

Фізичні процеси та їх вплив на розвиток дефектів в осерді статора потужних генераторів

Є. О. Зайцев, М. В. Панчик

Інститут електродинаміки НАН України
Corresponding author. E-mail: zaitsev@i.ua

Paper received 27.01.20; Accepted for publication 14.02.20.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2020-224VIII27-20>

Анотація. Розглянуто основні причини, які призводять до послаблення пресування активного заліза осерді статора потужних генераторів. Проведено аналіз фізичних процесів та їх вплив на розвиток дефектів. Показано, що фізичні процеси викликані рядом факторів, які умовно можна розділити на технологічні, експлуатаційні та конструктивні. Також зазначено, що в залежності від місця виникнення, фактори поділяються на внутрішні та зовнішні. Приведена систематизація можливих дефектів технічного стану генератора в залежності від типу фактору, що впливає. Зазначено, що використання засобів контролю рівномірності розподілу зусиль пресування осердя статора дозволяє забезпечити надійність та безпечність роботи нових та вже існуючих потужних генераторів ТЕЦ, ГЕС, АГЕС та АЕС.

Ключові слова: турбогенератор, статор, фактори, осердя, пресування, зусилля.

Вступ. Технічний стан статора потужних турбогенераторів (ТГ) характеризується багатьма параметрами, серед яких вирішального значення набувають параметри, що характеризують статор як механічну систему. Однією із основних механічних властивостей статора, що визначає його працездатність, є наданий йому в процесі виготовлення стан пружного стиснення осердя, який після виготовлення забезпечується за допомогою натискних плит і стяжних призм. З часом, внаслідок експлуатаційних навантажень, виникає зниження зусиль, що стискають осердя. Це призводить до втрати запасу працездатності і є потенційною причиною виникнення небезпечних дефектів статора [1].

Огляд публікацій по темі. Виходячи з досліду типових випробувань та експлуатації ТГ типів ТГВ та ТВВ, що проводилися в останні 40 років [1-6]. У значній частині турбогенераторів через 30-40 років внаслідок різних факторів виникає зниження зусиль середнього тиску пресування на 30-40% від початкового значення. Це призводить до нерівномірності розподілу навантаження тиску пресування по колу і довжині статора, а також втрати запасу працездатності генератора в цілому, і є однією із основних потенційних причин небезпечних ушкоджень активного заліза осердя статора при експлуатації. Тому найскладнішим з точки зору проведення відновлювального ремонту є пошкодження осердя статора, яке потребує в окремих випадках заміни на новий.

Мета. Метою публікації є аналіз фізичних процесів, що впливають на розвиток дефектів активного заліза осердя статора ТГ та їх наслідків.

Матеріали та методи. Основною причиною зниження тиску пресування є усадка шихтованих пакетів осердя, що виникає в наслідок старіння, "усихання" та викришування ізоляційного лаку сегментів магнітопроводу. Крім того, на окремих турбогенераторах типу ТГВ-200 та ТГВ-300 було зафіксовано обрив шийок декількох стяжних призм в місцях закріплення натискних фланців осердя статора (в основному у верхній частині статора), що також послаблювало його запресовування [7, 8], а в роботі [9] описано метод розрахунку такого послаблення.

Слід зазначити, що одна із причин, які наведені вище, не може призвести до пошкоджень, якщо одно-

часно не матимуть місце кілька факторів впливу [10], які умовно поділяються на технологічні, експлуатаційні та конструктивні.

До *технологічних факторів* відносяться недоліки виготовлення та експлуатації осердя на які впливають кількісні (витік, витрати, тиск) і якісні (хімічний склад, вологість) характеристики охолоджувальних середовищ і мастила [10], серед яких особливо варто відмітити наступні:

- початковий середній тиск пресування, нижчий розрахункового, призводить до зменшення тиску осердя після усадки до неприпустимо малих значень;
- нерівномірний розподіл тиску пресування по колу і довжині статора, а також в радіальному напрямку;
- недостатня міцність або неправильне встановлення натискних пальців, призводить до їх пластичної деформації та (або) зміщення від початкового положення.

