

УДК 621.313322-82:539.3

doi: 10.32620/aktt.2026.4sup2.06 :

О. М. БОГОЖАВЕЦЬ

*Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»,
Харків, Україна*

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ТА БАГАТОСЕКЦІЙНИХ КОРПУСІВ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПУ

Предметом дослідження є напружено-деформований стан багатокомпонентних багатосекційних корпусів статорів вертикальних гідрогенераторів за дії експлуатаційних і аварійних навантажень. **Метою** роботи є визначення особливостей напружено-деформованого стану багатокомпонентних багатосекційних корпусів гідрогенераторів вертикального типу на основі серії тривимірних розрахунків методом скінчених елементів та встановлення конструктивних чинників, що визначають їх загальну жорсткість, максимальні переміщення та локальні концентрації напружень. **Завдання** дослідження: побудова повнорозмірних тривимірних скінченно-елементних моделей двох корпусів різного конструктивного виконання, задання умов фундаментного закріплення та розрахункових навантажень, визначення характерних зон концентрації напружень і максимальних переміщень, а також оцінювання впливу товщини полиць і обшивки на міцність і жорсткість конструкції. **Методи дослідження** ґрунтувалися на тривимірному скінченно-елементному моделюванні з відтворенням основних несучих компонентів корпусу та подальшим аналізом полів еквівалентних напружень за Мізесом і результуючих переміщень. Для першого корпусу досліджено напружено-деформований стан за аварійного режиму навантаження. Для другого корпусу виконано порівняння двох конструктивних варіантів зі зміненою товщиною полиць і обшивки за однакових умов закріплення та прикладання навантажень. **Отримані результати** показали, що максимальні напруження формуються переважно в місцях з'єднання ребер жорсткості, вертикальних елементів, полиць і кільцевих складових корпусу. **Висновки.** Встановлено, що зменшення товщини основних несучих елементів спричиняє одночасне зростання еквівалентних напружень і переміщень, а отже, знижує жорсткість конструкції. Показано, що оцінювання працездатності багатокомпонентних корпусів має ґрунтуватися не лише на визначенні максимальних переміщень конструкції загалом, а й на аналізі локального напруженого стану окремих несучих елементів і зон їх з'єднання. **Наукова новизна** полягає у встановленні характерних зон концентрації напружень і визначенні впливу товщини полиць і обшивки на міцність і жорсткість корпусу.

Ключові слова: гідрогенератор; корпус статора; багатосекційна конструкція; багатокомпонентна конструкція; напружено-деформований стан; жорсткість корпусу.

Вступ

Корпус статора гідрогенератора вертикального типу є великогабаритною конструкцією, яка насамперед забезпечує розміщення та фіксацію шихтованого осердя з обмоткою, а також сприймає навантаження від установлених елементів і передає їх на фундамент. Конструктивно корпус статора утворений сукупністю взаємодіючих елементів – вертикальних стояків, ребер жорсткості, обшивок, стикових плит і фундаментних опор. З огляду на технологічні обмеження виготовлення, транспортування та монтажу корпуси потужних гідрогенераторів зазвичай виконують із кількох секторів, які після встановлення на фундамент з'єднують у замкнену кільцеву систему.

Під час виготовлення, монтажу та експлуатації корпус статора сприймає такі основні навантаження, як власна вага, вага осердя, та додаткові наванта-

ження, зумовлені зусиллями під час монтажу, температурними впливами, електромагнітними силами за нормальних і несиметричних режимів, а також короточасними аварійними навантаженнями. Їх дія може спричиняти деформації корпусу та, як наслідок, зміну геометрії повітряного зазору, а також виникнення локальних концентраторів напруження, особливо в місцях з'єднання ребер жорсткості, стиковальних плит секторів, передавання зусиль на фундамент.

Напружено-деформований стан таких конструкцій визначається не лише геометричними й механічними характеристиками окремих елементів, а й їх просторовою взаємодією, жорсткістю міжсекційних з'єднань і умовами фундаментного закріплення. Тому використання спрощених розрахункових схем не завжди дає змогу з достатньою точністю оцінити перерозподіл навантажень між компонентами корпусу.



