

Особенности систем охлаждения и возможности повышения эффективности теплопередачи в обмотках статоров турбогенераторов с косвенным охлаждением

Э. Р. Маннанов[✉], А. В. Коновалов, А. М. Костельов, А. Г. Филин

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

[✉] mannanov@mail.ru

Аннотация. На базе материалов конференций, объектов интеллектуальной собственности, научно-технических источников выполнен анализ технического уровня и особенностей систем охлаждения линейки турбогенераторов средней и большой мощности от основных производителей энергетического оборудования. Освещены главные направления повышения их технического уровня. Обзор выполнен в отношении Российской Федерации, Соединенных Штатов Америки, Японии, Китая и стран Европы. По результатам технического исследования структурированы данные о техническом уровне применяемых систем охлаждения турбогенераторов основных мировых и российских производителей в зависимости от мощности изделий, представлена оценка достигнутого уровня, выполнен анализ основных направлений повышения уровня техники в данной области.

Ключевые слова: система охлаждения, электроизоляционный материал, турбогенератор, Силовые машины

Для цитирования: Особенности систем охлаждения и возможности повышения эффективности теплопередачи в обмотках статоров турбогенераторов с косвенным охлаждением / Э. Р. Маннанов, А. В. Коновалов, А. М. Костельов, А. Г. Филин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 7. С. 5–15. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-7-5-15.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Review article

Features of Cooling Systems and Possibilities of Increased Heat Transfer Efficiency in Stator Windings of Indirect-Cooled Turbogenerators

E. R. Mannanov[✉], A. V. Konovalov, A. M. Kostelov, A. G. Filin

JSC «Power Machines», Saint Petersburg, Russia

[✉] mannanov@mail.ru

Abstract. We analyze the technical level and specific features of cooling systems of medium- and high- capacity turbogenerators produced by the main manufacturers of power equipment. The analysis is carried out based on conference materials, intellectual property items, as well as scientific and technical literature. The main directions for improving the technical level of the studied systems are outlined. The review covered the Russian Federation, the USA, Japan, China, and European countries. According to the results obtained, the data on the technical level of the cooling systems of turbogenerators applied in Russia and other countries is generalized with respect to their capacity. The current technological level is assessed, and the main directions for its improvement are outlined.

Keywords: cooling system, electrical insulating material, turbogenerator, Power Machines

For citation: Features of Cooling Systems and Possibilities of Increased Heat Transfer Efficiency in Stator Windings of Indirect-Cooled Turbogenerators / E. R. Mannanov, A. V. Konovalov, A. M. Kostelov, A. G. Filin // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 7. P. 5–15. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-7-5-15.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Турбогенераторы с косвенным охлаждением (воздушным и водородным) наиболее востребованы на рынке за счет использования на многочисленных тепловых станциях. Разработка новых турбогенераторов неизменно требует совершенствования и повышения эффективности систем охлаждения. Развитие высокоэффективных электростанций с газотурбинными установками и с установками комбинированного цикла при меньших капиталовложениях и сокращенных сроках ввода в эксплуатацию потребовало создания высокоманевренных, простых в обслуживании турбогенераторов, к которым можно отнести турбогенераторы с воздушным охлаждением. Для комплектации парогазовых установок, имеющих наибольшие перспективы поставок в ближайшие годы на российском рынке, потребуются турбогенераторы повышенной единичной мощности – до 400 МВт. Аналогичная ситуация складывается и по турбогенераторам с водородным охлаждением, учитывая тенденции рынка по сокращению капиталовложений и ввода в эксплуатацию, что подразумевает упрощение систем охлаждения переводом изделий с более сложными схемами охлаждения на более простые. Ключ к успеху в данном случае лежит в совершенствовании системы охлаждения и повышении степени использования конструкционных материалов [1]. Турбогенераторы больших мощностей также остаются незаменимыми как часть блоков АЭС, однако увеличение их мощности в настоящее время мало актуально в силу отсутствия отечественного реактора высокой мощности.

Для освещения уровня техники и обобщения технических решений представляется чрезвычайно важным оценить уровень техники и тенденции развития систем охлаждения турбогенераторов на основе информации, представленной в базе Всероссийского института научной и технической информации Российской академии наук (ВИНИТИ), открытых научно-технических источниках, в профильных журналах по данной тематике, на сайтах официальных производителей, а также в патентных базах, в частности ФИПС.

1. Анализ технического уровня турбогенераторов основных производителей энергетического оборудования. В настоящее время основными его производителями на мировом рынке являются

фирмы: «General Electric (GE)/Alstom», «Siemens AG», «Ansaldo», «Mitsubishi Hitachi Power Systems» (MHPS), «Toshiba», «Andritz AG»; китайские производители также достигли высоких показателей единичной мощности: «Beijing BEIZHONG Steam Turbine Generator Co», «Shanghai Electric Group Company», «Dongfang Electric Corporation»; отечественные предприятия-производители турбогенераторов: АО «Силовые машины», НПО «ЭЛСИБ».

Выполненный технический анализ показывает, что номенклатура и технические характеристики выпускаемых турбогенераторов варьируются в зависимости от фирмы-производителя. На рис. 1 приведены сравнительные данные полной мощности (S , МВА) по производимым турбогенераторам с воздушным охлаждением ведущих фирм мира и российских производителей; на рис. 2 – сравнительные данные S по производимым турбогенераторам с водородным охлаждением от ведущих фирм мира и российских производителей [2]–[15].

Простая система вспомогательных агрегатов с воздушным охлаждением обеспечивает простоту в эксплуатации и значительно меньшую потребность в обслуживании по сравнению с другими системами охлаждения из-за того, что не нужны система уплотнения масла и системы охлаждения. Турбогенераторы с воздушным охлаждением устанавливаются быстро, легко интегрируются и обеспечивают требуемую мощность с большим временем безотказной работы. Эти генераторы служат хорошим выбором для применения в электростанциях, которые требуют простой и гибкой работы.

Лидерами по достигнутой максимальной единичной мощности для таких турбогенераторов являются фирмы «General Electric/Alstom», «Siemens AG», «Ansaldo».

