



ДЕМПФИРОВАНИЕ ШИН КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СТАТОРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

С.Н. Гаврилов¹, Ю.К. Петреня²

¹ОАО «НПО ЦКТИ», г. Санкт-Петербург

²ПАО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург

Резюме: Работа посвящена рассмотрению вопросов демпфирования колебаний шин статоров турбогенераторов. Показана актуальность проблемы обеспечения вибрационной надежности статоров мощных турбогенераторов. На модельной задаче проведена серия расчетных исследований по оценке влияния демпфирующих свойств материалов на амплитудно-частотные характеристики шин статоров турбогенераторов. На основании результатов расчетных исследований предложена конструкция шины, содержащая слой вибропоглощающего материала. Применение в шинах вибропоглощающего полимерного материала может до двух раз уменьшить амплитуду колебаний и, соответственно, значительно улучшить вибрационную надежность элементов статора турбогенератора. Результаты выполненного исследования защищены патентом.

Ключевые слова: демпфирование, вибрационные характеристики, статор турбогенератора, расчетные исследования.

DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-19-27.

Для цитирования: Гаврилов С.Н., Петреня Ю.К. Демпфирование шин как средство повышения вибрационной надежности статоров турбогенераторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 19-27. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-19-27.

BUS BAR DAMPING IS A WAY OF INCREASING THE VIBRATION RELIABILITY OF TURBOGENERATOR STATORS

S.N. Gavrilov¹, Yu.K. Petrenya²

¹JSC "NPO CKTI", Saint-Petersburg

²PJSC "Power Machines", Saint-Petersburg

Abstract: The work is devoted to the consideration of the bus bar ring damping of turbogenerator stators. The urgency of the problem of ensuring the vibrational reliability of high-power turbogenerator stators is shown. On the model problem, a series of computational studies on the effect of damping properties of materials on the amplitude-frequency characteristics of the stator buses of turbogenerators was carried out. Based on the results of the computational studies, a bus bar design is proposed, comprising a layer of a vibration-absorbing material. The use of a vibration-absorbing polymeric material in bus bar ring can reduce the amplitude of oscillations up to two times and, accordingly, significantly improve the vibration reliability of the stator elements of the turbogenerator. The results of the research are protected by a patent.

Key words: *damping, vibration characteristics, turbogenerator stator, calculate study.*

For citation: *S.N. Gavrilov, Iu.K. Petrenya Bus bar damping is a way of increasing the vibration reliability of turbogenerator stators. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2019. vol. 21. № 1-2. pp.19-27. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-19-27.*

Проблема вибрационной надежности статоров турбогенераторов привлекает к себе внимание достаточно давно. Известно, что по мере роста единичной мощности турбогенераторов возрастают электродинамические силы, действующие на лобовые части обмотки статора, что приводит к увеличению уровня вибрации и, как следствие, к усталостным повреждениям элементов. В 60–70-х годах, при достижении номинальной мощности 200–300 МВт по этим причинам резко возросло число отказов статорной обмотки [1]. Трудности возникли при создании и эксплуатации первого двухполюсного генератора мощностью 500 МВт, а создание головного турбогенератора мощностью 800 МВт оказалось неосуществимым без принятия принципиально новых конструктивных решений. В настоящее время анализ отказов турбогенераторов ТБВ-1000 [2] показал, что наиболее повреждаемыми узлами статоров являются стяжные призмы, зубцы крайних пакетов сердечника, выводные и соединительные шины обмотки. Основной причиной разрушения является усталость металлов, вызванная повышенной вибрацией под влиянием переменных сил электромагнитного происхождения.