До *експлуатаційних факторів* відносяться чинники, що діють на осердя під час його експлуатації, серед яких особливо варто відмітити наступні:

- підвищений рівень напруги у мережі, який призводить до посилення нагріву стяжних ребер через збільшення струмів, що протікають по них;
- видовження ребер зі зміщенням назовні натискних плит і, відповідно, зниження середнього тиску пресування в результаті підвищення рівня їх нагріву;
- фрикційний вплив закріплених стрижнів на крайні пакети і натискні пальці, що виникає внаслідок фрустрації збудження, що супроводжується різким зростанням струму статора та нагріванням стрижнів обмотки;
- зміщення пакетів в торцевій зоні всередину осердя внаслідок охолодження обмоток статора дистильтом заниженої температури.

До *конструктивних факторів* в більшості випадків відносять помилки в проектуванні, серед яких особливо варто відмітити наступні:

- проектування машин за номінальними технологічними навантаженнями, які можуть значно відрізняється від реальних;
- визначення навантажень, що не враховують динамічні сили, які часто стають причиною руйнування конструктивних елементів;

– збільшення або зменшення мас елементів понад розрахункові, що є причиною зростання сил інерції, росту первісної та експлуатаційної вартості.

З іншої сторони фактори, наслідком яких є зниження тиску пресування, в залежності від місця виникнення, поділяються на внутрішні та зовнішні (рис.1).

До внутрішніх відносяться – механічні, теплові, електромагнітні, вплив внутрішнього середовища (газового, масляного та водяного). До зовнішніх – електромагнітні, кліматичні та людський фактори. В табл. 1 наведені фактори, які впливають на розвиток дефектів активного заліза осердя статора та деякі можливі наслідки, до яких такі впливи можуть призвести [3].

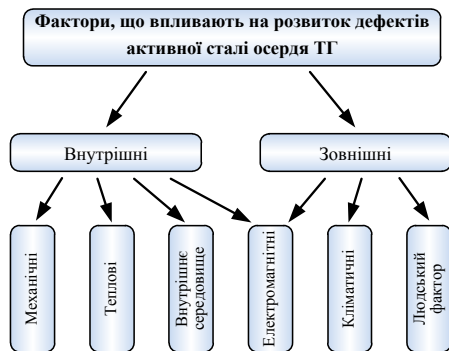


Рис. 1 Класифікація факторів, що впливають на розвиток дефектів активного заліза осердя статора ТГ

Як видно із табл. 1, для кожного із факторів, що впливають на працездатність осердя статора є характерною поява своїх, специфічних типів дефектів. При цьому найбільш вагомими факторами, що призводять до появи нерівномірності розподілу навантаження тиску пресування по колу і довжині статора є саме механічні та теплові впливи. Тому розглянемо їх більш детально.

Механічні параметри, що призводять до зниження зусилля пресування осердя [11, 12] залежать від від-

носного зміщення листів активної сталі, стирання ізоляції між листами, розпушення зубців крайніх пакетів, викришування фрагментів листів, місцеве замикання листів та нагрівання пакетів. Підвищена вібрація, що виникає, та попадання масла поміж сегменти призводять до корозійного зношування сегментів. В результаті фреттинг-корозії, якій підлягають поверхні стиснутих сталевих листів, що взаємно переміщуються, та інші деталі, на зубцях з’являється напівпровідний червоно-коричневий пил (корозійне зношування). Суміш цього пилу і продуктів змішування лаку та мастила під впливом нагрівання та вібрації перетворюється в темну масу, яка нагадує дьоготь, і має слабомагнітні властивості [2, 13].

Зниження тиску спресованості в осерді, яке почалося в торцевих зонах зубців, за несприятливих умов може поширитись на інші зони осердя. Про це буде свідчити наростання нальоту червоно-коричневого пилу в розточенні та на спинці осердя. Досить небезпечним розвитком цього процесу є збільшення нагрітої дефектної зони в осерді і перехід до лавиноподібного росту нагрівання окремих осередків зони осердя, аж до виплавлення сталі – так званої «пожежі заліза», з ушкодженням корпусної ізоляції стержнів обмотки.