Значительное преимущество генераторов с водородным охлаждением состоит в высокой эффективности. Водород имеет превосходные характеристики для охлаждения генератора, поскольку представляет собой среду с низкой плотностью и тем самым уменьшает потери, в то же время повышая теплопередачу, что обеспечивает эффективность охлаждения. Лидеры по достигнутой максимальной единичной мощности для таких турбогенераторов – это фирмы «Mitsubishi Hitachi Power Systems», «Toshiba».

В разработке турбогенераторов как с водородным, так и с воздушным охлаждением с высокой единичной мощностью имеется существенное отставание российских производителей от мировых.

2. Современные тенденции в совершенствовании систем охлаждения турбогенераторов. Следует отметить, что эффективность си-

стемы охлаждения определяет возможности роста единичной мощности турбогенераторов, в то же время электрическая изоляция обеспечивает необходимую электрическую прочность, но действует как тепловой барьер, ограничивающий эффективность системы охлаждения. Поэтому вопросы совершенствования параметров системы изоляции имеют важнейшее значение [1].

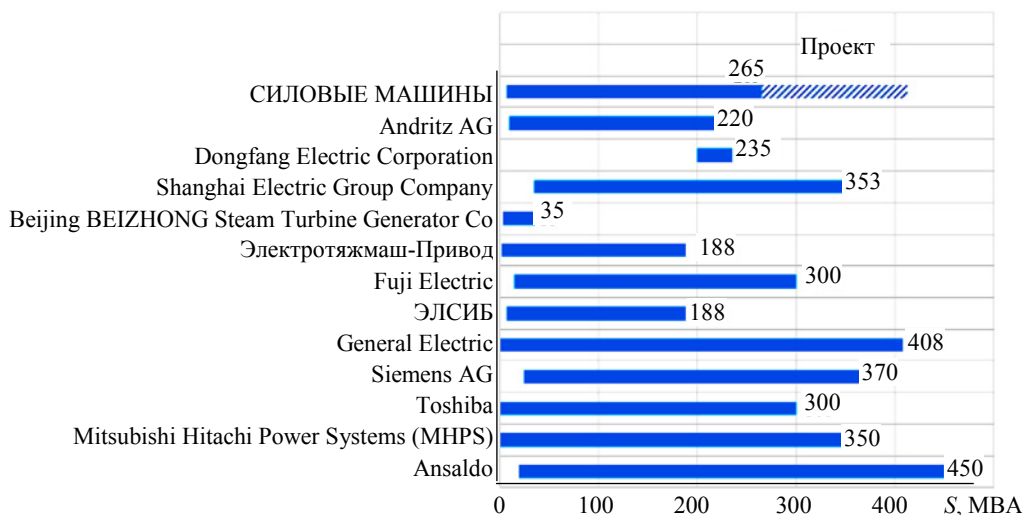
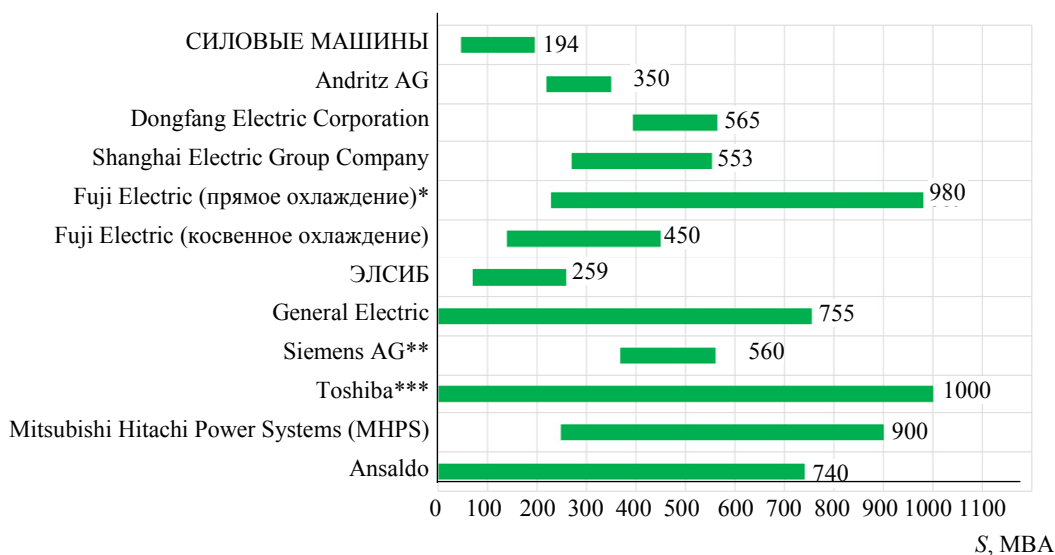


Рис. 1. Сравнительные данные по производимым турбогенераторам с воздушным охлаждением ведущих фирм мира и российских производителей

Fig. 1. Comparative data on air-cooled turbogenerators produced by the world's leading companies and Russian manufacturers



* «Fuji Electric» для турбогенераторов высокой мощности использует систему с непосредственным охлаждением обмотки статора и ротора.

** «Siemens AG» с 2018 г. генераторы с косвенным водородным охлаждением в линейке заменены на генераторы с водяным охлаждением обмотки статора, заполненные воздухом или водородом. Преимуществом данного решения заявлено снижение термомеханических деформаций в обмотке статора.

*** «Toshiba» разработала систему изоляции для статора с косвенным водородным охлаждением стержней статора. Система изоляции обладает высокой теплопроводностью и превосходной технологией, что позволяет изготавливать статоры генераторов более компактными, чем те, в которых используется водяное охлаждение.

Рис. 2. Сравнительные данные по производимым турбогенераторам с водородным охлаждением ведущих фирм мира и российских производителей

Fig. 2. Comparative data on hydrogen-cooled turbogenerators produced by the world's leading companies and Russian manufacturers

Производители энергетического оборудования активно ведут работы в направлении совершенствования систем изоляции статорных обмоток турбогенераторов в направлении повышения теплопроводности электроизоляционных материалов [16]–[36], что обеспечивает улучшение теплопередачи в обмотке и снижает тепловое сопротивление [37].

Применение изоляции с повышенной теплопроводностью позволяет при сохранении температурного состояния обмотки статора турбогенератора повысить его единичную мощность. На основе данных «Mitsubishi Electrical Corporation» [38] подготовлена диаграмма возможности повышения мощности турбогенераторов за счет применения изоляции с повышенной теплопроводностью, которая представлена на рис. 3.

