УДК 621.313.322 DOI: 10.30748/soi.2018.155.05

А.В. Строкоус

*Национальный технический университет «ХПИ», Харьков*

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ КРЕПЛЕНИЯ СЕРДЕЧНИКОВ СТАТОРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

*В работе с использованием 3D-модели и программных комплексов SolidWorks и ANSYS выполнен расчет ЭДС, наведенных потоками рассеяния в зоне крепления сердечника статора турбогенератора к корпусу, рассчитаны электромагнитные силы, действующие на систему крепления сердечника, получена картина распределения механических напряжений в элементах узла крепления, возникающих при действии электромагнитных сил с частотой 50, 100 и 200 Гц. Указано, что необходимость проведения дополнительных исследований электромагнитных сил и механических напряжений в элементах крепления сердечника статора определена особенностями работы национальной энергетической системы («пики» и «провалы» энергопотребления, значительный износ электрооборудования тепловых электростанций и т.д.). Исследования проводились для турбогенераторов мощностью 200–300 МВт, которые являются практически единственными маневренными мощностями в энергосистеме Украины и часто работают на блоках тепловых электростанций в неноминальных режимах. Собранные автором данные о турбогенераторах, которые часто работают в неноминальных режимах, позволили утверждать, что они имеют более низкую надежность, чем турбогенераторы, которые работают только в номинальных режимах. В неноминальных режимах отмечено усиление вибрации, что, в свою очередь, приводит к появлению дополнительных дефектов в наиболее нагруженных элементах машин, в частности, в узлах подвески сердечника: появление на поверхности спинки сердечника отложений продуктов фреттинг-износа, ослабление и подвижность распорных клиньев, появление усталостных трещин в сварных швах и кольцевых ребрах рамы, отвинчивание гаек стяжных шпилек, обрыв шеек стяжных шпилек и т.д. Получено распределение механических напряжений по длине стяжной шпильки при различных частотах, выполнено сравнение с допустимыми значениями напряжений для используемых материалов крепления, сделаны выводы о возможности работы турбогенераторов в диапазоне рассматриваемых частот 50, 100 и 200 Гц. Подтверждена возможность компьютерного моделирования возникающих усилий в элементах крепления в различных режимах с целью прогнозирования их рабочего состояния с рекомендацией подтверждения на практике путем установки дополнительных датчиков.*

***Ключевые слова:*** *турбогенератор, стяжная шпилька, частота, электромагнитная сила, механическое напряжение, 3D модель, программный комплекс.*

## Введение

**Постановка проблемы.** В работе современной энергосистемы Украины следует отметить ряд особенностей, которые действуют одновременно [1–4]:

– установленное на энергоблоках ТЭС генераторное оборудования практически полностью отработало срок эксплуатации, установленный заводами-изготовителями. Мировой экономический кризис, который определяет и технико-экономические возможности Украины, делает невозможным проведение замены устаревшего оборудования. Поэтому, с целью предупреждения аварийных ситуаций и обеспечения повышенного контроля над состоянием оборудования в эксплуатации, необходимо увеличивать число точек контроля различных узлов турбогенератора;

– неравномерная нагруженность электрических сетей в течение года, недели, суток приводит к необходимости регулирования вырабатываемой турбогенераторами (ТГ) электроэнергии в систему. Это определяет то, что электрооборудование постоянно работает в переходных, маневренных режимах. В Украине такое возможно только за счет вывода в неноминальные режимы эксплуатации генераторов ТЭС мощностью 200–300 МВт [5];

– снижение энергопотребления приводит к неполной загрузке воздушных линий электропередач, к генерации избыточной реактивной энергии и нарушению баланса активной и реактивной энергии в системе [6].

Эти особенности потребовали решения задачи обеспечения надежности работы энергосистемы, электрооборудования новыми методами с использованием возможностей современных компьютерных систем в режиме on-line.

**Целью статьи** является определение механических напряжений в элементах крепления сердечника статора к корпусу турбогенератора в зависимости от значений электромагнитных нагрузок, которые изменяются в зависимости от режимов его работы.

