

29. Испытания многокристалльных IGBT-модулей на стойкость к циклическому воздействию силового тока / В. В. Веревкин, С. Л. Стригунов, А. П. Пилипен-

ко, К. А. Волобуев, В. А. Лобанова // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 5. С. 451–459.

30. Метод наименьших квадратов. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения 16.10.2020)

V. V. Verevkin, K. A. Volobuev, S. L. Strigunov
JSC «Proton-Electrotex»

A. P. Pilipenko, V. A. Lobanova
Orel State University named after I. S. Turgenyev

IGBT MODULES FAILURE MECHANISMS DURING POWER CYCLING TEST

Investigates the main failure mechanisms of the components and interfaces of the soldered power IGBT modules during power cycling test. The authors present classifications and schemes of the appearance and development of degradation mechanisms of components in soldered power IGBT modules, including the causes of their occurrence and detection indicators. An experiment was prepared and carried out to study the influence of the cycling mode on the structural elements degradation of IGBT modules prototypes. Based on the test results in the short and long power cycling mode, the dependences of the collector-emitter saturation voltage on the number of cycles are plotted. The novelty of the paper lies in these dependences, allowing to determine the dominant degradation mechanism of the investigated device in the absence of data on the mode of its testing or operation without the need for additional diagnostic measures. Soldered IGBT

Soldered IGBT power modules, reliability tests, failure mechanisms, power cycling test, solder fatigue, bond wire fatigue, chip surface reconstruction, substrate delamination

1820–2020

Посвящена двухсотлетию
электромеханики

УДК 621.313

М. А. Ваганов, К. А. Колупицкий
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Краткий исторический обзор технической информации по проектированию турбогенераторов

Проектирование турбогенератора (ТГ) представляет собой достаточно сложную в инженерном смысле задачу, в ходе решения которой должны быть даны ответы на целый ряд вопросов разного физического содержания: электромагнитный расчет, выбор активных, конструкционных и электроизоляционных материалов ТГ, механический расчет и конструктивное оформление ТГ, его тепловой расчет. Только удачное решение всех перечисленных разноплановых задач сможет обеспечить высокие технико-экономические показатели этих электрических машин, их надежность в течение всего срока службы и длительность срока службы. Эксплуатация подобных гигантов отечественной электроэнергетики как у нас, так и за рубежом подтвердила их высокую и эффективную работоспособность. Образно выражаясь, можно сказать, что в свое время были созданы ТГ, часть которых заслуживает того, чтобы быть названными научно-техническими шедеврами, достойными их экспонирования на выставках и в музеях мира.

Турбогенератор, методы расчета и проектирования, машинная постоянная и ее физическая трактовка, критерии расчета

Более ста лет тому назад – в конце 10-х– начале 20-х гг. XX в., практически одновременно

с началом широкого промышленного применения электрических машин, появились первые методи-

ки и практические рекомендации по проектированию и расчету ТГ, которые были сформулированы и описаны в научных трудах и работах К. И. Шенфера, А. Блонделя, А. Ла-Кура, Э. Арнольда, Р. Рихтера, М. Видмара и ряда других авторов. К первым отечественным работам по расчету и проектированию электрических машин можно отнести книги В. А. Пантелеева, П. П. Копняева, А. Я. Бергера и Ф. И. Холуянова. Большой вклад в методологию проектирования электрических машин внесли такие ученые и специалисты, как А. И. Вольдек, И. М. Постников, М. П. Костенко, А. Е. Алексеев, Б. П. Апаров, В. Т. Касьянов, Б. И. Кузнецов, Р. А. Лютер, Г. Н. Петров, П. С. Сергеев, Т. Г. Сорокер, В. А. Трапезников, И. П. Копылов и ряд других [1].

Если говорить непосредственно о проектировании турбогенераторов, то следует обратить внимание на достаточно узкий круг специалистов и ученых, которые своими научными трудами внесли значительный вклад в разработку конструктивных схем, а также в теорию проектирования данного типа синхронных неявнополюсных машин. Это советские ученые: А. Е. Алексеев, Р. А. Лютер, Е. Г. Комар, В. В. Титов, М. П. Костенко, И. А. Глебов, И. Ф. Филиппов, И. З. Богуславский, Я. Б. Данилевич, Г. М. Хуторецкий, Н. А. Поляк.