Особливої уваги потребує порівняльний аналіз корпусів різного конструктивного виконання, які відрізняються кількістю секторів, конфігурацією несучих елементів, конструкцією стиків і схемою обпирання на фундамент. Установлення спільних закономірностей їх деформування є необхідним для обґрунтування конструктивних рішень і вдосконалення підходів до розрахункового оцінювання міцності та жорсткості корпусів статорів.

Метою роботи є визначення особливостей напружено-деформованого стану багатокомпонентних багатосекційних корпусів гідрогенераторів вертикального типу на основі серії тривимірних розрахунків методом скінчених елементів і встановлення конструктивних чинників, що визначають їх загальну жорсткість, максимальні переміщення та локальні концентрації напружень.

1. Сучасний стан розробок за темою дослідження

Сучасні дослідження механічного стану гідрогенераторів здебільшого спрямовано на визначення причин вібрації статора, оцінки власних частот і форм коливань, а також встановлення характеристик електромагнітних сил, які виникають за різних режимів роботи. Для розв'язання цих задач використовують експериментальні вимірювання, аналітичні залежності, спрощені розрахункові схеми та тривимірне моделювання методом скінчених елементів.

Роботи [1-3] присвячено дослідженню вібраційного стану статорів реальних гідрогенераторів із поєднанням натурних вимірювань та чисельного моделювання.

У роботі [1] розглянуто корпус статора, утворений кільцевими плитами, ребрами та вертикальними стояками. Встановлено, що таке конструктивне виконання забезпечує можливість компенсації температурних деформацій, утім знижує радіальну жорсткість корпусу та підвищує чутливість до електромагнітного впливу. У дослідженні [2] механічний стан корпусу статора було визначено під дією електромагнітних навантажень, що спричинені статичним і динамічним ексцентриситетом, а також деформацією ротора. Запропонований у роботі [3] експериментальний метод дає змогу визначити модальні характеристики змонтованого статора шляхом його збудження магнітними імпульсами. Перевагою зазначених досліджень є верифікація результатів на реальних конструкціях. Утім, основну увагу в цих роботах зосереджено на причинах і параметрах коливань, тоді як локальний напружено-деформований стан конструктивних елементів корпусу статора не розглянуто.

Окремий напрям досліджень становить розроблення спрощених методів визначення власних частот і форм коливань статора [4 - 6]. Зокрема, в роботі [4]

зіставлено результати аналітичної кільцевої моделі, декількох скінченно-елементних моделей і експериментального модального аналізу. Показано, що точність визначення власних частот істотно залежить від прийнятих еквівалентних характеристик шихтованого осердя, способу укладання обмотки та жорсткості зв'язку осердя з корпусом. У роботі [5] для зменшення обчислювальної трудомісткості запропоновано використовувати тривимірну модель статора на основі оболонкових скінчених елементів. Інший підхід реалізовано в роботі [6], де застосовано аналітичну балкову модель, перевірену для статорів різних габаритів, зокрема для гідрогенератора великої потужності. Такі моделі забезпечують достатню точність визначення глобальних динамічних характеристик при порівняно невеликих обчислювальних витратах. Водночас використання еквівалентних параметрів жорсткості і спрощене подання геометрії обмежують їх застосування для визначення локальних напружень у конструктивно неоднорідних елементах корпуса.

Важливою складовою механічного розрахунку статора є достовірне визначення електромагнітних навантажень. У роботах [7-9] досліджено вплив нерівномірності повітряного зазору й ексцентриситету ротора на розподіл електромагнітних сил. У роботі [7] використано фактичну геометрію нерівномірного повітряного зазору великого гідрогенератора, що дало змогу точніше визначити несиметричне магнітне тяжіння порівняно з ідеалізованими моделями. У роботі [8] за допомогою методу скінчених елементів було проаналізовано результуючі радіальні сили за різних значень ексцентриситету та режимів роботи. У дослідженні [9] розглянуто радіальний, осьовий і комбінований ексцентриситет і встановлено їх вплив на положення найбільш навантажених областей статора. Отримані в цих роботах результати є важливими для формування вихідних навантажень для розв'язання механічної задачі. Однак механічну реакцію зібраного багатокомпонентного корпусу, взаємодію його секторів і перерозподіл зусиль між фундаментними опорами не було досліджено.