© Строкоус А.В., 2018

## Изложение основного материала

Вопросами определения механических напряжений в элементах крепления сердечников к корпусу, в частности, в стяжных шпильках, занимались многие исследователи [3–6]. Однако определение нагрузок велось для двумерных моделей. Для решения трехмерной задачи определения влияния электромагнитных нагрузок в узлах крепления сердечника статора в неноминальных режимах ТГ работы нами использованы программные комплексы SolidWorks и ANSYS. Следует отметить, что под «неноминальными режимами работы ТГ» мы понимаем изменение фактической величины вырабатываемой активной мощности (по сравнению с номинальной), изменение режимов работы за счет изменения тока обмотки возбуждения [3–6]. Для подробного исследования и, соответственно, как объект моделирования, была выбрана стяжная шпилька.

Систему уравнений, определяющую связь магнитного потока сердечника статора, его частоты, значение ЭДС в стяжных шпильках, которая приводится потоками рассеяния в зоне крепления сердечника к корпусу ТГ (рис. 1), решаем с использованием граничных условий первого рода при помощи программного комплекса SolidWorks и ANSYS [5; 7].

Рис. 1. Торцевая зона статора

Для исследуемого объекта (стяжной шпильки ТГ) была составлена математическая модель:

$$\begin{cases} \underline{\Phi}_{sh} = 2\cdot\overline{\delta\Phi}_{sh.m}\cdot l_\delta\cdot e^{j\cdot(\omega\cdot t+\gamma_0)}, \\ \underline{E}_{sh} = E_{sh.m}\cdot e^{j\cdot\left(\omega\cdot t+\gamma_0-\frac{\pi}{2}\right)}, \\ \underline{I}_{sh} = I_{sh.m}\cdot e^{j\cdot\left(\omega\cdot t+\gamma_0-\Psi-\frac{\pi}{2}\right)}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\underline{\Phi}_{sh}$ – магнитный поток, который вытесняется из сердечника статора и в стяжных шпильках, которые стягивают сердечник, наводит ЭДС, Вб;

$\overline{\delta\Phi}_{sh.m}$ – удельный магнитный поток (рассчитывается на единицу длины сердечника ТГ в направлении, параллельном оси генератора), который вытесняется в воздушный зазор между спинкой статора и внутренней поверхностью его корпуса, Вб/м;

$\omega$ – частота изменения электромагнитного поля в сердечнике статора, Гц;

$t$ – время проведения исследований, с;

$l_\delta$ – длина сердечника статора, м;

$\underline{E}_{sh}$ – значение ЭДС в шпильке сердечника статора, В;

$\underline{E}_{sh.m}$ – амплитуда наведенной ЭДС в стяжной шпильке, В;

$\underline{I}_{sh}$ – ток в контуре, который включает стяжные шпильки, нажимные фланцы, нажимную плиту, крайний пакет шихтованного сердечника статора, экран (если он предусмотрен в конструкции), А;

$I_{sh.m}$ – амплитуда тока, который наводится в контуре, указанном выше, А;

$\Psi = \mathrm{arctg}(X_k / R_k)$ – аргумент комплексного сопротивления контура замыкания токов, наведенных потоками рассеивания в контуре.

Комплексное сопротивление контура ($Z_{k\cdot sh}$), по которому протекает ток, который наводится потоками рассеяния и замыкается по стяжным шпилькам, по нажимным плитам, по листам крайнего пакета сердечника статора и по экрану, определяется:

$$Z_{k.sh} = R_{k.sh} + jX_{k.sh} = Z_{sh} + \left(\frac{1}{Z_{pl}} + \frac{1}{Z_{pac}} + \frac{1}{Z_{ekr}}\right)^{-1}, \quad (2)$$

где $Z_{sh}, Z_{pl}, Z_{pac}, Z_{ekr}$ – комплексные сопротивления стяжной шпильки, нажимной плиты, крайнего пакета активной стали сердечника статора и экрана, соответственно.

Изменения механических нагрузок ТГ при исследовании мы задавали поочередным изменением активной мощности (P), реактивной мощности (Q), изменением напряжения на выводах обмотки статора ($U_S$). При моделировании два из трех параметров считали постоянными, а один – изменяли, при этом неизменные параметры были номинальными для данного типа ТГ. Также переменными параметрами, которые задавались в поставленной задаче при расчете усилий, были приняты значения частоты изменения ЭДС в различных режимах работы ТГ:

– номинальный режим работы – 50 Гц:

– аварийный режим работы – 100 Гц;

– кратковременный аварийный режим работы – 200 Гц.

Граничные условия изменяли в зависимости от режима работы генератора (т.е. в зависимости от механических нагрузок в конструктивных элементах статора) [3–4; 8].