К сожалению, не удалось найти сколько-нибудь известных современных зарубежных ученых и специалистов, внесших определенный вклад в теорию проектирования турбогенераторов.

Однако можно отметить, что в конце XIX в. в Америке и Европе были созданы такие крупные электротехнические концерны, как AEG (основана в 1887 г., упразднена в 1996 г.), Siemens & Halske (существовала с 1847 г. до 1966 г.), Siemens-Schuckertwerke (основана в 1903 г., упразднена в 1966 г.), Westinghouse (существовала с 1886 по 1997 гг.) и др. Уже в то далекое время внутри их структуры были сформированы крупные инженерные подразделения расчетчиков и конструкторов.

В России же первые заводы, выпускающие электротехническую продукцию, появились лишь в начале XX в. К ним можно отнести завод «Электросила» в Санкт-Петербурге, московский завод «Динамо» и еще несколько заводов в Таллине и Харькове, штат которых насчитывал несколько десятков специалистов-электромехаников. Таким образом, эти города в то время стали крупными производственными центрами электротехнической промышленности, которая разви-

валась особенно бурными темпами после Великой Отечественной войны. Примерно 40–50 кафедр вузов выпускали инженеров-электромехаников. В настоящее время число российских высших учебных заведений, готовящих и выпускающих специалистов по электрическим машинам, стремительно близится к нулю – это буквально единицы из огромного количества вузов России. В дальнейшем это обстоятельство может привести к острому дефициту, а то и полному отсутствию высококвалифицированных кадров в области электромеханики, что, в свою очередь, неизбежно скажется на уровне конкурентоспособности России на мировом рынке электромашиностроения.

Первые российские турбогенераторы имели конструкцию, навязанную фирмой AEG, с которой советское правительство заключило договор о технической помощи с целью ускорения развития советского электромашиностроения во времена экономической блокады страны Советов. Однако, как показывал опыт эксплуатации турбогенераторов фирмы AEG, их конструкция оказалась менее надежной, чем конструкции первых генераторов, разработанных в 20–30-е гг. XX в. талантливыми российскими учеными и инженерами Р. А. Лютером, А. Е. Алексеевым и др. Именно с этого времени можно считать, что завод «Электросила», в штате которого состояли вышеупомянутые специалисты, вышел на собственный путь развития генераторостроения. В 30-х гг. XX в. заводскими инженерами-расчетчиками достаточно быстро разрабатывались и унифицировались методики расчета турбогенераторов. В 1933–1935 гг. Я. М. Картузовым и В. С. Коцем была разработана инструкция для выполнения поверочного расчета электрических машин, а Ф. А. Дементьевым, М. Л. Брициным и Н. А. Монозеном – инструкция по расчету параметров турбогенераторов и их возбуждателей. Создание заводских методик по проектированию и расчету электрических машин обуславливалось отсутствием последовательных руководств по теории и конструированию синхронных машин. Существовавшие учебники, например «Электрические машины» под редакцией Р. Рихтера, были опубликованы только на немецком языке. Отсутствие отечественной литературы по электромеханике заставило ученых-электротехников взяться за работу по написанию и публикации трудов по этой тематике для поднятия уровня технического

мышления инженеров. Так появились книга профессора М. П. Костенко «Электрические машины» и его совместный с А. Е. Алексеевым труд «Турбогенераторы», вышедший в 1939 г. Они включали в себя вопросы теории и расчета электрических машин. Существовали и другие, менее известные книги, такие, как «Синхронные машины» и «Основные элементы новейшей теории синхронной машины», опубликованные в довоенное время начальником конструкторского бюро турбогенераторов Харьковского электромеханического завода профессором А. Я. Бергером. Из всего этого следует, что первые методики по расчетам турбогенераторов разрабатывались инженерами-электромеханиками непосредственно на электромашиностроительных заводах и тем самым имели прикладной характер, поскольку, как считал Р. А. Лютер, только специалисты, постоянно занятые практическим проектированием, могут придать методике расчета удобную для практического использования форму, позволяющую избавиться от лишних размышлений расчетчика, решающего сложную задачу поиска оптимального варианта, и сконцентрировать его внимание на конечном результате [2].