Експериментальну оцінку технічного стану вертикального гідрогенератора за різних режимів роботи було виконано в роботі [10]. Аналіз вібрацій без навантаження, зі збудженням обмотки та під час роботи в номінальному режимі дали змогу виявити режими з підвищеними амплітудами та контролювати стан агрегату. Водночас вимірювання на опорних і підшипникових вузлах не дають повної інформації про розподіл напружень у компонентах корпуса та місцеві концентрації напружень.

Сучасні тенденції розвитку багатофізичного моделювання гідрогенераторів узагальнено в роботі [11]. Поєднання електромагнітного, теплового, механічного та гідрогазодинамічного розрахунків дає

змогу врахувати взаємозв'язок процесів під час експлуатації агрегату. Разом із тим такі моделі потребують значного обсягу вихідних даних та істотних обчислювальних ресурсів. Крім того, у відомих багатофізичних дослідженнях досі не сформовано єдиного підходу до порівняння напружено-деформованого стану багатосекційних корпусів різного конструктивного виконання.

Окремі праці присвячено детальному аналізу локальних вузлів гідрогенераторів із застосуванням контактних і пружно-пластичних моделей. Зокрема, в роботі [12] досліджено напружений стан вузла кріплення полюса ротора та визначено локальні зони концентрації напружень. Такі дослідження підтверджують необхідність детального аналізу з'єднань і контактних поверхонь великогабаритних електричних машин. Однак аналіз окремого вузла не дає змоги оцінити загальну податливість корпусу статора та характер розподілу навантажень між його компонентами.

Таким чином, наявні дослідження достатньо повно висвітлюють питання визначення електромагнітних навантажень, власних частот і форм коливань статора, експериментального контролю рівня вібрацій і моделювання окремих вузлів. Водночас недостатньо дослідженим залишається вплив кількості монтажних секторів, конфігурації несучих елементів, конструкції міжсекційних стиків та умов фундаментного закріплення на напружено-деформований стан корпусу загалом. Тому актуальним є розроблення єдиного підходу до побудови та порівняльного аналізу тривимірних моделей корпусів різного конструктивного виконання, який дасть змогу встановити закономірності їх деформування та визначити типові зони концентрації напружень.

2. Матеріали та методи досліджень

2.1. Постановка задачі дослідження

У роботі розглянуто два корпуси статорів вертикальних гідрогенераторів, що відрізняються конструктивним виконанням. Для першого корпусу статора визначено напружено-деформований стан багатокomпонентної конструкції під дією розрахункового аварійного навантаження. Для другого досліджено вплив товщини полиць і обшивки на максимальні еквівалентні напруження, переміщення та загальну жорсткість корпусу.

Розрахунки виконано на основі тривимірних скінченно-елементних моделей з урахуванням геометрії основних несучих елементів, умов фундаментного закріплення та прийнятих схем прикладання навантажень.

Задачею дослідження є визначення характерних зон концентрації напружень, максимальних переміщень і впливу товщини основних несучих елементів на міцність і жорсткість корпусу статора.

2.2. Розрахункові моделі та умови навантаження

Для досліджуваних конструкцій було побудовано повнорозмірні тривимірні моделі з відтворенням усіх конструктивних елементів. Зв'язок із фундаментом задавали закріпленням опорних поверхонь дванадцяти фундаментних плит.

Для першого корпусу скінченно-елементну сітку було сформовано з урахуванням кривизни поверхонь (рис. 1). Максимальний розмір елемента становив 100 мм, мінімальний – 10 мм.

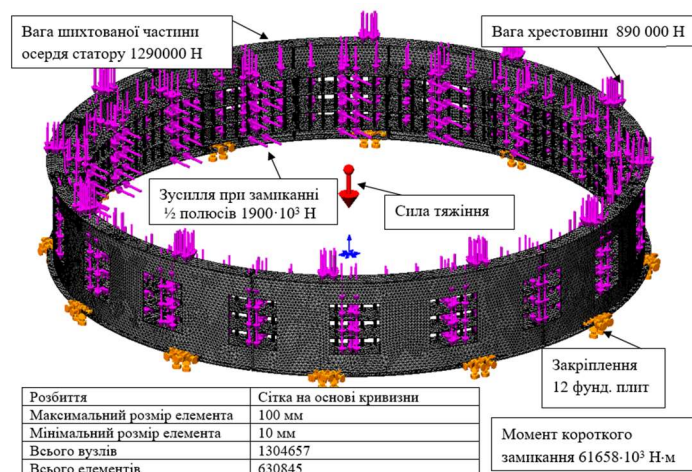


Рис. 1. Тривимірна модель першого корпусу та схема прикладання навантажень

У розрахунковій схемі враховано силу тяжіння, вагу шихтованої частини осердя, вагу хрестовини, момент подвійного короткого замикання та зусилля, що виникає при замиканні половини полюсів.