Проблему уменьшения уровня вибрации [3] объекта необходимо рассматривать в каждом случае особо, с учетом особенностей объекта и конструктивных возможностей его изменения. Однако можно указать два способа снижения колебаний, общих для всех механических систем. Первый способ состоит в устранении резонансных явлений, то есть изменении собственных частот объекта таким образом, чтобы в отстраиваемом диапазоне частот собственные частоты объекта и вынуждающие частоты источника не совпадали. Для этого необходимо расчетным путем определять вибрационные характеристики конструкции с требуемой для практики точностью, что для статоров турбогенераторов, в силу известной неопределенности динамических свойств системы, представляет определенную проблему [4, 5]. Второй способ заключается в увеличении диссипации механической энергии в объекте. Этот способ виброзащиты называется демпфирование.

Демпфирование вибрации обусловлено действием диссипативной силы, которая возникает при движении механической системы и вызывает рассеивание механической энергии.

Причины, приводящие к рассеянию энергии в упругих системах, условно могут быть разбиты на три группы [6]:

- первую группу составляют потери энергии в окружающую среду (*«внешнее» трение*);
- ко второй группе относят потери, вызванные внутренними процессами в материале системы (*«внутреннее» трение*);
- третью группу образуют потери, связанные с трением в опорах, шарнирах и т. п. (*«конструкционное» трение*).

Точное описание демпфирующих сил, связанных с диссипацией энергии, является чрезвычайно сложной задачей. Они могут зависеть от перемещений, скоростей, напряжений или от других факторов.

Учет конструкционного трения приводит, как правило, к нелинейным соотношениям. Внутреннее трение связано с диссипативными процессами, происходящими во время колебаний в материале элементов системы. Разнообразие свойств конструкционных

материалов, в частности их диссипативных свойств, обусловило многообразие моделей учета диссипации энергии при динамических процессах. Условно эти модели можно разделить на два класса: к первому относят нелинейные модели, описывающие гистерезисные явления при циклическом деформировании, ко второму – модели, связанные с вязкоупругим поведением материалов при деформировании.

Большинство механизмов диссипации энергии в колебательных системах являются нелинейными и не могут быть сведены ни к линейному вязкому демпфированию, ни к линейному гистерезисному демпфированию. Тем не менее, в практической деятельности удобнее использовать линейные модели демпфирования, поскольку они часто дают удовлетворительное приближение. Относительно простой линейной моделью является модель внешнего трения; считается, что диссипативные силы вязкие и пропорциональны скоростям движения.

Для описания одномерного процесса деформирования вязкоупругих сред могут быть использованы реологические модели, состоящие из линейных пружин и демпферов, соединенных определенным образом. Соотношение между напряжением и деформацией для упругого элемента определяется законом Гука $\sigma = E\epsilon$, а для демпфера $\dot{\epsilon} = \sigma/b$, где σ – напряжение; ϵ – деформация; b – вязкость материала; E – модуль упругости.

Различные соединения (параллельные и последовательные) позволяют моделировать уравнения, связывающие напряжение, деформацию и их производные по времени.

Наиболее простой моделью, сочетающей упругие и вязкие свойства, является модель Максвелла (рис. 1). Последовательное соединение двух основных элементов дает модель твердого тела, обладающего свойствами жидкости. При быстром нагружении тела соответствующие модели Максвелла проявляют упругие свойства (закон Гука), а при медленном нагружении – вязкие (закон Ньютона): $\dot{\epsilon} = \dot{\sigma}/E + \sigma/b$.

Модель твердого тела, состоящая из параллельно соединенных элементов упругости и вязкости, называют моделью Фойхта (рис. 1). При таком соединении деформация элементов одна и та же, а напряжение состоит из суммы напряжений левой и правой ветвей: $\sigma = E\epsilon + b\dot{\epsilon}$.

В общем случае ни одна из этих моделей не описывает достаточно точно поведение вязкоупругих материалов, поэтому часто используют модель стандартного линейного тела. Она представляет собой обобщение моделей Максвелла и Фойхта и состоит из одного вязкого элемента и двух упругих, с одним из которых вязкий элемент соединён параллельно, а с другим – последовательно.