Говоря об изготовлении турбогенераторов в настоящее время, следует выделить лишь несколько крупных корпораций в мире, проектирующих и производящих данные машины. К ним относятся: Siemens, Alstom, GE, Toshiba, Ansaldo, «Силовые машины» и др. Крупнейшим в России предприятием-разработчиком и поставщиком по всему миру современных турбогенераторов, имеющим в своей структуре несколько десятков опытных расчетчиков и конструкторов, является концерн «Силовые машины», составной частью которого является завод «Электросила». Методика и подход к проектированию турбогенераторов, разработанные в середине XX в. группой ученых и инженеров-электромехаников во главе с одним из лучших теоретиков в области электромашиностроения, доктором технических наук, главным конструктором по проектированию турбогенераторов завода «Электросила» Г. М. Хуторецким, по сей день применяются в компании «Силовые машины» при создании новых и модернизации старых, выработавших свой ресурс, турбогенераторов. Предложенная методика в большей степени основывается на принципах проектирования турбогенераторов, разработанных еще Р. А. Лютером и его современниками, а также последователями и учениками.

Задача проектирования электрической машины, которая повседневно ставится перед специалистами данного профиля, достаточно сложная и, что самое существенное, многовариантная. Чтобы подобную задачу решить, необходимо учесть целый ряд разноплановых факторов. Технический уровень электрической машины в большинстве случаев оценивается при помощи такого показателя, как масса машины, отнесенная к единице ее мощности. Целью расчетчика, проектировщика и конструктора электрической машины, да и в принципе любого механизма, должно являться получение такого варианта расчета изделия, который оказался бы наиболее близким к поставленному заданию на проектирование и выполнялся бы наиболее коротким, быстрым и практичным путем при минимальных затратах материалов и времени. По этой причине, наряду с конструктивными усовершенствованиями деталей и узлов электрических машин, а также с учетом применяемых в конструкциях машин современных материалов, предпринимались и попытки оптимизации методов расчета машин и в целом подходов к их проектированию.

Все описанные в специализированной литературе подходы к проектированию электрических машин основаны на использовании различных машинных постоянных, на базе которых определяются основные геометрические размеры машины и ее электромагнитные нагрузки. Причем зависимости этих постоянных от мощности машины или диаметра расточки статора обычно визуализируются графически, исходя из имеющегося опыта проектирования каждого конкретного типа электрических машин и, таким образом, в скрытом виде несут в себе основные параметры проектируемой машины. Используемые машинные постоянные на самом деле не являются постоянными в буквальном смысле слова. В их состав входят такие величины, как линейная нагрузка статора, магнитная индукция в воздушном зазоре машины, косвенно учитывается система и вид охлаждения, а также другие параметры и факторы. Однако в любом случае главные размеры активной части электрической машины находятся в непосредственной зависимости от магнитной индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки статора.

В подавляющем большинстве расчетных методик размеры активного ядра машины и ее основные электромагнитные нагрузки определяют

ся на базе машинной постоянной Э. Арнольда, характеризующей активный объем электрической машины, отнесенный к единице ее мощности при постоянной скорости вращения ротора.