Эффект также возникает за счет снижения стоимости и эксплуатационных затрат. Преимущество систем с воздушным охлаждением по

сравнению с водородным представлены в табл. 1 на основе данных «GE/Alstom» [39].

Характерные примеры работ в этом направлении при внедрении высокотеплопроводных материалов представлены в научно-технической литературе и докладах СИГРЭ. Компания «Toshiba» представляет разработанную конструкцию мощных турбогенераторов [40] с косвенным водородным охлаждением мощностью 600 МВА. Большая мощность достигнута как благодаря использованию изоляции обмотки статора с высокой теплопроводностью, так и путем оптимизации распределения потоков водорода и применения других новых технических решений. В табл. 2 показаны новые конструкторские решения.

В [41] представлены результаты внедрения изоляции с повышенной теплопроводностью (high thermal conductivity (HTC)) для улучшения эффективности охлаждения при создании турбогенератора с водородным охлаждением мощностью 820 МВА.

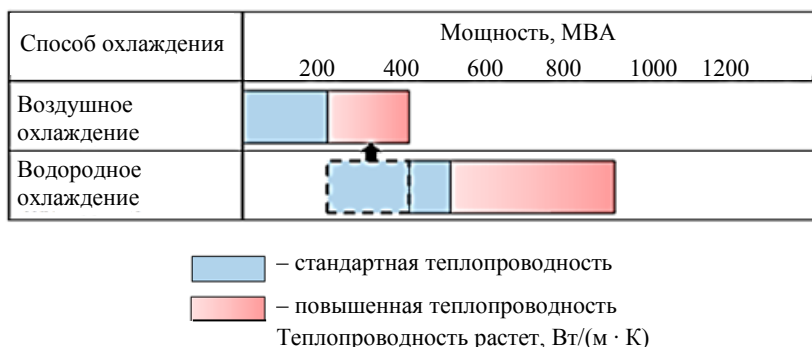


Рис. 3. Возможности повышения мощности турбогенераторов за счет применения изоляции с повышенной теплопроводностью
 Fig. 3. Possibilities for increasing turbogenerator capacity through the use of insulation with increased thermal conductivity

Табл. 1. Преимущества систем с воздушным по сравнению с водородным охлаждением
 Tab. 1. Advantages of air-cooled systems compared to hydrogen-cooled systems

Начальные расходы	Расходы в эксплуатации
Не требует вспомогательных систем, меньше трубопроводов	Не нужны баллоны с CO ₂ для вытеснения водорода и питающая их система
Меньше занимаемая площадь и меньше размеры фундамента	Меньше требуется запасных частей – меньше соединений с другими системами
Проще уход и контроль	Проще конструирование
Выше надежность, выше доходность	Проще и быстрее монтаж и приемка
Прибыль 1 млн дол./генератор	Прибыль 0.5...2.5 млн дол./генератор

Табл. 2. Новые конструкторские решения
 Tab. 2. New design solutions

Последствия повышения мощности	Конструктивное решение
Высокая плотность тока в обмотке ротора	Применение непосредственного радиального охлаждения
Повышение потерь в обмотке статора	Оптимальное распределение потоков газа, повышенное давление водорода, удвоенная теплопроводность изоляции
Большие электромагнитные усилия, центробежные силы, термомеханика	Усовершенствованная конструкция крепления лобовых частей обмотки статора
Увеличение диаметра сердечника статора	Компактная конструкция корпуса генератора, съемные охладители на корпусе

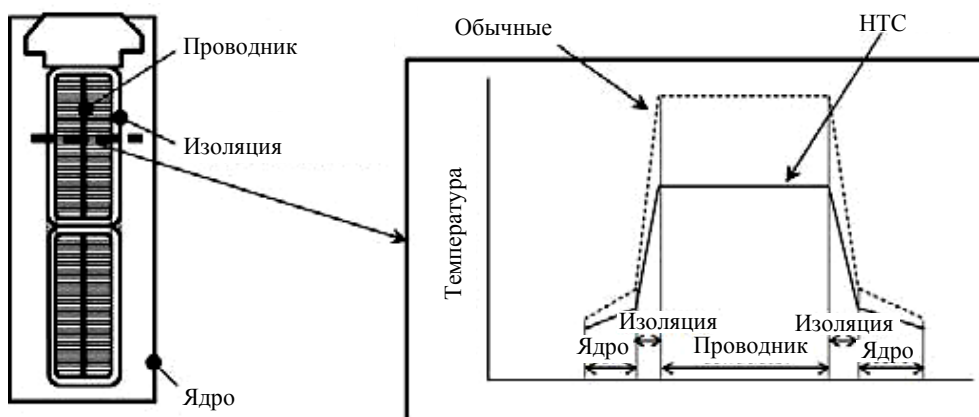


Рис. 4. Распределение температур в обмотке статора
Fig. 4. Temperature distribution in the stator winding

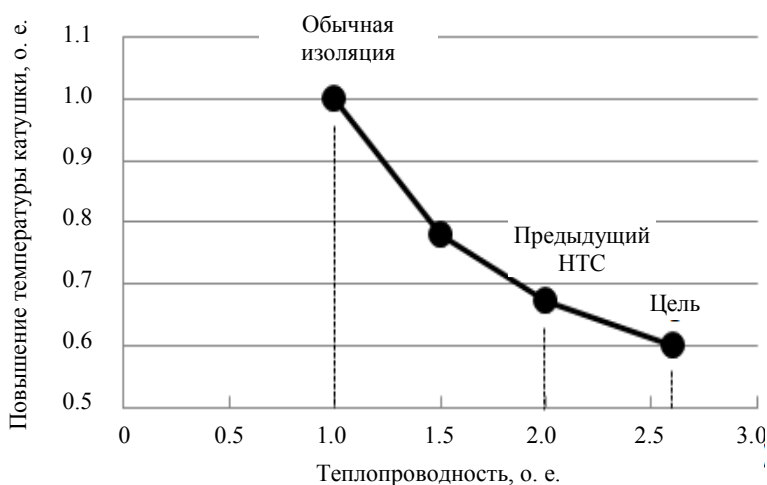


Рис. 5. Изменение температуры в проводнике за счет уменьшения теплового сопротивления изоляции
Fig. 5. Temperature change in the conductor due to a decrease in the thermal resistance of the insulation