Для другого корпусу розглянуто два конструктивні варіанти: з товщиною полиць 30 мм і обшивки 20 мм та з товщиною полиць 25 мм і обшивки 16 мм.

Для обох варіантів збережено однакові умови закріплення й навантаження. Максимальний розмір елемента становив 100 мм, мінімальний – 20 мм. Розрахункова схема (рис. 2) включала силу тяжіння, вагу хрестовини, момент короткого замикання та зусилля при замиканні половини полюсів.

Для обох корпусів визначали поля еквівалентних напружень за Мізесом і результуючих переміщень. Для другого корпусу результати двох конструктивних варіантів зіставляли за максимальними значеннями цих параметрів.

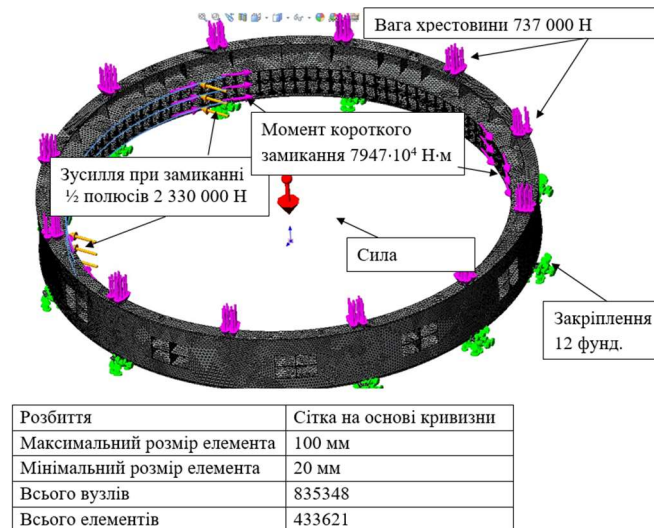


Рис. 2. Тривимірна модель другого корпусу та схема прикладання навантажень

2.3. Результати та обговорення

Для першого корпусу статора гідрогенератора як характерний аварійний режим було розглянуто замикання половини полюсів. Отриманий розподіл еквівалентних напружень свідчить про нерівномірне навантаження складових конструкцій. Найбільші значення напружень виникають у місцях приєднання трубчастих елементів (рис.3) і ребер жорсткості до корпусу (рис.4).

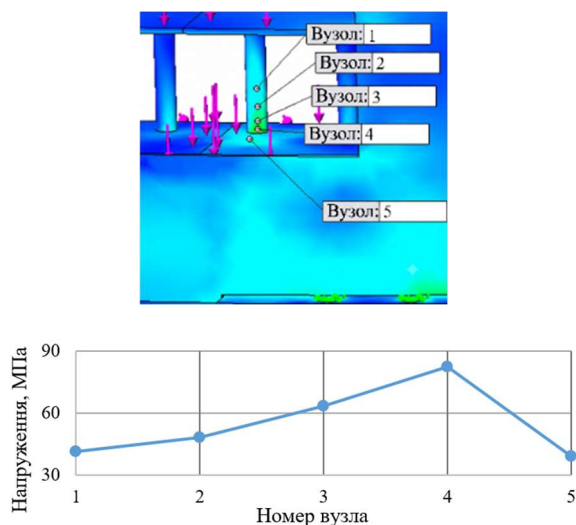


Рис. 3. Еквівалентні напруження в трубчастому елементі першого корпусу при замиканні половини полюсів