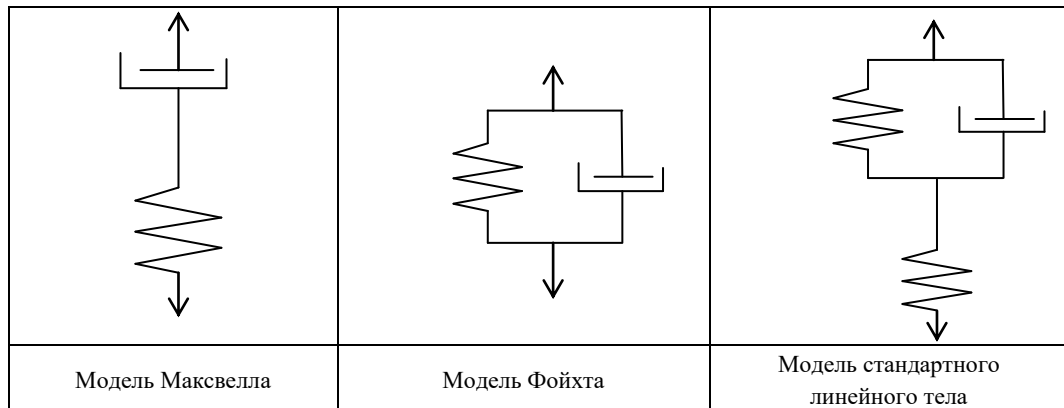


Рис.1. Реологические модели

На практике свойство материала рассеивать энергию при его циклическом деформировании обычно оценивается с точки зрения его способности гасить колебания упругой системы.

Независимо от природы источников энергетических потерь характеристикой демпфирующих свойств упругой системы считается относительное рассеяние энергии ψ , под которым понимают отношение рассеянной энергии ΔW за цикл установившихся колебаний к амплитудному значению потенциальной энергии W упругой системы:

$$\Psi = \frac{\Delta W}{W}.$$

Относительное рассеяние энергии ψ , часто называют коэффициентом рассеяния (поглощения или диссипации) энергии.

Широкое распространение получил коэффициент механических потерь:

$$\eta = \frac{b\omega_0}{c} = \frac{\Psi\omega_0}{2\pi\omega},$$

При резонансе, когда $\omega = \omega_0$,

$$\eta = \frac{\Psi}{2\pi} = \frac{\Delta W}{2\pi W}.$$

В вычислительной практике (пакет конечно-элементных программ ANSYS) используется уравнение состояния модели стандартного линейного тела, демпфирование при выполнении «полного» гармонического анализа (*full harmonic analysis*) определяет коэффициент механических потерь (*loss factor*) η как постоянное демпфирование, а также для конкретного материала можно задавать через реальные константы как функцию частоты и (или) температуры.

Рассмотрим, как можно увеличить демпфирование системы для уменьшения амплитуды колебаний.

Чтобы добавленная система демпфирования была эффективной, увеличение демпфирования должно быть значительно больше, чем первоначальное демпфирование. Наиболее распространенный способ увеличения демпфирования состоит в применении в ответственных местах конструкции хорошо демпфирующих полимерных материалов. Конструкция и полимер должны взаимодействовать друг с другом таким образом, чтобы в полимере рассеивалось как можно больше энергии. Полимерные материалы, внутреннее трение которых в десятки раз превышает трение обычных электроизоляционных материалов, получили название вибропоглощающих материалов. В последние десятилетия это направление борьбы с вибрацией активно развивается, ежегодно разрабатываются различные вибропоглощающие материалы, отличающиеся внутренней структурой и условиями применения.