Численные значения электромагнитных сил (ЭМС), которые действуют на стяжные призмы сердечника статора ТГ (см. рис. 1) при различных нагрузках, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения ЭМС, которые действуют на стяжные призмы сердечника статора ТГ при поочередном изменении параметров P, Q и $U_C$

| P=var, $Q_N$=98,5 Мвар, $U_{CN}$=20 кВ | | $P_N$=300 МВт, Q= var, $U_{CN}$=20 кВ | | $P_N$=300 МВт, $Q_N$=98,5 Мвар, $U_C$=var | |
|---|---|---|---|---|---|
| P, МВт | Величина ЭМС, Н | Q, Мвар | Величина ЭМС, Н | $U_S$, кВ | Величина ЭМС, Н |
| 0 | 104,8 | -72 | 105,3 | 19 | 130,5 |
| 200 | 141,5 | 0 | 116,0 | 19,5 | 135,0 |
| 300 | 145,2 | 184 | 147,5 | 20 | 145,2 |

При моделировании были использованы реальные значения геометрических размеров и зазоров в системе подвески сердечника статора и сборочных узлов турбогенератора ТГВ 300-2У3, физические параметры материалов, из которых выполнены эти элементы. На рис. 2 приведена трехмерная модель стяжной шпильки, на рис. 3 – схема зоны установления стяжной шпильки между сердечником и корпусом статора, которая используется при моделировании.

Рис. 2. Трехмерная модель стяжной шпильки статора

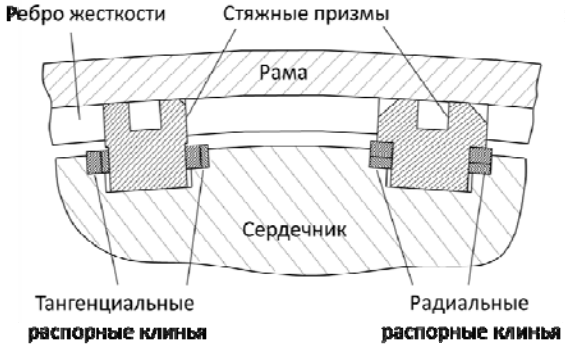


Рис. 3. Схема установки стяжных призм (шпилек) между сердечником и корпусом ТГ

На рис. 3 показано дополнительное крепление стяжных шпилек, которое используется для ужесточения крепления шпильки и снижения влияния вибрации, передаваемой от сердечника на корпус статора. Результаты исследования влияния ЭМС на стяжные шпильки сердечника статора при различных частотах электромагнитных полей (50, 100 и 200 Гц) представлены на рис. 4, где показано изменение напряжений, возникающих в стяжных шпильках в процессе работы по длине шпильки. На рис. 4 указана граница предела текучести стали $\sigma_{тек}$=620 Н/мм$^2$, из которой изготовлена шпилька (квадратный профиль, сталь 09Г2С).

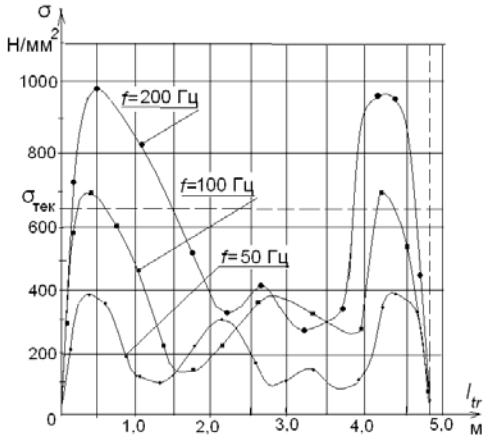


Рис. 4. Распределение напряжений в стяжных шпильках по их длине (4,8 м)

Результаты моделирования были сопоставлены с результатами, полученными на ТГ, которые работают на действующих энергоблоках ТЭС [5–7].

Анализ результатов моделирования показал следующее:

– наибольшее значение механических напряжений на стяжных шпильках наблюдается со стороны контактных колец ТГ (на рис. 4 эта область находится в правых частях шпилек);

– при работе ТГ с частотой 50 Гц возникающие механические напряжения в шпильках меньше максимально допустимых: 394 Н/мм$^2$ при допустимом пределе текучести материала шпильки (620 Н/мм$^2$), и не могут существенно повлиять на прочностные характеристики системы «корпус – подвеска – сердечник»;

– при работе ТГ с частотой 100 Гц наблюдается появление зон с повышенной механической напряжением, которые достигают значения 670 Н/мм$^2$, что, при длительном режиме работы, может привести к аварийной ситуации и выходу из строя ТГ;

– при работе ТГ с частотой 200 Гц зафиксировано максимальное механическое напряжение в стяжных шпильках (980 Н/м$^2$), что недопустимо даже при кратковременном режиме работы.

