці додаткових полюсів, або зменшити повітряний зазор під додатковим полюсом). І навпаки, якщо середня лінія відхиляється вниз від осі абсцис (рис.4.2, б), то це свідчить про надмірну величині МРС додаткових полюсів (це можна виправити шляхом зменшення кількості витків в обмотці додаткових полюсів або збільшення повітряного зазору).

Іншим важливим показником є ширина області роботи без іскріння, що визначає стійкість та надійність роботи машини при даному навантаженні. Ширина області роботи без іскріння залежить від багатьох чинників, зокрема від ширини полюсних наконечників додаткових полюсів, марки та розмірів щіток, тиску щіткотримачів, припрацювання щіток і стану поверхні колектору.

Можливі випадки, коли зі збільшенням струму навантаження одна з меж області роботи без іскріння перетинає вісь абсцис (рис.4.2, б). Зазвичай це відбувається при значному відхилення середньої лінії від осі абсцис та відносно невеликій ширині області без іскріння. У такому випадку робота машини без іскріння при зростанні струму стає неможливою без додаткового підживлення додаткових полюсів струмами того ж знаку.

Швидке звуження меж області при збільшенні струму навантаження може бути ознакою механічної несправності машини, що призводить до підвищення вібрації щіток.

Кривизна середньої лінії області роботи без іскріння є характерним показником того, як компенсується реакція якоря за різних навантажень. Оптимальним є випадок, коли середня лінія близька до прямої.

4.3.4 Розподіл струму між паралельно працюючими щітками

В забезпеченні надійної роботи вузла колектору велику роль відіграє наявність рівномірного розподілу струму між усіма паралельно працюючими щітками Важливу роль в цьому відіграють заходи щодо розподілу струму всередині вузла струмознімання, а саме рівність опорів струмоведучих ланцюгів від затискачів електричної машини до кожної зі щіток, у тому числі це стосується забезпечення низьких та стабільних перехідних опорів в місцях з’єднання шин між собою, затискання наконечників щіткових струмопідводів, кріплення струмопідводів до щітки.

Важливість цих заходів посилюється тим, що контактні опори між щіткою та колектором зменшуються при нагріванні внаслідок від’ємного температурного коефіцієнту опору для графіту. Таким чином при випадковому збільшенні струму через щітку та підвищенні її температури починається термічно нестійкий процес поступового збільшення струму через одну щітку з одночасним розвантаженням паралельно працюючих щіток, що може завершитись перегрівом та виходом з ладу цієї перевантаженої щітки, що супроводжується збільшенням струмового навантаження на інші щітки. Подібний процес може повторюватися лавиноподібно для кожної наступної найбільш навантаженої щітки аж до остаточного виходу з ладу всього вузла струмознімання.

Для виключення термічної нестійкості система шин повинна мати не тільки рівні та стабільні опори паралельних ланцюгів, але й забезпечувати порівняно великий встановлений опір, який відповідає падінню напруги в шинах

при номінальному струмі на рівні 30…70 % від перехідного падіння напруги під щітками, що стабілізує розподілення струмів.

Система шин має бути симетричною. Щітки на колекторі бажано розташовувати діаметрально протилежно з метою деякого зниження впливу обертової вібрації колектору.

Також має бути виключена можливість проходження струму між обоймою щіткотримача і щіткою зі збільшенням опору кріплення струмопідводів до щітки або у місці кріплення наконечника, що окрім порушення розподілу струму може призвести до появи перегріву щіткотримачів. Для виключення цього явища має бути передбачене ізолювання обойми та пружини щіткотримача відносно струмопровідних шин.

4.4 Висновки до четвертого розділу

Випробування електричних машин є обов’язковою та вкрай важливою процедурою в ході виготовлення машин одиничного чи серійного виробництва, що дозволяє підтвердити заявлені параметри електричної машини, виявити можливі недоліки проєктування, технології або процесу виробництва, а також виконати налаштування, необхідні для надійної експлуатації машини.