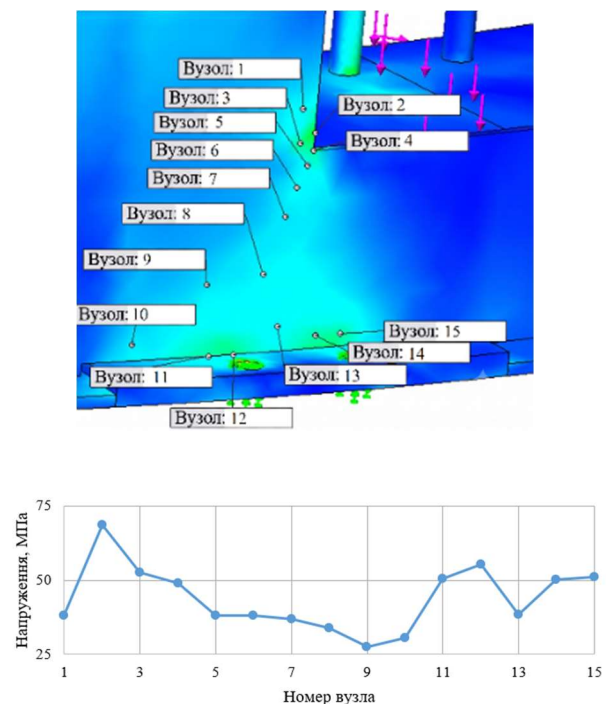


Рис. 4. Еквівалентні напруження в ребрі жорсткості першого корпусу при замиканні половини полюсів

Розподіл результуючих переміщень першого корпусу при замиканні половини полюсів наведено на рис. 5.

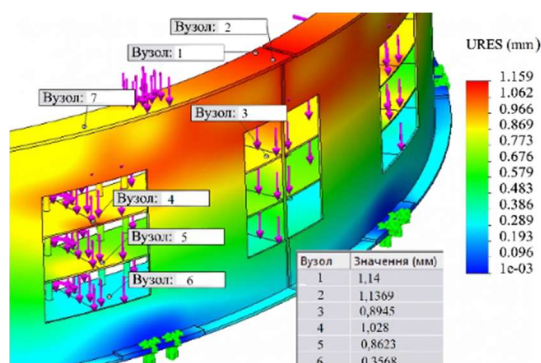


Рис. 5. Результуючі переміщення першого корпусу при замиканні половини полюсів

Максимальні напруження в трубчастому елементі становили 82,24 МПа. Для основної частини обшивки значення напруження були нижчими й не перевищували 67 МПа. Максимальне результуюче переміщення корпусу становило 1,2 мм.

Для другого корпусу зіставлено два конструктивні варіанти з різною товщиною несучих елементів, але за однакових умов навантаження та закріплення. Результати розрахунку наведені у таблиці 1 та на рисунках 6 та 7.

Таблиця 1
Результати розрахунку конструктивних варіантів другого корпусу

Параметр	Варіант 1	Варіант 2
Товщина полиць, мм	30	25
Товщина обшивки, мм	20	16
Максимальні еквівалентні напруження, МПа	90,8	113,8
Максимальні переміщення, мм	1,92	2,4

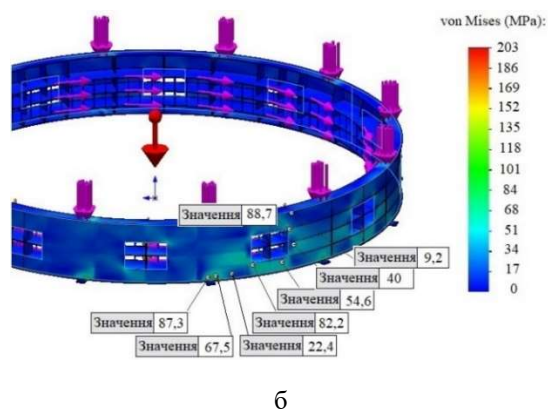
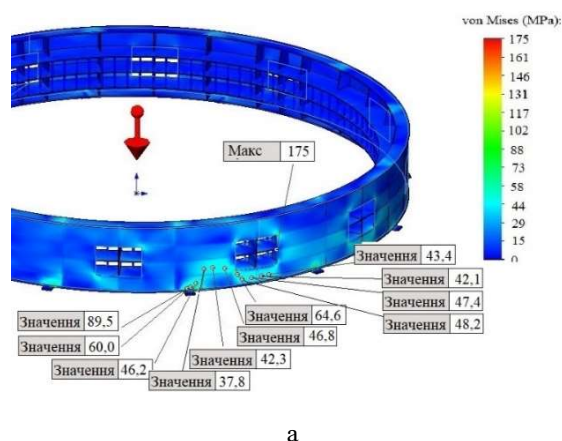
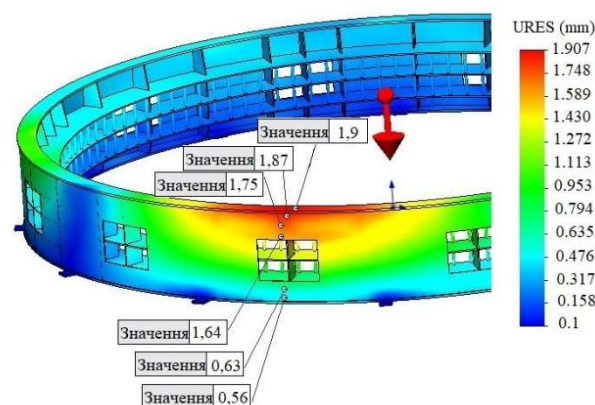