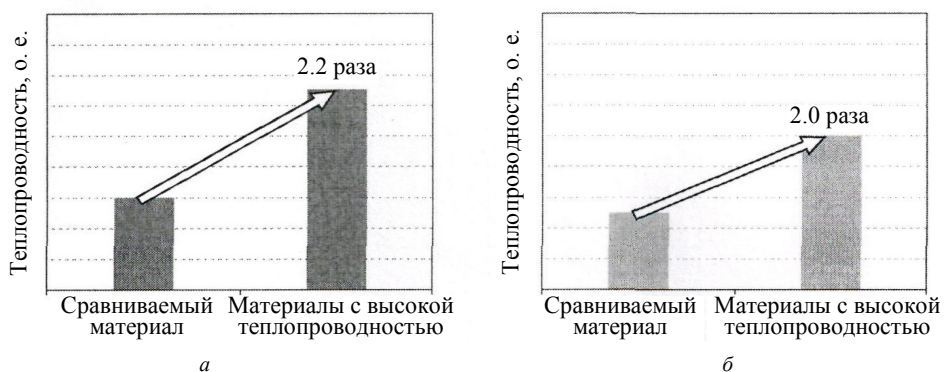


Рис. 6. Сравнительные данные по теплопроводности изоляции, изготовленной:
а – из высокотеплопроводных предварительно пропитанных лент; б – из сухих высокотеплопроводных лент
Fig. 6. Comparative data on the thermal conductivity of the insulation made of:
а – high-thermal conductivity pre-impregnated tapes; б – dry high thermal conductivity tapes

На рис. 4 показано распределение температур в обмотке статора в случае применения изоляции НТС (high thermal conductivity), которая существенно снижает температурный градиент в изоляции и температуру в проводнике.

На рис. 5 показано изменение температуры в проводнике за счет уменьшения теплового сопротивления изоляции при использовании высокотеплопроводных материалов НТС.

Следует отметить, что КПД генератора увеличен на 0.10–0.15 % по сравнению с непосредственным водяным охлаждением генератора той же мощности.

Фирмой «Hitachi» (Япония) разработаны два типа высокотеплопроводных лент [42]. Ленты, предварительно пропитанные с теплопроводностью, в 2.2 раза превышающие обычную, и «сухие» – в 2 раза превышающие обычную (рис. 6) [17].

В [43] приведены сведения о новой высокотеплопроводной изоляции (для RR-технологии), разработанной фирмой «Мицубиси» (Япония) для турбогенератора с водородным охлаждением мощностью 870 МВА. Увеличение теплопроводности по сравнению с традиционной изоляцией продемонстрировано на рис. 7.

По данным ALSTOM/GE [44] при разработке турбогенераторов предельной мощности (480 МВА) с воздушным охлаждением применение электрической изоляции с повышенной теплопроводностью класса нагревостойкости F позволило повысить мощность машины на 20 % без увеличения ее размеров.

Опираясь на анализ данных основных мировых производителей турбогенераторов, можно обобщить данные о достигнутых значениях предельных единичных мощностей турбогенераторов с косвенным охлаждением обмотки статора для мировых и отечественных производителей оборудования. Данные приведены в табл. 3.

Обсуждение результатов. Выводы и заключение. На основе данных ведущих мировых производителей турбогенераторов, научно-технических источников, а также материалов выставок и конференций выполнен анализ уровня техники систем охлаждения турбогенераторов средней и большой мощности с косвенным газовым охла-

ждением обмотки статора в зависимости от номинальной мощности, а также анализ основных тенденций в направлении совершенствования эффективности их охлаждения.

Опираясь на проведенный анализ, можно сделать выводы о том, что достигнутые единичные мощности турбогенераторов с косвенным охлаждением в зависимости от применяемой системы охлаждения составляют:

– при воздушном охлаждении – 450 МВА (фирма «Ansaldo»), 480 МВА «GE/Alstom», (не серийная продукция);

– при водородном охлаждении – 1000 МВА («Toshiba»), 870 МВА («Mitsubishi Hitachi Power Systems»).

Следует отметить высокую напряженность работы узлов турбогенераторов с воздушным охлаждением при увеличении единичной мощности свыше 400 МВА вследствие приближения к пределам использования в них активных материалов (тепловое состояние, допустимые механические нагрузки).

Табл. 3. Достигнутая предельная единичная мощность турбогенераторов с косвенным охлаждением

Tab. 3. Achieved maximum unit power of turbogenerators with indirect cooling

Тип охлаждения	Фирма-производитель	Предельная единичная мощность, МВА
Воздушное	GE/ALSTOM	480*
	ANSALDO	450
	АО «Силовые машины»	265/412**
Водородное	МНПС	870
	«Toshiba»	1000
	НПО «ЭЛСИБ»	259

* Несерийный турбогенератор

** Проект

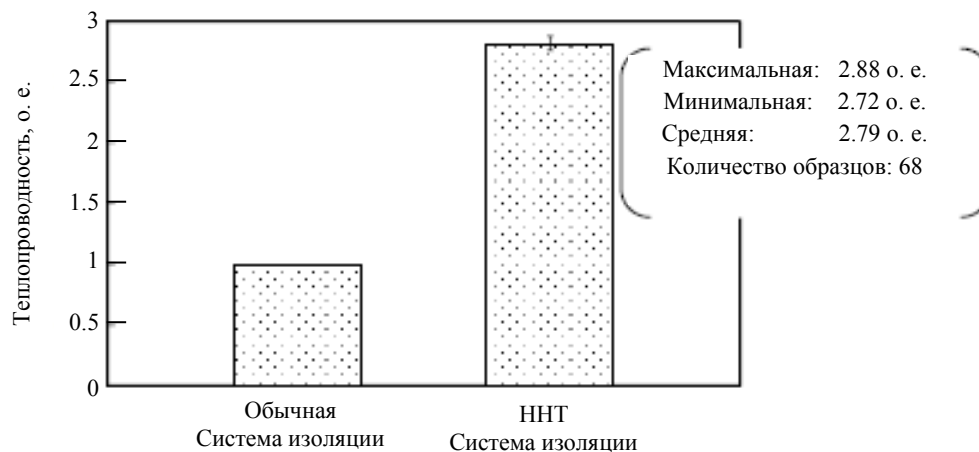


Рис. 7. Сравнительные данные по теплопроводности изоляции
Fig. 7. Comparative data on thermal conductivity of insulation

Достигнутые значения предельной единичной мощности турбогенераторов с косвенным охлаждением российских фирм составляют:

- при воздушном охлаждении – 265/412 (Проект) МВА АО «Силовые машины»;
- при водородном охлаждении – 259 МВА НПО «ЭЛСИБ».