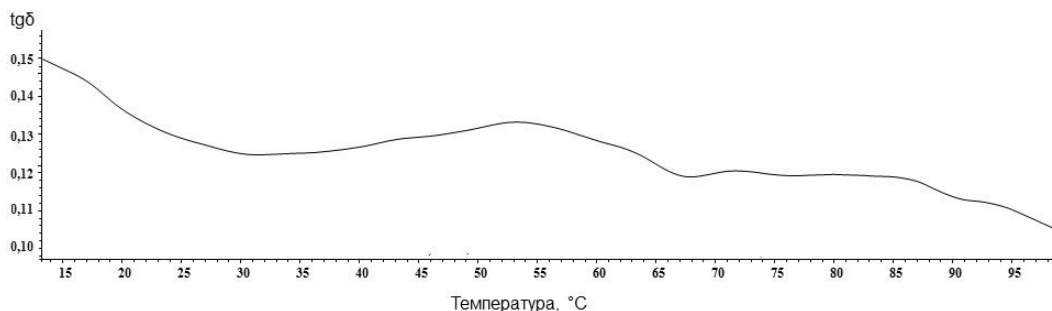
Условия работы турбогенератора накладывают достаточно жесткие требования на используемые в конструкции материалы. При водородном охлаждении: температура меди $+50^{\circ}\text{C}$, температура охлаждающей среды (наружного слоя изоляции) $+70^{\circ}\text{C}$, при воздушном охлаждении: температура меди $+125^{\circ}\text{C}$, температура охлаждающей среды (наружного слоя изоляции) $+80^{\circ}\text{C}$. Требуемая долговечность высоковольтной изоляции электрических машин, подвергающейся электрической, тепловой и механической нагрузкам, обеспечивается монолитностью её структуры. Применяемый материал – стеклослюдяные слои, пропитанные эпоксидным связующим, и технология изготовления – отверждение при высокой температуре и давлении – не допускают введение в структуру изоляции, между её слоями, каких-либо слоев инородных материалов типа пластиков и проводящих (алюминий) компонент. Помимо этого вибропоглощающий материал должен обладать хорошими адгезионными свойствами.

В качестве вибропоглощающего полимерного материала, отвечающего заданным условиям, можно предложить материал ВТП-1В [7].

Этот материал получают методом экструзии расплава композиции на основе термоэластопласта со специальными добавками, повышающими атмосферостойкость и пожаробезопасность. Он рекомендуется для применения в качестве вибродемпфирующего (вибропоглощающего) материала для работы в диапазоне температур от -60°C до $+80^{\circ}\text{C}$. Коэффициент механических потерь вибропоглощающего полимерного материала ВТП-1В (рис. 2) при температуре от $+40^{\circ}\text{C}$ до $+80^{\circ}\text{C}$ и при частоте нагружения 100 Гц находится в пределах от 0,12 до 0,135. Для сравнения коэффициент механических потерь стеклотекстолита, составляет 0,004–0,008.

Рассмотрим модельную задачу по определению амплитудно-частотных характеристик соединительных шин статора турбогенератора с учетом демпфирования.

Шина представляет собой медный проводник, имеющий внутренний канал для охлаждения, покрытый стеклослюдениновой изоляцией на терморезистивном связующем (рис. 3). Медный проводник может быть выполнен любого сечения, поскольку для изготовления проводников применяются полосы электротехнической меди прямоугольного, прямоугольно-пустотелого (полого), круглого или кольцевого сечений. Шина на концах



имеет участки, предназначенные для ее крепления.