Рис. 6. Епюра напружень другого корпусу:
а – товщина полиць 30 мм, обшивки 20 мм;
б – товщина полиць 25 мм, обшивки 16 мм

Рис. 7. Результуючі переміщення другого корпусу:
а – товщина полиць 30 мм, обшивки 20 мм;
б – товщина полиць 25 мм, обшивки 16 мм

Зменшення товщини основних несучих елементів спричинило збільшення максимальних напружень приблизно на 25,2 %, а переміщень – на 24,5 %. Отже, зниження металоємності корпусу в розглянутому діапазоні супроводжується близьким за інтенсивністю погіршенням показників міцності та жорсткості. При цьому загальний характер розподілу напружень зберігається: найбільш навантаженими залишаються зони взаємодії вертикальних елементів, полиць і ребер.

2.4 Наукова новизна

1. Набув подальшого розвитку підхід до визначення напружено-деформованого стану багатокомпонентних і багатосекційних корпусів статорів вертикальних гідрогенераторів на основі повнорозмірного тривимірного скінченно-елементного моделювання.

2. Установлено, що характерні зони концентрації еквівалентних напружень формуються в місцях сполучення ребер жорсткості, вертикальних елементів і кільцевих складових корпусу.

Висновки

Проведене дослідження показало, що визначальними для міцності конструкції є не лише її загальна кільцева жорсткість, а й локальна робота зон сполучення ребер, вертикальних елементів, полиць і обшивки, в яких передаються навантаження між окремими компонентами.

Порівняння конструктивних варіантів показало, що зменшення товщини полиць і обшивки суттєво впливає як на рівень еквівалентних напружень, так і на деформативність корпусу. Тому вибір товщини основних несучих елементів має здійснюватися з урахуванням одночасного забезпечення міцності, жорсткості та раціональної металоємності конструкції.