Приведення бази використовуваних в Україні стандартів до сучасних європейських норм призводить до необхідності перегляду існуючих методів випробувань електричних машин, впровадження нових методів та засобів випробувань.

В розділі розглянуті основні види випробувань електричних машин постійного струму.

Окремо представлені методи контролю та налаштування комутаційних процесів в машинах постійного струму, що є одним з ключових питань, які потрібно вирішити для забезпечення надійної довготривалої експлуатації подібного електромашинного обладнання.

4.5 Література до четвертого розділу

1. Sahdev, S.K.(2017). Electrical Machines. Cambridge University Press, 954 p. https://books.google.com.ua/books?id=SPFKDwAAQBAJ ;

2. Novacescu, Florica & Velcea, Daniel & Raduca, Eugen. (2011). Modern Techniques to Test the In Load Operation of a DC Motor with Separate Excitation Using an Acquisition and Data Processing System. Analele Universităţii din Craiova. Seria Matematică Informatică. 38;

3. ДСТУ IEC 60034-1:2019 Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні та робочі характеристики;

4. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2020 Норми випробування електрообладнання;

5. Journal, I.J.A.E.R.S. Construction of an Instrumentation Kit for Identification and Control of DC Motors. https://doi.org/10.22161/IJAERS.4.12.20 ;

6. Tretiak O, Arefieva M, Krytskyi D, Kravchenko S, Shestak B, Smakhtin S, Kovryga A, **Serhiienko S.** Features of Three-Dimensional Calculation of Gas Coolers of Turbogenerators. Computation. 2025; 13(8):192. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.3390/computation13080192 ;

7. Oleksii Tretiak, Viacheslav Nazarenko, **Serhii Serhiienko**, Anton Zhukov, New methods for calculating of cooling systems of direct current electric machines: Міжнародна науково-практична інтернет-конференція на тему «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (випуск 103), 14-15 жовтня 2025 р. http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-2321/ ;

8. Tretiak, O., Arefieva, M., Makarov, P., **Serhiienko, S.**, Zhukov A., Shulga I., Penkovska N., Kravchenko S., Kovryga A. "Study of Different Types of Ventilation and Cooling Systems of Bulb Hydrogenerators in a Three-Dimensional Setting", SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 18(3):2025. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.4271/05-18-03-0020 ;

9. Tretiak, O., Kovryga, A., Kravchenko, S., Shpitalnyi, D., Zhukov, A., **Serhiienko, S.**, Arefieva, M., Penkovska, N., Madonych, A. (2024). Estimating the influence of the rigidity of support assemblies on the resonance phenomena and the vibration state of a hydraulic unit. Eastern-European Journal of Enterprise

Technologies, 6(7 (132), 53–64. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.316778 ;

10. Phillips R., Thompson J.E., and Tuck E.M. Commutation phenomena in electrical machines. Pt. 1 – Basic experiments in flashover. Proc. IEE 115 2 259-265 1968;

11. Vivier, S. (2008). A new modelling of DC machines taking into account commutation effects, 2008 18th International Conference on Electrical Machines;

12. Sincero, G., & Cros, J. (2000). Arc Models for Simulation of Brush Motor Commutations. IEEE Transactions on Magnetics. https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.915087 ;

13. Блиндюк, Василь. (2015). Аналіз методів та засобів контролю якості комутації тягових двигунів локомотивів. Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport. https://doi.org/10.18664/1994-7852.153.2015.64902 .

14. Hall, Richard & Konstanty, Walter. (2011). Commutation of DC Motors. Industry Applications Magazine, IEEE. 16. 56 - 62. https://doi.org/10.1109/MIAS.2010.938392 ;

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та запропоновано вирішення наукового завдання, що полягає у підвищенні надійності великих машин постійного струму шляхом розробки методів дослідження напружено-деформованого стану елементів їх конструкції, зокрема станини, з урахуванням всіх діючих при експлуатації та виготовленні силових факторів.