Таким образом, имеется существенное отставание в развитии линейки турбогенераторов с косвенным охлаждением российских производителей от уровня мировых разработок. Возможность повышения единичной мощности турбогенераторов с косвенным охлаждением обмотки статора может рассматриваться как перспективное направление развития.

Работы по проектированию турбогенераторов в этом направлении показывают, что достичь указанных целей можно путем перехода от непосредственного к косвенному охлаждению обмот-

ки статора турбогенератора на основе внедрения инновационных материалов с новыми свойствами и интенсификации системы охлаждения.

Прогресс в энергетическом электромашиностроении осуществляется за счет применения высокоэффективных систем вентиляции генераторов с косвенным охлаждением обмоток и разработки усовершенствованных конструкций электрической изоляции. Последняя обеспечивает необходимую электрическую прочность, но действует как тепловой барьер, ограничивающий эффективность применения системы охлаждения. Практические работы по внедрению электроизоляционных материалов с высокой теплопроводностью (два и более раз относительно стандартных значений) показали высокую эффективность при создании турбогенераторов высокой единичной мощности с косвенным охлаждением обмотки статора по сравнению с ранее применяемыми турбогенераторами.

Список литературы

1. Маннанов Э. Р. Управление характеристиками теплопроводности при разработке систем изоляции мощных турбогенераторов: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербургский политехн. ун-т Петра Великого, Санкт-Петербург, 2023. 160 с.
2. Ansaldoenergia. URL: <https://www.ansaldoenergia.com/offering/equipment/generators/turbogenerators> (дата обращения: 04.03.2024).
3. Mitsubishi Power. URL: <https://power.mhi.com/products/generators/performance> (дата обращения: 04.03.2024).
4. Toshiba. URL: <https://www.toshiba.com/taes/> (дата обращения: 04.03.2024).
5. Siemens-energy. URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product-offerings/generators.html> (дата обращения: 04.03.2024).
6. GE Vernova. URL: <https://www.governova.com/gas-power/products/generators> (дата обращения: 04.03.2024).
7. НПО ЭЛСИБ. URL: <https://elsib.ru/ru/klientam/turbogenerator/> (дата обращения: 04.03.2024).
8. Fuji Electric. URL: https://www.fujielectric.com/products/energy/thermal_power_generation/product_series/thermal_power_generation_lineup.html (дата обращения: 04.03.2024).
9. ООО «Электротяжмаш-Привод». URL: <https://privod-lysva.ru> (дата обращения: 04.03.2024).
10. Beijing BEIZHONG Steam Turbine Generator. URL: <https://www.bzd.com.cn/klqldjs.aspx> (дата обращения: 04.03.2024).
11. Shanghai Electric Group Company. URL: https://www.shanghai-electric.com/group_en/dqdzsbfjcgjs/ (дата обращения: 04.03.2024).
12. Shanghai Electric Group Company. URL: <http://shanghaielectric-smec.com/1-2-2-hydrogen-cooled-turbine-generator/> (дата обращения: 04.03.2024).
13. Dongfang Electric Corporation. URL: https://www.dongfang.com.cn/Expertise/By_Products/Clean_Efficient_Energy/Thermal_Power/Thermal_Power_Products/Generator.htm (дата обращения: 04.03.2024).
14. Andritz AG. URL: <https://www.andritz.com/products-en/forever/markets/turbogenerator-thermal-power> (дата обращения: 04.03.2024).
15. АО «Силовые машины». URL: <https://power-m.ru/customers/> (дата обращения: 04.03.2024).
16. CIGRE. URL: https://www.cigre.org/userfiles/files/News/2023/TOR-WG%20A1_75_Large%20air-cooled%20turbo-generator%20%E2%80%93%20state%20of%20the%20art%2C%20limits%20and%20perspectives%20for%20small%20modular%20reactors.pdf (дата обращения: 06.05.2024).
17. Маннанов Э. Р. О диэлектрических материалах с высокой теплопроводностью для систем электрической изоляции высоковольтных электрических машин: обзор отечественной и зарубежной литературы // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 4. С. 42–67. doi: 10.18721/JEST.27404.
18. Влияние свойств компонентов на эффективную теплопроводность полимерных композитных материалов / В. В. Степанов, Ю. К. Петреня, А. М. Андреев, А. М. Костельов, Э. Р. Маннанов, В. А. Талалов // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11, № 4. С. 85–94. doi: 10.18721/JPM.11408
19. Investigation of Mechanical Characteristics of Pressuring Materials of Generators Stator Winding in Thermal / N. A. Fedotov, T. M. Shikova, V. O. Belko, A. M. Kostelov, E. R. Mannanov and D. A. Chernyshov // «Aging Process». Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP). Russian Federation, Saint Petersburg: IEEE, 2023. P. 27–30. doi: 10.1109/MDP60436.2023.10424112.