Результаты проведенных теоретических исследований по оценке влияния электромагнитных нагрузок с различной частотой (50, 100 и 200 Гц) на значение механического напряжения в стяжных шпильках подтверждают допустимость работы ТГ в режимах, предусмотренных ГОСТ 533-2000. Но при этом необходимо проведение дополнительных вибрационных исследований для выявления дефектов в системе крепления сердечника статора, выходящие за рамки типовой инструкции по эксплуатации.

Использование полученных моделей позволяет усовершенствовать существующие методики раннего диагностирования дефектов в конструкциях существующих ТГ путем дополнительного контроля состояния шпилек в зоне повышенных механических напряжений, а также прогнозировать появление дефектов при разработке новых конструкций турбогенераторов.

## Выводы

1. Результаты расчетов, полученные при помощи разработанной математической модели с использованием компьютерных средств моделирования (программных комплексов SolidWorks и ANSYS), позволили определить распределение механических напряжений в стягивающих шпильках сердечника статора при различных значениях частоты электромагнитных сил, создаваемых потоками рассеяния, которые вытесняются из спинки сердечника статора.

2. Установлено, что механические напряжения в стяжных шпильках при действии электромагнитных сил частотой 50 Гц не превосходят допустимого предела текучести для стали 09Г2С, из которой их изготавливают ($\sigma_{тек}$ = 620 Н/мм$^2$, $\sigma_{50\ Гц}$= 394 Н/мм$^2$).

3. Установлено, что при частоте 100 Гц на некоторых участках нагруженной шпильки возникают механические напряжения, превышающие $\sigma_{тек}$ стали 09Г2С.

4. При частоте электромагнитных сил 200 Гц на значительных участках стяжной шпильки возникают недопустимые механические напряжения, работа ТГ при воздействии этих сил недопустима.

4. Для своевременного выявления дефектов, которые могут возникнуть в стяжных шпильках из-за недопустимых механических напряжений, необходимо совершенствовать современные методики вибрационной диагностики, устанавливать дополнительные датчики непрерывного контроля (on-line контроль) и вводить в программу сервисных обслуживаний ТГ дополнительные обследования узлов крепления сердечника статора.

## Список литературы

1. Шевченко В.В. Определение технического состояния турбогенераторов для установления необходимости их реабилитации или замены / В.В. Шевченко, И.Я. Лизан // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 2(42). – С. 145-150.

2. Grüing A. Electromagnetic forces and mechanical oscillations of the stator end winding of turbogenerators / A. Grüing, S. Kulig // Recent Developments of Electrical Drives. – Institute of Electrical Drives and Mechatronics. University of Dortmund. – 2006. – Springer. – P. 115-126.

3. Шевченко В.В. Прогнозирование эксплуатационного ресурса турбогенераторов по данным вибрационного контроля / В.В. Шевченко, А.В. Строкоус // Norwegian Journal of Development of the International Science. – 2017. – № 10. – P. 78-83.

4. Moore W.G. Inspection, repair and rewind experience on large, air-cooled, high voltage generators / W.G. Moore, A. Khazanov // National Electric Coil. – 2010. – № 213. – P. 1-13.

5. Shevchenko V. Proposals for improving the technical state of turbogenerators in excess of the service life / V. Shevchenko // Modern Electrical and Energy Systems (MEES-2017 IEEE), Kremenchug, 2017. – P. 156-159. https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248876.

6. Кузнецов Д.В. Исследование электромагнитных сил, действующих на стяжные призмы сердечника статора турбогенератора / Д.В. Кузнецов // Электричество. – 2006. – № 10. – С. 47-53.

7. Шевченко В.В. Режимы эксплуатации турбогенераторов с учетом требований устойчивости работы энергосистемы / В.В. Шевченко. А.В. Строкоус // Энергосбережение Энергетика Энергоаудит. – 2016. – № 2. – С. 33-42.

8. Шумилов Ю.А. Уменьшение повреждаемости статоров мощных турбогенераторов, вызванных вибрацией в торцевой зоне / Ю.А. Шумилов, А.В. Штогрин // Электротехника и электромеханика. – 2014. – №1. – С. 37-39.