До теплових характеристик відносяться значення температур (або їх перевищень) активних і конструктивних елементів турбогенераторів, їх охолоджувальних середовищ і мастильних матеріалів. Основні характерні дефекти для термічних впливів[3] наступні:

- «пожежа» в залізі як результат замикання листів;
- короткочасне збільшення зусилля пресування, яке посилює руйнування ізоляції і послаблює зусилля пресування осердя;
- зменшення зусилля пресування в результаті циклічності нагрівання-охолодження заліза температурами понад нормованих значень.

Таблиця 1. Фактори, що впливають на розвиток дефектів активного заліза осердя статора та їх наслідки

Фактор, що впливає	Прояв	Можливі відхилення технічного стану генератора
Механічний	Ослаблення зусилля пресування, підвищення амплітуди вібрацій осердя, фрикційний вплив обмотки статора, поява елементів деградації.	Деградація лакової плівки сегментів активної сталі, руйнування, викришування, замикання сегментів, самовідгвинчування гайок натискних плит, порушення кріплення осердя в корпусі статора, обриви хвостовиків стяжних призм.
Тепловий/ Термічний	Підвищені втрати в осерді та в обмотці статора, порушення вентиляції, замикання листів активної сталі.	Деградація лакової плівки сегментів активної сталі осердя, замикання сегментів, послаблення пресування осердя, локальні прояви місць «пожежі заліза».
Електромагнітний	Поява несиметричних режимів, режимами споживання реактивної потужності.	Пошкодження, аналогічні тим, що проявляються при механічних і теплових впливах, як правило, мають місце в торцевій зоні осердя.
Спеціальне середовище	Конденсована на поверхні осердя волога, наявність мастила у вигляді аерозолі.	Корозія, підвищений нагрів за умов роботи генератора із водяним охолодженням.
Кліматичний	Атмосферна волога, агресивні речовини в повітрі.	Корозія при зберіганні.
Людський	Помилки проектування.	Ослаблення кріплення осердя, деформація, замикання сегментів активної сталі, нагрів при роботі генератора.

Для зменшення впливу вищенаведених факторів на рівномірності розподілу зусиль пресування осердя статора можливе за рахунок регулярного дослідження стану призм і корекції натягу призм для збереження рівномірності розподілу між ними напружень, наприклад за допомогою засобів розглянутих в[14]. Для

цього є необхідним контроль механічних зусиль в призмах в режимі он-лайн або з заданою періодичністю, який дозволяє:

- проводити контроль стану спресованості осердя;
- відслідковувати зміни ступеню стиснення активної сталі осердя протягом всього часу його експлуа-

тації;

– забезпечити достовірний прогноз можливого відхилення параметрів статора від нормованих параметрів на основі статистичного аналізу отриманих за час експлуатації генератора даних;

– істотно підвищити надійність і безпеку роботи турбогенератора;

– забезпечити автоматичне, напівавтоматичне або ручне регулювання ступеню затягування натискних гайок для забезпечення рівномірності розподілу зусиль пресування між стяжними призмами генератора;

– надає можливість регулювати ступінь затягування призм гайками для забезпечення рівномірності розподілу між призмами зусиль віддачі активної сталі осердя, яка виникає після зняття тиску пресу [15].

Обробка та аналіз отриманих результатів вимірювання зусиль є основою для прийняття рішень про до-

даткову підтяжку ненавантажених призм [16, 17], що у свою чергу дозволяє підвищити надійність та безпечність роботи нових та вже існуючих потужних генераторів ТЕЦ, ГЕС, АГЕС та АЕС

Висновок. Отже, для забезпечення зниження пошкоджуваності призм та забезпечення рівномірності розподілу зусиль пресування осердя статора є необхідним насамперед забезпечити рівномірність розподілу зусиль між усіма призмами протягом усього періоду експлуатації ТГ. Це дозволить забезпечити механічні напруження в призмах в межах їх штатних розрахункових значень, а значить і рівномірність спресованості осердя, що у свою чергу дозволяє підвищити надійність та безпечність роботи нових та вже існуючих потужних генераторів ТЕЦ, ГЕС, АГЕС та АЕС