20. Shikova T. Adhesive strength in a high voltage mica insulation system // in E3S Web of Conf. 2019. Vol. 140. P. 11006. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/66/e3sconf_eece18_11006/e3sconf_eece18_11006.html (дата обращения: 06.05.2024).
21. Bezborodov A., Shikova T. Technological factors of insulation systems for large rotating machines: Influence on thermal and electrical properties // Intern. Conf. on Diagnostics in Electr. Engin. (Diagnostics). IEEE, 2020. P. 1–4, doi: 10.1109/Diagnostics49114.2020.9214657.
22. Cimino A., Jenau F., Staubach C. Finite-element-model of mechanical stress acting on the electrical insulation system used in rotating machines // 54th Intern. Universities Power Engin. Conf. (UPEC). IEEE, 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/UPEC.2019.8893473.
23. Karakchiev P. V., Shikova T. M., Ivanov I. O. Technological stresses in the system of high-voltage mica insulation // Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (EIConRus). IEEE, 2020. P. 1031–1035, doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039025.
24. Mechanical characteristics investigation of mica-containing insulation of high voltage rotating machines / I. O. Ivanov, A. S. Reznik, E. G. Feklistov, T. M. Shikova, N. A. Fedotov, Yu. K. Petrenya // Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (EIConRus). IEEE, 2022. P. 1017–1021. doi: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755593.
25. Mannanov E. R., Filin A. G., Belko V.O. Technique for calculating the thermal conductivity coefficient of the insulation system // Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. Conf. (EIConRusNW). IEEE, 2021. P. 1193–1196. doi: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396705.
26. Electromagnetic forces on coils and bars inside the slot of hydro-generator / B. Sanosian, P. Wendling, T. Pham, W. Akaiishi // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2019. P. 1754–1760. doi: 10.1109/ECCE.2019.8913254.
27. The effect of discharge activity on the performance of corona-protective semiconducting coatings of the stator bar insulation / A. S. Reznik, I. O. Ivanov, T. M. Shikova, A. M. Andreev, E. R. Mannanov // Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. Conf. (EIConRusNW). IEEE, 2021. P. 1228–1231.
28. Fault localization and analysis for a damaged hydrogenerator and a proposal to improve the standard for generator commissioning tests / A. Akbari, M. Rahimi, P. Werle, H. Borsi // IEEE Electr. Insulation Magazine 2021. Vol. 36, no. 3. P. 19–26.
29. Hirakawa T., Kumada A., Hidaka K. Surface potential measurement of model stator bar with stress grading system by field sensor // IEEE Transactions on Dielectrics and Electr. Insulation 2019. Vol. 26, no. 4. P. 1146–1157.
30. Iwabuchi H., Oyama T. Breakdown phenomena across micrometer scale surface gap under negative voltage application // IEEE Transactions on Dielectrics and Electr. Insulation 2019. Vol. 26, no. 5. P.1377–1387.
31. Моделирование электроразрядных процессов для оптимизации коронозащитной системы изоляции высоковольтных машин / А. М. Андреев, И. А. Андреев, В. О. Белько, А. С. Резник, А. Н. Смирнов, А. А. Степанов // Проблемы региональной энергетики. 2020. № 2 (46). С. 33–42.
32. Study of characteristics of vibration sparking in hv rotating machine insulation / V. Belko, A. Plotnikov, Y. Petrenya, T. Shikova // 16th Conf. on Electr. Machines, Drives and Power Systems (ELMA). Varna, Bulgaria, 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/ELMA.2019.8771490.
33. Numerical simulation of discharge activity in hv rotating machine insulation / V. O. Belko, Y. K. Petrenya, A. M. Andreev, A. M. Kosteliov, M. B. Roitgarz // IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (EIConRus). Saint Petersburg and Moscow, Russia: IEEE, 2019. P. 800–802. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657272.
34. Montanari G. C. Seri PA partial discharge-based health index for rotating machine condition // IEEE Electr. Insulation Magazine. 2018, no. 2 (34). P. 17–23.
35. Modelling of electrical discharge processes for optimization of corona-protection system of high voltage rotating machines insulation / A. M. Andreev, I. A. Andreev, V. O. Belko, A. S. Reznik, A. N. Smirnov, A. A. Stepanov // Problemele Energeticii Regionale. 2020. No. 2 (46). P. 33–42.
36. Causes of resistance decrease of Corona protection materials in thermal aging process / N. A. Fedotov, T. M. Shikova, V. O. Belko, A. S. Reznik, A. M. Kostelov, E. R. Mannanov // Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP). Saint Petersburg, Russian Federation: IEEE, 2023. P. 31–34. doi: 10.1109/MDP60436.2023.10424102.
37. Маннанов Э. Р., Филин А. Г. Тепловое состояние электрической изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением // Глобальная энергия. 2021. Т. 27, № 2. С. 38–49. doi: 10.18721/JEST.27203.
38. Sako H., Koga K., Maeda H. Development of larger output indirectly hydrogen-cooled turbine generator with high transfer main insulation (Mitsubishi Electric Corporation) CIGRE, 2016. A1–116.
39. Type-tested air-cooled turbo-generator in the 500 MVA range / R. Joho, T. Hinkel, J. Baumgarten, C. E. Stephan, M. Jung // CIGRE, 2000. 11–101.
40. The world's largest capacity turbine generators with indirect hydrogen-cooling / T. Kitajima, H. Ito, S. Nagano, Y. Kazao. CIGRE, 2004. A1–106.
41. Current progress in high thermal conducting insulation technology for large capacity turbine generator / T. Harakawa, F. Sawa, T. Okamoto, H. Hatano, K. Nagakura // 17th Intern. Conf. on Electr. Machines and Systems. IEEE, 2014. P. 38–42. doi: 10.1109/icems.2014.7013893.
42. Resonac. URL: https://www.resonac.com/sites/default/files/2022-12/en_pdf-rd-report-058-58_tr04.pdf (дата обращения: 06.05.2024).
43. E-Cigre. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/session2016-2016-cigre-session.html> (дата обращения: 06.05.2024).
44. Алексеев Б. А. Турбогенераторы большой мощности в докладах СИГРЭ 2000–2004 гг. // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2006. № 2. С. 42–48.

Информация об авторах

Маннанов Эмиль Рамилович – инженер-конструктор 1-й категории, АО «Силовые машины», ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009, Россия.

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9988-793X>

Коновалов Александр Владимирович – инженер-конструктор 2-й категории, АО «Силовые машины», ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009, Россия.

E-mail: Konovalov_AV1@power-m.ru

Костельов Андрей Михайлович – главный специалист по обмоткам турбогенераторов, АО «Силовые машины», ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009, Россия.

E-mail: Kostelov_AM@power-m.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3242-310X>

Филин Алексей Григорьевич – канд. техн. наук, главный специалист по тепловым и вентиляционным расчетам, АО «Силовые машины», ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009, Россия.

E-mail: Filin_AG@power-m.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9516-9970>

Вклад авторов:

Маннанов Э. Р. – разработка концепции. Формирование идеи; формулировка или развитие ключевых целей и задач.