Запропонований підхід може бути використаний під час перевірочного розрахунку та порівняння корпусів різного конструктивного виконання, а також для обґрунтування змін їх геометричних параметрів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на врахування контактної взаємодії в міжсекційних з'єднаннях і податливості елементів фундаментного закріплення.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Автор прочитав і погодився з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Experimental and Finite Element Analysis to Investigate the Vibration of Oblique-Stud Stator Frame in a Large Hydropower Generator Unit* / J. Zhou, X. Peng, R. Li et al. // *Energies*. – 2017. – Vol. 10, iss. 12. – 18 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10122175>.
2. *Electromagnetic Vibration Simulation of a 250-MW Large Hydropower Generator with Rotor Eccentricity and Rotor Deformation* / R. Li, C. Li, X. Peng, W. Wei // *Energies*. – 2017. – Vol. 10, iss. 12. – 19 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10122155>.
3. *New Method for Experimental Modal Analysis of Hydrogenerator's Stator Core Using the Excitation from the Poles* / A. de Barros, A. D'Agostini, T. Z. Penteado et al. // *The Journal of Engineering*. – 2019. – Vol. 2019, iss. 17. – P. 4341-4344. DOI: <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8225>.
4. *Practical Modal Analysis of a Prototyped Hydro-generator* / A. de Barros, A. Galai, A. Ebrahimi, B. Schwarz // *Vibration*. – 2021. – Vol. 4, iss. 4. – P. 853-864. DOI: <https://doi.org/10.3390/vibration4040048>.
5. *New Method Based on Shell Elements for Fast Calculation of the Stator Eigenfrequencies and Vibrations in Hydro Generators* / A. de Barros, A. Ebrahimi, B. Schwarz, B. Ponick // *IEEE Access*. – 2024. – Vol. 12. – P. 105418-105428. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3435353>.
6. *The Analytical Beam Element Model: Novel Approach for Fast Calculation of Vibrations in Electric Machines* / M. E. Gerlach, A. de Barros, X. Huang et al. // *Elektrotechnik und Informationstechnik*. – 2023. – Vol. 140. – P. 290-301 DOI: <https://doi.org/10.1007/s00502-023-01125-5>.
7. *Impact of Real Air-Gap Nonuniformity on the Electromagnetic Forces of a Large Hydro-Generator* / H. C. Dirani, A. Merkhoulf, A.-M. Giroux et al. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2018. – Vol. 65, iss. 11. – P. 8464-8475. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2814021>.
8. *Finite-Element Analysis of Unbalanced Magnetic Pull in a Large Hydro-Generator Under Practical Operations* / L. Wang, R. W. Cheung, Z. Ma et al. // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2008. – Vol. 44, iss. 6. – P. 1558-1561. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.916023>.
9. *A comprehensive study on stator vibrations in synchronous generators considering both single and combined SAGE cases* / W. Zhang, Y.-L. He, M.-X. Xu et al. // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2022. – Vol. 143. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108490>.
10. *Vibration Analysis of a Hydro Generator for Different Operating Regimes* / C. Hafigan, I. Pădureanu, M. Jurcu et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Applied Sciences (ICAS2016) 25-27 May*

2016, Hunedoara, Romania. – 2017. – Vol. 163. – 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/163/1/012030>.

11. Zhang, J. A Brief Review of Multi-Physics Coupling Research on Hydroelectric Generators / J. Zhang, H. Xingxing, W. Zhengwei // *Energies*. – 2025. – Vol. 18, iss. 5. – 22 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18051074>.

12. Elastic-Plastic Stress Analysis in the Pole Fixation of an Electric Generator / A. Rusu-Casandra, F. Baciuc, S. D. Pastrama, N. Iliescu // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 62, P. 5. – P. 2404-2408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.564>.

References

1. Zhou, J., Peng, X., Li, R., Xu, Y., Liu, H., Chen, D. Experimental and Finite Element Analysis to Investigate the Vibration of Oblique-Stud Stator Frame in a Large Hydropower Generator Unit. *Energies*, 2017, vol. 10, iss. 12. 18 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10122175>.

2. Li, R., Li, C., Peng, X., Wei, W. Electromagnetic Vibration Simulation of a 250-MW Large Hydropower Generator with Rotor Eccentricity and Rotor Deformation. *Energies*, 2017, vol. 10, iss. 12. 19 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10122155>.

3. de Barros, A., D'Agostini, A., Penteado, T. Z., Kato, N., Cunha, A. A., Faria, E. J., Haluska, C., Hamaji, F. H., Nabeta, S. I., Chabu, I. E. New Method for Experimental Modal Analysis of Hydrogenerator's Stator Core Using the Excitation from the Poles. *The Journal of Engineering*, 2019, vol. 2019, iss. 17, pp. 4341-4344. DOI: <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8225>.

4. de Barros, A., Galai, A., Ebrahimi, A., Schwarz, B. Practical Modal Analysis of a Prototyped Hydrogenerator. *Vibration*, 2021, vol. 4, iss. 4, pp. 853-864. DOI: <https://doi.org/10.3390/vibration4040048>.

5. de Barros, A., Ebrahimi, A., Schwarz B., Ponick, B. New Method Based on Shell Elements for Fast Calculation of the Stator Eigenfrequencies and Vibrations in Hydro Generators. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 105418-105428. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3435353>.

6. Gerlach, M. E., de Barros, A., Huang, X., Langfermann, M., Ponick, B., Ebrahimi, A. The Analytical Beam Element Model: Novel Approach for Fast Calculation of Vibrations in Electric Machines. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2023, vol. 140, pp. 290–301. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00502-023-01125-5>.