ЛІТЕРАТУРА

1. Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою емнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів: монографія. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. 242 с.
2. Бутов А.В. Повреждаемость и контроль зубцовых зон запеченных крайних пакетов стали сердечников статоров турбогенераторов. *Электрические станции*. 2001. №.5. С.41–47.
3. Голоднова О.С., Ростик Г.В. Анализ и мероприятия по предупреждению поврежденный сердечников статоров турбогенераторов. *Сборник «Электросила»*. 2004. №.43. С.56–64.
4. Здановський В.Г. Досвід експлуатації турбогенераторів типу ТГВ з вичерпаним ресурсом на українських ТЕС. *Новини енергетики*. 2001. №.9. С.67–63.
5. Метод и устройство контроля сердечника статора турбогенератора в процессе эксплуатации/ Кучинский К.А., Титко В.А., Крамарский В.А., Гуророва М.С. *Электротехника та електроенергетика*. 2019. С.32–41.
6. Обнаружение дефектов гидрогенераторов / Александров А.Е., Гушин Е.В., Кулаковский В.Б., Мамиконянца Л.Г., Элькинда Ю.М. М.: Энергоатомиздат, 1985. 232 с.
7. Зозулін Ю. В., Антонов О. Є., Бичік В. М. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій: навч. посібник. Харків: ПФ «Колегіум», 2011. 228 с.
8. Назолин А.Л., Поляков И.В. Виброакустическая диагностика и ресурсосберегающая эксплуатация генераторов. *Новости ЭлектроТехники*. 2008. №.5(51). С.80–83.
9. Титко О.І., Мистецький В.А. Математична модель, методика та результати розрахунку зусиль у стяжних призмах осердя статора турбогенератора за наявності дефектів на основі методу трьох моментів. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2014. №.39. С. 38–43.
10. Голоднова О.С., Ростик Г.В. Анализ и мероприятия по предупреждению поврежденный сердечников статоров турбогенераторов. *Электросила*. 2004. №.43. С. 56–64.
11. Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Диагностика турбогенераторов: учебное пособие. Л.: Наука, 1989. 119 с.
12. Kuznetsov D.V., Polyakov F.A., Shandybin M.I. Instrumental and visual inspection of turbogenerator stator cores. *Power Technology and Engineering*. 2014. Vol.48, №. 3. P. 241–248.
13. Пикульский В. А. Влияние термомеханических деформаций в статоре турбогенератора на изменение плотности пресовки в зубцовой зоне крайних пакетов. *Электротехника*. 1991. №.5. С.17–21.
14. Левицький А.С., Кобзарь К.О., Зайцев Є.О. Волоконно-оптичні вимірювачі зусиль в стяжних призмах турбогенераторів на основі решіток Бреґга. *Гідроенергетика України*. 2017. №3-4. С. 22 – 25.
15. Остерник Э.С. О механических параметрах для оценки надежности турбогенераторов разъемной конструкции. *Сборник научных трудов «Вестник НТУ «ХПИ» : Динамика та міцність машин*. 2011. №.52. С.1–15
16. Зайцев Є.О. Застосування авторегресійного аналізу на основі методу найменших квадратів в лазерних системах моніторингу. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2015. №. 2. С.43–48.
17. Перетворювач інформаційних сигналів для гібридних оптоелектронних вимірювачів переміщень/ Зайцев Є.О., Левицький А.С., Жукинський І.М., Кромпляс Б.А. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2017. №. 4. С.31–37.