Коновалов А. В. – разработка концепции. Сбор данных/доказательств, анализ и интерпретация полученных данных.

Костельов А. М. – разработка концепции. Составление черновика рукописи или его критический пересмотр с внесением ценного замечания интеллектуального содержания; участие в научном дизайне; подготовка, создание и/или презентация опубликованной работы.

Филин А. Г. – разработка концепции. Принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

References

1. Mannanov Je. R. Upravlenie karakteristikami teploprovodnosti pri razrabotke sistem izoljicii moshhnyh turbogeneratorov: dis. ... kand. tehn. nauk: 2.4.1. Sankt-Peterburgskij politehn. un-t Petra Velikogo, Sankt-Peterburg, 2023. 160 s.
2. Ansaldoenergia. URL: <https://www.ansaldoenergia.com/offering/equipment/generators/turbogenerators> (data obrashhenija: 04.03.2024). (In Russ.).
3. Mitsubishi Power. URL: <https://power.mhi.com/products/generators/performance> (data obrashhenija: 04.03.2024).
4. Toshiba. URL: <https://www.toshiba.com/taes/> (data obrashhenija: 04.03.2024).
5. Siemens-energy. URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product-offerings/generators.html> (data obrashhenija: 04.03.2024).
6. GE Vernova. URL: <https://www.gevernova.com/gas-power/products/generators> (data obrashhenija: 04.03.2024).
7. NPO JeLSIB. URL: <https://elsib.ru/ru/klientam/turbogenerator/> (data obrashhenija: 04.03.2024).
8. Fuji Electric. URL: https://www.fujielectric.com/products/energy/thermal_power_generation/product_series/thermal_power_generation_lineup.html (data obrashhenija: 04.03.2024).
9. ООО «Jelektrotjazhmash-Privod». URL: <https://privod-lysva.ru> (data obrashhenija: 04.03.2024). (In Russ.).
10. Beijing BEIZHONG Steam Turbine Generator. URL: <https://www.bzd.com.cn/klqldjs.aspx> (data obrashhenija: 04.03.2024).
11. Shanghai Electric Group Company. URL: https://www.shanghai-electric.com/group_en/dqdzsbfjcgjsj/ (data obrashhenija: 04.03.2024).
12. Shanghai Electric Group Company. URL: <http://shanghaielectric-smec.com/1-2-2-hydrogen-cooled-turbine-generator/> (data obrashhenija: 04.03.2024).
13. Dongfang Electric Corporation. URL: https://www.dongfang.com.cn/Expertise/By_Products/Clean_Efficient_Energy/Thermal_Power/Thermal_Power_Products/Generator.htm (data obrashhenija: 04.03.2024).
14. Andritz AG. URL: <https://www.andritz.com/products-en/forever/markets/turbogenerator-thermal-power> (data obrashhenija: 04.03.2024).
15. АО «Silovye mashiny». URL: <https://power-m.ru/customers/> (data obrashhenija: 04.03.2024). (In Russ.).