Рис.2. Коэффициент механических потерь ВТП-1В

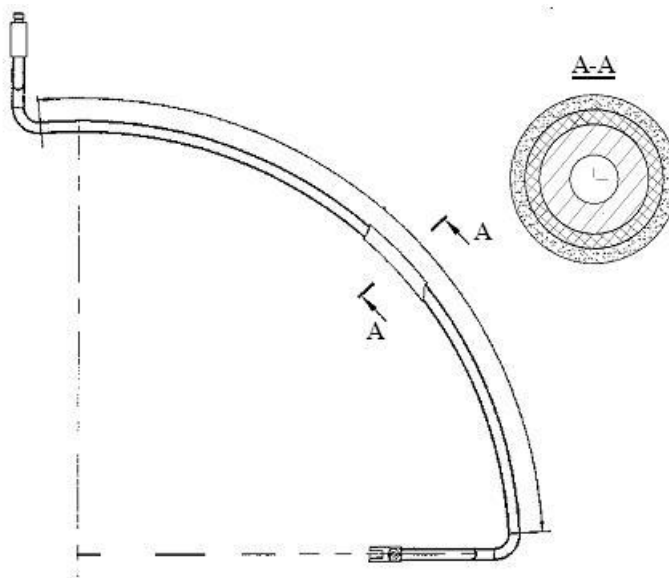


Рис.3. Конструкция соединительной шины

В качестве модели мы выбрали консольный стержень с трехслойным сечением (рис.4). Геометрические размеры шины выбирались таким образом, чтобы частотные характеристики в модельной задаче были близки к частотным характеристикам реальной конструкции.

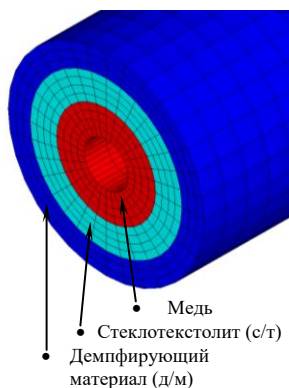


Рис. 4. Конечно-элементная модель

Решалась задача вынужденных гармонических колебаний с частотой 100 Гц.

На рис. 5 показаны расчетные зависимости амплитуды вынужденных колебаний модели шины в зависимости от толщины изоляции и демпфирующего слоя.

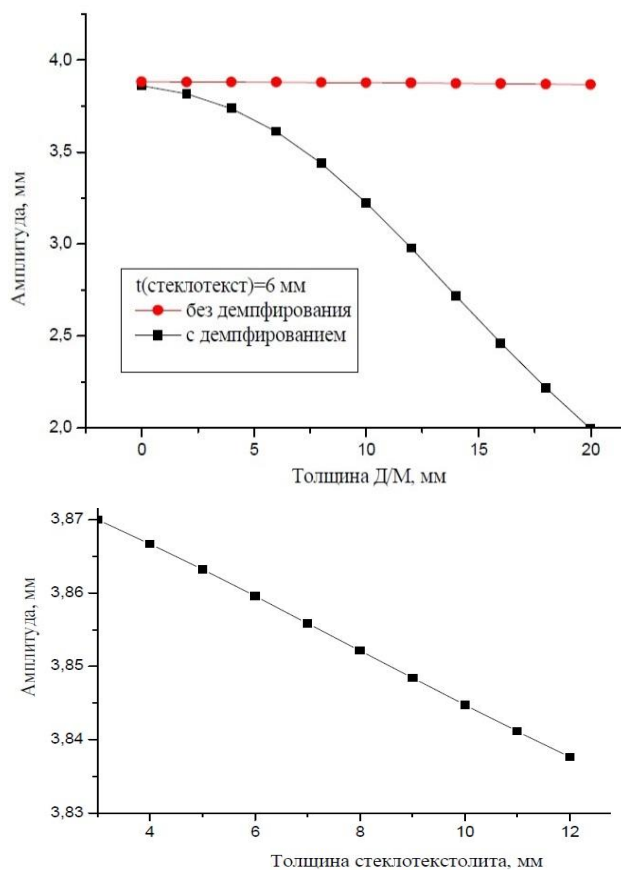


Рис.5. Зависимость амплитуды колебаний модели от толщины слоев

Из рассмотрения графиков видно, что амплитуда колебаний практически не зависит от толщины слоя изоляции, а увеличение демпфирующего слоя, напротив, позволяет уменьшить амплитуду вынужденных колебаний практически вдвое. При этом следует отметить изменение частоты колебаний (рис. 6) до 12 Гц в зависимости от толщины слоя демпфирующего материала. Уменьшение собственных частот шин связано с увеличением массы шины без увеличения жесткости конструкции, поскольку модуль Юнга демпфирующего слоя существенно меньше, чем у материала изоляции шин.