В ході виконання комплексних дисертаційних досліджень були отримані наступні нові наукові та практичні результати:

1. Проведений системний огляд особливостей конструкції та роботи великих машин постійного струму та визначені основні силові фактори, що впливають на НДС вузлів, якими є номінальні та аварійні навантаження під час експлуатації, навантаження при виконанні технологічних операцій в процесі виготовлення.

2. Визначені причини виникнення залишкових напружень у конструктивних елементах електричних машин, що приводять до значних деформацій та викривлень їх форми, до яких відносяться вплив високих температур, процеси зварювання, пластичної деформації, механічної обробки; також визначені основні практичні методи зниження залишкових напружень, якими є термообробка, статичне перевантаження, вібраційне старіння.

3. Розроблений удосконалений метод розрахунку граничних та початкових умов для тривимірної моделі станини ВМПС в частині детального опису конструкції з урахуванням діючих при експлуатації та виготовленні силових факторів, до яких в тому числі належать навантаження під час виконання основних вантажних та технологічних операцій.

4. Отримані граничні умови для побудови просторової картини розподілу напружень у станині ВМПС під час виконання технологічних операцій, зокрема стропування та кантування, визначені зони найбільшої концентрації залишкових напружень, що розташовані в зоні зварних швів, місць підвіски та кріплення.

5. Розроблений метод визначення напружено-деформованого стану

елементів конструкції ВМПС у тривимірній постановці із використанням методу скінченних елементів для кількох варіантів виконання, зокрема станини з доданими елементами жорсткості;

6. Спроєктована нова конструкція станини, що відрізняється від існуючої наявністю додаткових елементів жорсткості, що забезпечує необхідний запас міцності при виконанні технологічних операцій згідно з існуючими нормативними документами.

7. Достовірність числових результатів підтверджено HSS-методом та аналізом збіжності сітки; розбіжність між МСЕ та HSS у контрольних точках становить близько 1 %.

8. Виконана адаптація методів випробувань електричних машин до вимог сучасних європейських стандартів, для підтвердження працездатності конструкцій з більш ефективною геометрію, розглянуті способи налаштування комутації електричних машин постійного струму.

ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Статті у наукових фахових виданнях затверджених МОН України:

1. Tretiak, O., Kravchenko, S., Gakal, P., Shestak, B., **Serhiienko, S.**, & Nazarenko, V. (2025). Створення методу визначення запасів міцності елементів конструкцій бандажних вузлів турбогенераторів. Авіаційно-космічна техніка і технологія, 0 (4sup2), 149-159. https://doi.org/doi.org/10.32620/aktt.2025.4sup2.17 .

Статті у виданнях, що реферуються у базі даних Scopus:

1. Tretiak O, Arefieva M, Krytskyi D, Kravchenko S, Shestak B, Smakhtin S, Kovryga A, **Serhiienko S.** Features of Three-Dimensional Calculation of Gas Coolers of Turbogenerators. Computation. 2025; 13(8):192. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.3390/computation13080192 ;

2. Tretiak, O., Arefieva, M., Makarov, P., **Serhiienko, S.**, Zhukov A., Shulga I., Penkovska N., Kravchenko S., Kovryga A. "Study of Different Types of Ventilation and Cooling Systems of Bulb Hydrogenerators in a Three-Dimensional Setting", SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 18(3):2025. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.4271/05-18-03-0020 ;

3. Tretiak, O., Kravchenko, S., Mykhailychenko, O., Nazarenko, V., Smyk, S., Vasyliev, O., Arefieva, M., Tretiak, I., **Serhiienko, S.**, &Selevko, V. (2025). Devising a method for calculating the structure of efficient cooling systems for thrust bearings and guide bearings in hydrogenerators. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(1 (135), 38–50. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.329021 ;

4. Tretiak, O., **Serhiienko, S.**, Zhukov, A., Gakal, P., Don Y., Arefieva M., Tretiak I., Kravchenko S., Bohozhavets O.: "Peculiarities of the Design of Housing Parts of Large Direct Current Machines", SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 17(1):59-72, 2024. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.4271/05-17-01-0005 ;