16. CIGRE. URL: https://www.cigre.org/userfiles/files/News/2023/TOR-WG%20A1_75_Large%20air-cooled%20turbo-generator%20%E2%80%93state%20of%20the%20art%20limits%20and%20perspectives%20for%20small%20modular%20reactors.pdf (data obrashhenija: 06.05.2024).
17. Mannanov Je. R. O dijelektricheskikh materialah s vysokoj teploprovodnost'ju dlja sistem jelektricheskij izoljicii vysokovol'tnyh jelektricheskij mashin: obzor otechestvennoj i zarubezhnoj literatury // *Materialovedenie. Jenergetika*. 2021. T. 27, № 4. S. 42–67. doi: 10.18721/JEST.27404. (In Russ.).
18. Vlijanie svojstv komponentov na jeffektivniju teploprovodnost' polimernyh kompozitnyh materialov / V. V. Stepanov, Ju. K. Petrenja, A. M. Andreev, A. M. Kostel'ov, Je. R. Mannanov, V. A. Talalov // *Nauch.-tehn. vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki*. 2018. T. 11, № 4. S. 85–94. doi: 10.18721/JPM.11408. (In Russ.).
19. Investigation of mechanical characteristics of pressuring materials of generators stator winding in thermal / N. A. Fedotov, T. M. Shikova, V. O. Belko, A. M. Kostelov, E. R. Mannanov and D. A. Chernyshov // «Aging Process». Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP). Russian Federation, Saint Petersburg: IEEE, 2023. P. 27–30. doi: 10.1109/MDP60436.2023.10424112.
20. Shikova T. Adhesive strength in a high voltage mica insulation system // *E3S Web of Conf.* 2019. Vol. 140. P. 11006. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/66/e3sconf_eece18_11006/e3sconf_eece18_11006.html (data obrashhenija: 06.05.2024).
21. Bezborodov A., Shikova T. Technological factors of insulation systems for large rotating machines: Influence on thermal and electrical properties // *Intern. Conf. on Diagnostics in Electr. Engin. (Diagnostics)*. IEEE, 2020. P. 1–4, doi: 10.1109/Diagnostics49114.2020.9214657.
22. Cimino A., Jenau F., Staubach C. Finite-element-model of mechanical stress acting on the electrical insulation system used in rotating machines // *54th Intern. Universities Power Engin. Conf. (UPEC)*. IEEE, 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/UPEC.2019.8893473.
23. Karakchiev P. V., Shikova T. M., Ivanov I. O. Technological stresses in the system of high-voltage mica insulation // *Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (EIConRus)*. IEEE, 2020. P. 1031–1035, doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039025.
24. Mechanical characteristics investigation of mica-containing insulation of high voltage rotating machines / I. O. Ivanov, A. S. Reznik, E. G. Feklistov, T. M. Shikova, N. A. Fedotov, Yu. K. Petrenya // *Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (EIConRus)*. IEEE, 2022. P. 1017–1021. doi: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755593.
25. Mannanov E. R., Filin A. G., Belko V. O. Technique for calculating the thermal conductivity coefficient of the insulation system // *Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. Conf. (EIConRusNW)*. IEEE, 2021. P. 1193–1196. doi: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396705.
26. Electromagnetic forces on coils and bars inside the slot of hydro-generator / B. Sanosian, P. Wendling, T. Pham, W. Akaishi // *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE, 2019. P. 1754–1760. doi: 10.1109/ECCE.2019.8913254.
27. The effect of discharge activity on the performance of corona-protective semiconducting coatings of the stator bar insulation / A. S. Reznik, I. O. Ivanov, T. M. Shikova, A. M. Andreev, E. R. Mannanov // *Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. Conf. (EIConRusNW)*. IEEE, 2021. P. 1228–1231.
28. Fault localization and analysis for a damaged hydrogenerator and a proposal to improve the standard for generator commissioning tests / A. Akbari, M. Rahimi, P. Werle, H. Borsi // *IEEE Electr. Insulation Magazine* 2021. Vol. 36, no. 3. P. 19–26.
29. Hirakawa T., Kumada A., Hidaka K. Surface potential measurement of model stator bar with stress grading system by field sensor // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electr. Insulation* 2019. Vol. 26, no. 4. P. 1146–1157.
30. Iwabuchi H., Oyama T. Breakdown phenomena across micrometer scale surface gap under negative voltage application // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electr. Insulation* 2019. Vol. 26, no. 5. P. 1377–1387.
31. Modelirovanie jelektrorazrjadnyh processov dlja optimizacii koronozashhitnoj sistemy izoljicii vysokovol'tnyh mashin / A. M. Andreev, I. A. Andreev, V. O. Bel'ko, A. S. Reznik, A. N. Smirnov, A. A. Stepanov // *Problemy regional'noj jenergetiki*. 2020. № 2 (46). S. 33–42. (In Russ.).
32. Study of characteristics of vibration sparking in hv rotating machine insulation / V. Belko, A. Plotnikov, Y. Petrenya, T. Shikova // *16th Conf. on Electr. Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*. Varna, Bulgaria, 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/ELMA.2019.8771490.
33. Numerical simulation of discharge activity in hv rotating machine insulation / V. O. Belko, Y. K. Petrenya, A. M. Andreev, A. M. Kosteliov, M. B. Roitgarz // *IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electr. and Electronic Engin. (EIConRus)*. Saint Petersburg and Moscow, Russia: IEEE, 2019. P. 800–802. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657272.
34. Montanari G. C. Seri PA partial discharge-based health index for rotating machine condition // *IEEE Electr. Insulation Magazine*. 2018, no. 2 (34). P. 17–23.
35. Modelling of electrical discharge processes for optimization of corona-protection system of high voltage rotating machines insulation / A. M. Andreev, I. A. Andreev, V. O. Belko, A. S. Reznik, A. N. Smirnov, A. A. Stepanov // *Problemele Energeticii Regionale*. 2020. No. 2 (46). P. 33–42.
36. Causes of Resistance Decrease of Corona Protection Materials in Thermal Aging Process / N. A. Fedotov, T. M. Shikova, V. O. Belko, A. S. Reznik, A. M. Kostelov, E. R. Mannanov // *Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP)*. Saint Petersburg, Russian Federation: IEEE, 2023. P. 31–34. doi: 10.1109/MDP60436.2023.10424102.
37. Mannanov Je. R., Filin A. G. Teplovoe sostojanie jelektricheskij izoljicii statornyh obmotok turbo-generatorov s vozdušnym ohlazhdeniem // *Global'naja jenergija*. 2021. T. 27, № 2. S. 38–49. doi: 10.18721/JEST.27203. (In Russ.).

38. Sako H., Koga K., Maeda H. Development of larger output indirectly hydrogen-cooled turbine generator with high transfer main insulation (Mitsubishi Electric Corporation) CIGRE, 2016. A1–116.

39. Type-tested air-cooled turbo-generator in the 500 MVA range / R. Joho, T. Hinkel, J. Baumgarten, C. E. Stephan, M. Jung // CIGRE, 2000. 11–101.

40. The world's largest capacity turbine generators with indirect hydrogen-cooling / T. Kitajima, H. Ito, S. Nagano, Y. Kazao. CIGRE, 2004. A1–106.

41. Current progress in high thermal conducting insulation technology for large capacity turbine generator / T. Harakawa, F. Sawa, T. Okamoto, H. Hatano, K. Naga-

kura // 17th Intern. Conf. on Electr. Machines and Systems. IEEE, 2014. P. 38–42. doi: 10.1109/icems.2014.7013893.

42. Resonac. URL: https://www.resonac.com/sites/default/files/2022-12/en_pdf-rd-report-058-58_tr04.pdf (дата обращения: 06.05.2024).

43. E-Cigre. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/session2016-2016-cigre-session.html> (дата обращения: 06.05.2024).

44. Alekseev B. A. Turbogeneratory bol'shoj moshhnosti v dokladah SIGRJe 2000–2004 gg. // JeLEKTRO. Jelektrotehnika, jelektrojenergetika, jelektrotehnicheskaja promyshlennost'. 2006. № 2. S. 42–48. (In Russ.).

Information about the authors

Emil R. Mannanov – Design engineer of the 1st category, JSC «Power Machines», 3A Vatutina St., Saint Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9988-793X>

Alexander V. Konovalov – Design engineer of the 2nd category, JSC «Power Machines», 3A Vatutina St., Saint Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: Konovalov_AV1@power-m.ru

Andrey M. Kostelov – Chief specialist in turbogenerator windings, JSC «Power Machines», 3A Vatutina St., Saint Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: Kostelov_AM@power-m.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3242-310X>

Alexey G. Filin – Cand. Sci. (Eng.), Chief specialist in thermal and ventilation calculations, JSC «Power Machines», 3A Vatutina St., Saint Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: Filin_AG@power-m.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9516-9970>

Author contribution statement:

Mannanov E. R. – concept development. Formation of an idea; formulation or development of key goals and objectives.

Konovalov A. V. – concept development. Data collection/evidence, analysis and interpretation of the data obtained.

Kostelov A. M. – concept development. Drafting of a manuscript or its critical revision with the introduction of valuable comments of intellectual content; participation in scientific design; preparation, creation and/or presentation of a published work.

Filin A. G. – concept development. Taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Статья поступила в редакцию 04.04.2024; принята к публикации после рецензирования 28.05.2024; опубликована онлайн 30.09.2024.

Submitted 04.04.2024; accepted 28.05.2024; published online 30.09.2024.