Толщина слоя (количество слоев) вибропоглощающего полимерного материала выбирается из технологических особенностей конструкции и рассчитывается в зависимости от изменения максимальной амплитуды колебания шины. На рис. 7 показана зависимость изменения приведенной максимальной амплитуды колебания шины от толщины вибропоглощающего полимерного материала, полученная на основании серии расчетных исследований для частоты колебаний 100 Гц.

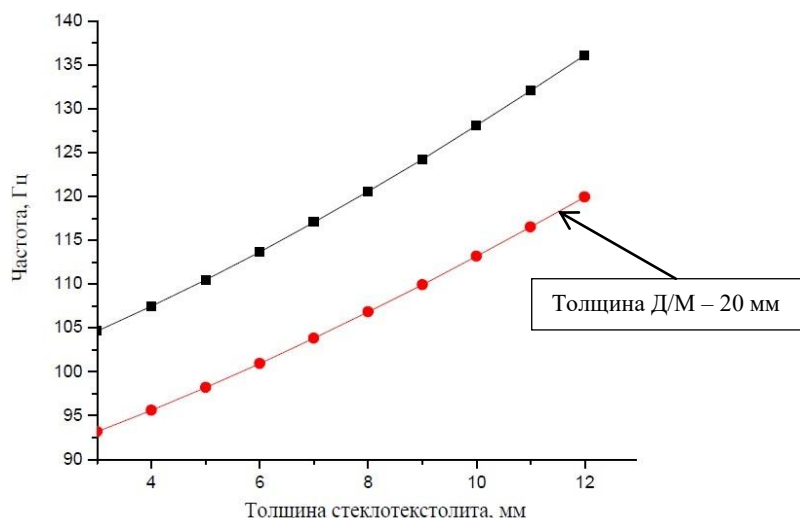


Рис.6. Зависимость собственной частоты от толщины слоев

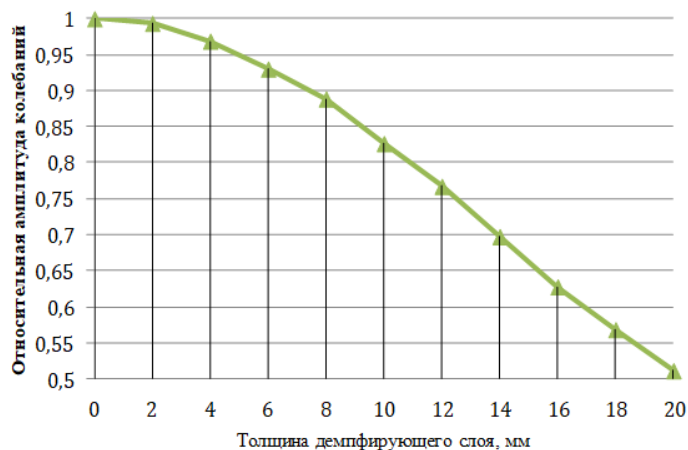


Рис.7. Зависимость относительной амплитуды от толщины демпфирующего слоя

По результатам выполненного исследования оформлен патент [9].

Выводы

1. Проведены расчетные исследования по оценке влияния демпфирующих свойств материалов на амплитудно-частотные характеристики выводных и соединительных шин статоров турбогенераторов.

2. Нанесение на наружную поверхность шины слоя вибропоглощающего полимерного материала, с учетом технологических особенностей конструкции, может существенно (до двух раз) уменьшить амплитуду колебаний и улучшить вибрационную надежность элементов статора турбогенератора.