7. Dirani, H. C., Merkhof, A., Giroux, A. -M., Kedjar B., Al - Haddad, K. Impact of Real Air-Gap Nonuniformity on the Electromagnetic Forces of a Large Hydro-Generator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65, iss. 11, pp. 8464-8475. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2814021>.

8. Wang, L., Cheung, R. W., Ma, Z., Ruan, J., Peng, Y. Finite-Element Analysis of Unbalanced Magnetic Pull in a Large Hydro-Generator Under Practical Operations. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008, vol. 44, iss. 6, pp. 1558-1561. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.916023>.

9. Zhang, W., He, Y.-L., Xu, M.-X., Zheng, W.-J., Sun, K., Wang, H.-P., Gerada, D. A comprehensive study on stator vibrations in synchronous generators considering both single and combined SAGE cases. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, vol. 143. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108490>.

10. Hațiegan, C., Pădureanu, I., Jurcu, M., Nedeloni, M. D., Hamat, C. O., Chioncel, C. P., Trocaru, S., Vasile, O., Bădescu, O., Micliuc, D., Filip Nedeloni, L., Băra, A., Hațiegan, L. Vibration Analysis of a Hydro Generator for Different Operating Regimes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Applied Sciences (ICAS2016) 25–27 May 2016, Hunedoara, Romania*, 2017, vol. 163. 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/163/1/012030>.

11. Zhang, J., Xingxing H., Zhengwei W. A Brief Review of Multi-Physics Coupling Research on Hydroelectric Generators. *Energies*, 2025, vol. 18, iss. 5. 22 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18051074>.

12. Rusu-Casandra, A., Baciuc, F., Pastrama, S. D., Iliescu, N. Elastic-Plastic stress analysis in the pole fixation of an electric generator. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 62, p. 5, pp. 2404-2408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.564>.

Надійшла до редакції 22.07.2026, отримано в доопрацьованому вигляді 06.08.2026.

Дата ухвалення 19.08.2026, дата публікації 04.09.2026

DETERMINATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF MULTI-COMPONENT AND MULTI-SECTION STATOR FRAMES OF VERTICAL HYDROGENERATORS

Oleg Bohozhavs

The subject of the study is the stress-strain state of multi-component and multi-section stator frames of vertical hydrogenerators under operational and emergency loads. **The objective of the study** is to determine the specific features of the stress-strain state of multi-component, multi-section stator frames of vertical hydrogenerators through a series of three-dimensional finite element analyses and to identify the structural factors governing their overall stiffness, maximum displacements, and local stress concentrations. **The research tasks** included developing full-scale three-dimensional finite element models of two stator frames with different structural configurations; specifying the foundation restraint conditions and design loads; identifying characteristic stress concentration zones and maximum displacements; and assessing the effect of flange and shell thicknesses on the structure's strength and stiffness. **The research methods** were based on three-dimensional finite element modeling with representation of the main

load-bearing components of the stator frame, followed by analysis of the von Mises equivalent stress fields and resultant displacements. For the first stator frame, the stress-strain state under an emergency loading condition was investigated. For the second stator frame, two structural variants with different flange and shell thicknesses were compared under identical restraint and loading conditions. **The results obtained** showed that the maximum stresses occur mainly at the joints between stiffening ribs, vertical members, flanges, and annular components of the stator frame. **Conclusions.** It was established that reducing the thickness of the main load-bearing elements causes a simultaneous increase in equivalent stresses and displacements, thereby reducing the structural stiffness. It was shown that assessment of the structural performance of multi-component stator frames should be based not only on determining the maximum overall displacements but also on analyzing the local stress state of individual load-bearing elements and their joints. **The scientific novelty** lies in identifying characteristic stress-concentration zones and determining the effects of flange and shell thicknesses on the strength and stiffness of the stator frame. **The practical significance** lies in the possibility of using the obtained results for verification calculations, comparison of structural variants, and substantiation of the geometric parameters of load-bearing elements of vertical hydrogenerator stator frames.

Keywords: hydrogenerator; stator frame; multi-section structure; multi-component structure; stress-strain state; finite element method; equivalent stress; stator frame stiffness.

Богожавець Олег Миколайович – аспірант, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Oleg Bohozhavets – PhD student, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine. e-mail: o.m.bogozhavets@khai.edu. ORCID: 0009-0006-5451-2601