9. Qing G. Vibration analysis of large turbo-generator stator system / Qing Guanghui, Qiu Jiajun, Hu Yuah // International Conference on Power System Technology. October 13–17, 2002, Kunming, China. – No. 4. – P. 2168-2172. https://doi.org/10.1109/ICPST.2002.1047166.

## References

1. Shevchenko, V. and Lizan, I. (2015), “Opredeleniye tekhnicheskogo sostoyaniya turbogeneratorov dlya ustanovleniya neobkhodimosti ikh reabilitatsii ili zameny” [Determination of the technical condition of the turbine generators to establish the need for their rehabilitation or replacement], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 2, pp. 145-150.

2. Grüing, A. and Kulig, S. (2006), Electromagnetic forces and mechanical oscillations of the stator end winding of turbogenerators, *Recent Developments of Electrical Drives,* Institute of Electrical Drives and Mechatronics, University of Dortmund, Springer. – pp. 115-126.

3. Shevchenko, V. and Strokous, A. (2017), "Prognozirovaniye ekspluatatsionnogo resursa turbogeneratorov po dannym vibratsionnogo kontrolya" [Prediction of operational resource of turbine generators according to vibration control], *Norwegian Journal of development of the International Science*, No. 10, pp. 78-83.

4. Moore, W. and Khazanov, A. (2010), Inspection, repair and rewind experience on large, air-cooled, high voltage generators, *National Electric Coil*, No. 213, pp. 1-13.

5. Shevchenko, V. (2017), Proposals for improving the technical state of turbogenerators in excess of the service life, *Modern Electrical and Energy Systems (MEES-2017 IEEE), Kremenchug*, pp. 156-159. https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248876.

6. Kuznetsov, D. (2006), "Issledovaniye elektromagnitnykh sil. deystvuyushchikh na styazhnyye prizmy serdechnika statora turbogeneratora" [Investigation of electromagnetic forces that act on the clamping prisms of the stator core of a turbogenerator], *Electricity*, No. 10, pp. 47-53.

7. Shevchenko, V. and Strokous, A. (2016), "Rezhimy ekspluatatsii turbogeneratorov s uchetom trebovaniy ustoychivosti raboty energosistemy" [Modes of operation of turbogenerators with the requirements of the stability of the power system], *Energy Saving. Energy. Energy Audit*, No. 2, pp. 33-42.

8. Shumilov, Yu. and Shtogrin, A. (2014), "Umensheniye povrezhdayemosti statorov moshchnykh turbogeneratorov, vyzvannykh vibratsiyey v tortsevoy zone" [Reduced damage to stator power turbogenerators caused by vibration in the end zone], *Electrical engineering and electromechanics*, No. 1, pp. 37-39.

9. Qing, G., Qiu, J. and Hu, Y. (2002), Vibration analysis of large turbogenerator stator system, *International Conference on Power System Technology*. October 13-17 2002, No. 4, Kunming, China, pp. 2168-2172. https://doi.org/10.1109/ICPST.2002.1047166

*Надійшла до редколегії 15.10.2018*
*Схвалена до друку 11.12.2018*

***Відомості про автора:***

**Строкоус Антон Вікторович**
аспірант кафедри
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0002-1934-524X

***Information about the authors:***

**Anton Strokous**
Doctoral Student
of the National Technical University "KhPI",
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-1934-524X

## ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ НАПРУГИ В ЕЛЕМЕНТАХ КРІПЛЕННЯ ОСЕРДЬ СТАТОРІВ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ

А.В. Строкоус

*В роботі, з використанням 3D-моделі і програмних комплексів SolidWorks і ANSYS, виконаний розрахунок ЕРС, наведених потоками розсіювання в зоні кріплення осердя статора турбогенератора до корпусу, розраховані електромагнітні сили, що діють на систему кріплення осердя, отримана картина розподілу механічних напружень в елементах вузла кріплення, що виникають при дії електромагнітних сил з частотою 50, 100 і 200 Гц. Зазначено, що необхідність проведення додаткових досліджень електромагнітних сил і механічної напруги в елементах кріплення осердя статора визначена особливостями роботи національної енергетичної системи («піки» і «провали» енергоспоживання, значний знос електроустаткування теплових електростанцій і т.д.). Дослідження проводилися для турбогенераторів потужністю 200–300 МВт, які є практично єдиними маневреними потужностями в енергосистемі України і часто працюють на блоках теплових електростанцій в неномінальних режимах. Зібрані автором дані про турбогенератори, які часто працюють в неномінальних режимах, дозволили стверджувати, що вони мають більш низьку надійність, ніж турбогенератори, які працюють тільки в номінальних режимах. У неномінальних режимах відзначено посилення вібрації, що, в свою чергу, призводить до появи додаткових дефектів в найбільш навантажених елементах машин, зокрема, в вузлах підвіски осердя статора до корпусу: визначена поява на поверхні спинки осердя відкладень продуктів фретинг-зносу, ослаблення і рухливість розпірних клинів, поява втомних тріщин в зварних швах і кільцевих ребрах рами, ослабленню гайок та обрив шийок стяжних шпильок. Отримано розподіл механічної напруги по довжині шпильки, що стягує, при різних частотах, виконано порівняння з допустимими значеннями напружень для використовуваних матеріалів кріплення, зроблені висновки про можливість роботи турбогенераторів в діапазоні розглянутих частот 50, 100 і 200 Гц. Підтверджено можливість комп'ютерного моделювання виникаючих зусиль в елементах кріплення в різних режимах з метою прогнозування їх робочого стану з рекомендацією підтвердження на практиці шляхом установки додаткових датчиків.*

***Ключові слова:*** *турбогенератор, стяжна шпилька, частота, електромагнітна сила, механічне напруження, 3D модель, програмний комплекс.*

## DETERMINATION OF MECHANICAL STRESSES IN THE FASTENING ELEMENTS OF THE STATOR CORES OF TURBOGENERATORS

A. Strokous

*The article analyzes the vibration state of turbogenerators with a power of 200-300 MW, which for a long time worked in non-nominal modes at thermal power plants in Ukraine and Russia. The state of Ukraine's electrical networks and the uneven electricity consumption during the day and month led to the need to reduce the load of turbogenerators to 70%, 50% or less in comparison with their nominal capacity. Operation in such non-nominal modes increases the wear of all turbogenerator elements. The core of the stator, which is made of thin plates, and the system of its attachment to the body are destroyed especially intensively. The author specified the standard values of the stator core vibration and the system of its attachment to the housing, which are used in the service and repair of power plants. Comparison of the experimentally obtained results on power plant units with regulatory vibration standards for such generators was carried out. The results of the conducted researches showed that turbogenerators that operate more than the service life established by the manufacturing plants have a greater wear of the stator core attachment points to the hull (frame, clamping prisms, legs) than turbogenerators that operated only in rated conditions. It is indicated that such turbogenerators require additional repair and restoration work in order to extend their life. Practical recommendations for reducing the vibration of stators of turbogenerators are proposed. Installation of dynamic vibration dampers, reinforcement of the core suspension design refers to such solutions. The need to restore the isolating properties of tie prisms from vibration, increase the tightness of the weakened upper prisms was noted. Power batteries on the turbogenerators stopped in repair are proposed to be installed to ensure a constant state of compression of the extreme and central packets. The new design of improved stopping devices, which is currently used for repairs, is proposed to strengthen the fixation of the clamp prisms, which are weakened. Such a design is developed and implemented when creating new turbogenerators and carrying out repairs at the State Enterprise "Plant" Electrotyazhmash ", (Ukraine, Kharkov). The proposed measures were successfully implemented at domestic and foreign thermal power plants during repairs and modernization of turbogenerators. Applications of the proposed solutions are checked only on turbogenerators with a capacity of 200 and 300 MW, which are called "maneuverable", because the reduction in the power generation capacity during periods of reduced consumption (night consumption dips) is possible only for such machines. The use of larger turbogenerators (500, 800 or 1000 MW) is unacceptable to solve these problems, because the amplification of vibration and destruction of the fastening system, which was noted for generators with a capacity of 200-300 MW, will be greater. This conclusion was drawn on the basis of experimental data collected by the author. In conclusion, it was concluded that it is impossible to completely exclude the increase in the vibration of the stators of turbogenerators and the destruction of the stator suspension system to the body when the machine is in operation more than the rated service life of the specified technical solutions. It is recommended to perform a complete replacement of these units with economic feasibility.*

***Keywords:*** *turbogenerator, coupling pin, frequency, electromagnetic force, mechanical stress, 3D model, software package.*