5. Tretiak, O., Smyk, S., Kravchenko, S., Smakhtin, S., Brega, D., Zhukov, A., **Serhiienko, S.**, & Don, Y. (2024). Devising a calculation method for modern structures of current-conducting elements in large electric machines in a three-dimensional statement. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1 (130), 87–96, **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310049 ;

6. Tretiak, O., Kovryga, A., Kravchenko, S., Shpitalnyi, D., Zhukov, A., **Serhiienko, S.**, Arefieva, M., Penkovska, N., Madonych, A. (2024). Estimating the influence of the rigidity of support assemblies on the resonance phenomena and the vibration state of a hydraulic unit. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(7 (132), 53–64. **(Scopus Q3)** https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.316778 .

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. О.В. Третяк, С.С. Кравченко, П.Г. Гакал, Б.К. Шестак, **С.А. Сергієнко,** В.В. Назаренко. Аналіз напружено-деформованого стану бандажного вузла для оцінки можливості підвищення потужності турбогенератора. XXX - міжнародний конгрес двигунобудівників: – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2025 – 65 с. https://doi.org/10.32620/IPEC.25 ;

2. Tretiak O., Kravchenko S., Zhukov A., **Serhiienko S.**, Application of the finite element method to determine the limit geometric dimensions of the shaft journal of a synchronous electric motor: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. October 8-10, 2025. Seville, Spain. 149-154 p. URL: https://isu-conference.com/en/archive/the-integration-of-research-innovation-and-economy-08-10-25/ ;

3. Oleksii Tretiak, Viacheslav Nazarenko, **Serhii Serhiienko**, Anton Zhukov, New methods for calculating of cooling systems of direct current electric machines: Міжнародна науково-практична інтернет-конференція на тему «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення» (випуск 103), 14-15 жовтня 2025 р. http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-2321/ .

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. Третяк О.В., Арефьєва М.О., Кобзар І.В., Репетенко М.В., **Сергієнко С.А.**, Жуков А.Ю., Пеньковська Н.С., Селевко В.Б., Назаренко В.В. Методи та концепції розрахунку турбо- та гідрогенераторів у тривимірній постанові: монографія - Харків: КП «Міська друкарня», 2023 – 138 с.ISBN 978-617-619-284-8;

2. Третяк О.В., Макаров П.М., **Сергієнко С.А.,** Жуков А.Ю., Кравченко С.С. Патент на корисну модель № 156013, Україна, МПК H02K9/04 H02K1/20 H02K1/18. "Статор Електричної Машини", номер заявки u202306089, опубліковано 24 квітня 2024. https://iprop-ua.com/inv/kbxr8jpi/ ;

3. Третяк О.В., **Сергієнко С.А.,** Жуков А.Ю., Кравченко С.С., Шульга І.М., Арефьєва М.О., Третяк І.І. Патент на корисну модель № 158317, Україна, МПК H02K9/04 H02K9/08. "Система охолодження гідрогенератора капсульного типу", номер заявки u202401526, опубліковано 22.01.2025. https://iprop-ua.com/inv/6eupjyg4/ .

.

ДОДАТОК Б АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»

_____ Світлана ДОМБРОВСЬКА
_____ 2026р.

АКТ №__1__ від__15.01__ 2026р.

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
"Створення методів тривимірного моделювання, проєктування, розрахунку та впровадження багатокомпонентних конструкцій у виробництві великих машин постійного струму"
здобувача кафедри 101
Сергієнко Сергія Анатолійовича
на здобуття ступеня вищої освіти - доктор філософії
за спеціальністю 134 - Авіаційна та ракетно-космічна техніка

Комісія у складі:
голови: професора кафедри аерогідродинаміки, д.т.н., професора Дмитра ОБІДІНА
членів: доцента кафедри аерогідродинаміки, к.т.н., доцента Михайла РЕПЕТЕНКА
доцента кафедри аерогідродинаміки, к.т.н., доцента Олександра КАЩЕНКА

у період з 12 січня 2026 року до 15 січня 2026 року розглянула матеріали наукових досліджень Сергієнко Сергія Анатолійовича

Комісія засвідчує:

1. Результати дисертаційного дослідження, яке особисто проведене Сергієнко Сергієм Анатолійовичем, містять створений новий метод розрахунку напружено-деформованого стану станини великих машин постійного струму (ВМПС), що, на відміну від існуючих, дозволяє враховувати технологічні та основні силові фактори у тривимірній постановці завдяки удосконаленню алгоритму завдання граничних умов для тривимірних моделей конструктивних компонентів у частині детального опису навантажень в різні моменти циклу виробництва та експлуатації.