Литература

1. Хуторецкий Г.М., Фридман В.М., Школьник В.Э. Решение проблемы вибраций статора турбогенератора большой мощности // Электротехника. 1989. №2. С. 26–29.
2. Шумилов Ю.А., Штогрин А.В. Уменьшение повреждаемости статоров мощных турбогенераторов, вызванных в торцевой зоне (анализ, гипотезы, эксперименты) // Электротехника и Электромеханика. 2014. № 1. С. 37–39.
3. Вибрации в технике. Т.6 Защита от вибрации и ударов. / под ред. К.В. Фролова. М.: «Машиностроение», 1981.
4. Петреня Ю.К., Антонюк О.В., Гаврилов С.Н. Оценка частот колебаний шин турбогенераторов // Электрические станции. 2016. №3. С. 47–50.
5. Петреня Ю.К., Антонюк О.В., Гаврилов С.Н. Проблема определения частотных характеристик колебаний статоров мощных турбогенераторов // Известия РАН. Энергетика. 2017. № 4. С. 37–43.
6. Вибрации в технике. Т.1 Колебания линейных систем. / под ред. К.В. Фролова. М.: «Машиностроение», 1981.
7. Сытого В., Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Большаков В.А. Вибропоглощающие материалы на основе термоэластопластов // Труды ВИАМ. 2013. № 3.
8. Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Большаков В.А., Долгополов С.С. Влияние армирующего слоя на коэффициент механических потерь вибропоглощающих материалов // Пластические массы. 2015. № 3-4. С.13–16.
9. Пат. № 168415 РФ, МПК H02K 3/38/. Шина статора электрической машины / Петреня Ю.К., Антонюк О.В., Гаврилов С.Н. № 2016127183; заявл. 05.07.2016; опубл. 02.02.2017. Бюл. № 4.

Авторы публикации

Гаврилов Сергей Николаевич – канд. техн. наук, директор по сервису и стратегическому маркетингу ОАО «НПО ЦКТИ». E-mail: s.n.gavrilov@mail.ru.

Петреня Юрий Кирилович – д-р физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент РАН. Генеральный директор ПАО «Силовые машины».

References

1. Khutoretsky G.M., Fridman V.M., Shkolnik V.E. Solution of the stator vibration problem of a large-capacity turbogenerator. // Electrical Engineering. 1989. No. 2. P. 26–29.
2. Shumilov Yu.A., Shtogrin A.V. Reduction of damages of stators of powerful turbogenerators caused in the end zone (analysis, hypotheses, experiments). // Electrotechnika i Electromechanika. 2014. No. 1. P. 37–39.
3. Vibration in engineering. T.6 Protection against vibration and shock. / Revision of K.V. Frolov. Moscow: "Mechanical Engineering", 1981.

4. Petrenya Yu.K., Antonyuk O.V., Gavrilov S.N. Estimation of turbine generator tire vibration frequencies. // Electric plants. 2016. № 3. P.47–50.

5. Petrenya Yu.K., Antonyuk O.V., Gavrilov S.N. The problem of determining the frequency characteristics of stator oscillations of high-power turbogenerators. // Izvestiya RAN. Power Engineering. 2017. No. 4. P.37–43.

6. Vibration in engineering. T.1 Oscillations of linear systems. / Revision of K.V. Frolov. Moscow: "Mechanical Engineering", 1981.

7. V.Sytogo, V.A. Sagomonov, V.I. Kislyakova, V.A. Bol'shakov. Vibro-absorbing materials based on thermoplastic elastomers // Proceedings of VIAM. 2013. No. 3.

8. V.A. Sagomonova, V.I. Kislyakova, V.A. Bolshakov, S.S. Dolgoplov. Influence of the reinforcing layer on the coefficient of mechanical losses of vibration-absorbing materials // Plastic Masses. 2015. No.3-4. P.13–16.

9. Pat. 168415 RU, IPC H02K 3/38/. Stator of an electric car. / Petrenya Yu.K., Antonyuk O.V., Gavrilov S.N. Published 02.02.2017. Bulletin No. 4.

Authors of the publication

Sergey N. Gavrilov - JSC "NPO CKTI

Iurii K. Petrenya - CEO PJSC "Power Machines".

Поступила в редакцию

10 апреля 2018 г.