REFERENCES

1. Levitsky A.S., Fedorenko G.M., Rough O.P. Condition control of powerful hydro- and turbogenerators using capacitive meters of mechanical defect parameters: monograph. Kyiv: Institute of Electrodynamics, NAS of Ukraine, 2011. 242 p.
2. Butov A.V. Damage and control of the tooth zones of baked extreme packages of steel cores of stators of turbogenerators. *Power stations*. 2001. No.5. S. 41–47.
3. Golodnova O.S., Rostik G.V. Analysis and measures to prevent damage to the cores of stators of turbogenerators. The collection of "Power". 2004. No. 43. S.56–64.
4. Zdanovsky V.G. Experience of operating TGV turbogenerators with exhausted resource at Ukrainian TPPs. *Energy news*. 2001. №.9. P.67-63.
5. Method and device for monitoring the stator core of a turbogenerator during operation / Kuchinsky K.A., Titko V.A., Kramarsky V.A., Gutorova M.S. *Electrotechnics and electricity*. 2019.S. 32–41.
6. Detection of defects in hydrogenerators / Aleksandrov A.E., Gushchin E.V., Kulakovsky V.B., Mamikonyantsa L.G., Elkinda Yu.M. M. : Energoatomizdat, 1985. 232 s.
7. Zozulin Yu. V., Antonov AE, Bychik VM Creation of new types and modernization of operating turbogenerators for thermal power plants: textbook. manual. Kharkiv: PF «Collegium», 2011. 228 p.
8. Nazolin A.L., Polyakov I.V. Vibroacoustic diagnostics and resource-saving operation of generators. *News of Electrical Engineering*. 2008. No. 5 (51). S.80–83.

9. Titko O.I., Mystetsky V.A. Mathematical model, methodology and results of the calculation of efforts in the clamping prisms of the stator core of a turbine generator in the presence of defects based on the three-point method. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. 2014. №39. Pp. 38–43.
10. Golodnova O.S., Rostik G.V. Analysis and measures to prevent damage to the cores of stators of turbogenerators. Power. 2004. No. 43. S. 56–64.
11. Glebov I.A., Danilevich Ya.B. Diagnostics of turbogenerators: a training manual. L.: Nauka, 1989. 119 s.
12. Kuznetsov D.V., Polyakov F.A., Shandybin M.I. Instrumental and visual inspection of turbogenerator stator cores. Power Technology and Engineering. 2014. Vol.48, no. 3. R. 241–248.
13. Pikulsky V.A. Influence of thermomechanical deformations in the stator of the turbogenerator on the change in the density of the pressing in the tooth zone of the extreme packages. Electrical Engineering 1991. No.5. S.17-21.
14. Levitsky A.S., Kobzar K.O., Zaitsev E.A. Fiber optic force meters in clamping prisms of turbogenerators based on Bragg gratings. Hydropower of Ukraine. 2017. №3-4. Pp. 22 - 25.
16. Zaitsev I.O. Application of auto-regression analysis based on the least-squares method in laser monitoring systems. Measuring and computing technology in technological processes. 2015. №. 2. P.43–48.
17. Information signal converter for hybrid optoelectronic displacement meters / Zaitsev EA, Levitsky AS, Zhukinsky IM, Kromplas BA Measuring and computing technology in technological processes. 2017. №. 4. P.31–37.
15. Osternik E.S. On the mechanical parameters for assessing the reliability of detachable turbogenerators. The collection of scientific works “Bulletin of NTU “KhPI”: Dynamism and technology of machines. 2011. No.52. S.1-15

Physical processes and their influence on the evolution of defects in the powerful generators stator core

I. O. Zaitsev, M. V. Panchik

Abstract. The main reasons that lead to a weakening of the pressing of active iron in the stator core of powerful generators are considered. The analysis of physical processes and their influence on the development of defects. It is shown that physical processes are caused by a number of factors that can be conditionally divided into technological, operational and structural ones. It is also noted that depending on the place of origin, the factors are divided into internal and external. The systematization of possible defects in the technical condition of the generator depending on the type of influencing factor is given. It is stated that the use of the means of control of the uniform distribution of efforts of pressing the stator core allows to ensure the reliability and safety of the operation of new and existing powerful generators of CHP, HPP, NPP and NPP.

Keywords: *turbogenerator, stator, factors, cores, pressing, effort.*