Створений метод розрахунку напружено-деформованого стану станини великих машин постійного струму, з урахуванням навантажень, що виникають при технологічних операціях в процесі виготовлення та під час експлуатації, дозволяє підтвердити працездатність конструкції корпусів не тільки для основних режимів роботи, а також для технологічних операцій (підйом, кантування).

На основі розробленого методу обґрунтовано створення додаткових ребер жорсткості, що забезпечує посилення конструкції станини ВМПС для запобігання недопустимих деформацій під

час технологічних операцій.

Удосконалено алгоритм та методику проведення випробувань електричних машин, що дозволило розробити рекомендації щодо проведення випробувань електричних машин постійного струму, які відповідають вимогам впроваджених сучасних європейських стандартів.

Розроблені в роботі методи тривимірного розрахунку розподілу напружень дозволяють визначити напруження конструктивних елементів, які раніше неможливо було оцінити існуючими методами спрощених аналітичних розрахунків. Це відкриває широкі перспективи для забезпечення належної механічної міцності ВМПС як під час виготовлення, так і при експлуатації та сприятиме підвищенню надійності цього електромашинного обладнання, що використовується в якості електропривода в багатьох галузях промисловості України.

Розроблені в роботі методи можуть бути використані при дослідженні напружено-деформованого стану іншого електромашинного обладнання, зокрема для літаків та аеродромів.

2. Результати наукових досліджені впроваджені у науково-дослідній роботі (№ держреєстру: 012315101977).

3. Результати наукових досліджень використані при розробці робочих програм та внесені у лекційні курси дисциплін «Випробування та сертифікація літальних апаратів» та «Гідравліка».

4. Результати наукових досліджень вважати реалізованими.

Голова комісії	д.т.н., професор	Дмитро ОБІДІН
Члени комісії	к.т.н., доцент	Михайло РЕПЕТЕНКО
	к.т.н., доцент	Олександр КАЩЕНКО

ДОДАТОК В АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Товариство з обмеженою відповідальністю
«Харківський електро-машинобудівний завод»
Юридична/фактична/поштова адреса: 61037, м. Харків,
проспект Героїв Харкова, 199
Тел.(057) 728-20-80
http://www.khemz.com.ua
e-mail: officekhemz@gmail.com.ua

Вих № 01/08 від 15.01.2026

АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи
Сергієнка Сергія Анатолійовича
"Створення методів тривимірного моделювання, проєктування, розрахунку та впровадження багатокомпонентних конструкцій у виробництві великих машин постійного струму"
на ТОВ "Харківський електро-машинобудівний завод"

Даним актом підтверджується, що наукові результати дисертаційної роботи Сергієнка Сергія Анатолійовича впроваджені в повному обсязі при проєктуванні, виробництві та складанні великих машин постійного струму. Методика використовувалася в частині оптимізації конструкції та уточненого визначення напружено-деформованого стану найбільш навантажених вузлів електричних машин постійного струму.

Робота проводилася відповідно до "Енергетичної стратегії України на період до 2035 р.", що схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України № 605-р. від 18.08.2017 р., та "Енергетичної стратегії України на період до 2050 р.", що схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України №373-р від 21 квітня 2023 р.

ТОВ "ХЕМЗ" Анатолій ДЕНИСЕНКО

УКРАЇНА ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ХАРКІВСЬКИЙ ЕЛЕКТРО-МАШИНОБУДІВНИЙ ЗАВОД» №39939052 місто Харків