Рядом ученых предпринимались попытки собственных интерпретаций машинной постоянной. Из наиболее известных можно выделить машинную постоянную Эссона, характеризующую окружное усилие, отнесенное к единице поверхности расточки статора, – момент машины, отнесенный к единице объема. Проще говоря, машинная постоянная Эссона представляет собой величину, являющуюся обратной для постоянной Арнольда. В свою очередь, например, Р. Рихтер вводит понятие машинной постоянной как отношение момента машины к единице наружной поверхности ее ротора. В своих работах Рихтер значительно развил идеи Арнольда, расширил понятие области теории электрических машин, ликвидировав ряд существующих пробелов в электро-механике, связанных с разрывом между расчетной моделью и практикой. Многие электрические машины в те годы рассчитывались для идеальных условий работы, а потом, по результатам экспериментов и статистических данных в их расчет вводились некие поправочные коэффициенты. Рихтер усовершенствовал модель электрических машин, устранив подобные поправки. Это позволило существенно повысить точность проводимых расчетов и обосновало логичность их выполнения. А основатель кафедры электрических машин Московского энергетического института академик К. И. Шенфер в своих трудах вместо используемого Арнольдом диаметра расточки статора применяет наружный диаметр пакета стали статора и таким образом интерпретирует свой вариант машинной постоянной. Советский ученый В. С. Кулебакин руководствовался ожидаемой силой токов короткого замыкания при определении размеров активного ядра синхронных электрических машин. Еще один советский ученый-электротехник Б. П. Апаров считал, что основные размеры синхронной машины следует выбирать, исходя из необходимых кратностей пускового и максимального моментов. Г. Н. Петров – крупный советский ученый, специалист в области электрических машин и трансформаторов, в своих научных работах ввел понятия единичной машины и касательной силы, которая действует на единицу поверхности ротора и зависит от мощности электрической машины [3]–[4].

Таким образом, подытоживая изложенное, можно заключить, что методики расчетов и подходы к проектированию электрических машин, основанные на использовании каких-либо машинных постоянных, при условии строгого выполнения имеющихся в них рекомендаций по выбору необходимых электромагнитных нагрузок машины безусловно позволяют с достаточной точностью определить активный объем электрической машины и примерное значение ее минимально возможной массы. При этом спроектированная таким образом машина будет работать и обеспечивать на выходе требуемые от нее параметры. Однако необходимо учесть, что количество пар значений таких электромагнитных нагрузок, как линейная нагрузка статора и магнитная индукция в воздушном зазоре, определяющих один и тот же объем активного ядра машины при помощи выражений для машинных постоянных, может быть достаточно большим. Как правило, методики расчетов электрических машин включают в себя диапазоны допустимых значений соответствующих электромагнитных нагрузок, обеспечивающие допустимое для требуемого класса нагревостойкости изоляции превышение температуры металла активных частей. Данная информация формируется на базе имеющегося опыта расчета, проектирования и промышленной эксплуатации того или иного типа электрических машин и всегда носит рекомендательный характер.

Исходя из определения линейной нагрузки, ее значение численно равно полному току в обмотке статора, приходящемуся на единицу длины окружности воздушного зазора электрической машины. А значение магнитной индукции в воздушном зазоре машины определяет ее полезный магнитный поток, а также значения магнитной индукции в ярме и зубцах сердечников статора и ротора. Следовательно, и распределение материалов внутри активного объема для разных сочетаний электромагнитных нагрузок будет неодинаковым.

Главным образом, вопрос касается изменения геометрических размеров участков магнитной цепи машины и ее обмоточных данных, определяющих объем и массу активных материалов в электрической машине. В связи с этим принято считать, что степень использования материалов в объеме активного ядра электрической машины может быть оценена, исходя из значений ее электромагнитных нагрузок.

Все изложенное можно считать общим аспектом в подходах к проектированию электрических машин, различающихся типами, родом тока, системами и видом охлаждения, а также назначением машины и условиями ее эксплуатации.

Целью данной обзорной статьи является подготовка к разработке современного подхода к проектированию турбогенераторов, обеспечивающего оптимальность их основных размеров и электромагнитных нагрузок, относительно выбранного критерия проектирования. В связи с этим представляет интерес обзор и анализ применявшихся ранее и применяющихся в настоящее время методик и подходов к проектированию именно данного типа электрических машин.

Как уже отмечалось, в основу проектирования и расчета современных российских турбогенераторов, поставляемых на электростанции по всему миру, заложена методика, разработанная группой советских ученых и инженеров-электриков во главе с Гарри Михайловичем Хуторецким. В задании на проектирование турбогенератора должны входить такие параметры машины, как номинальная мощность, коэффициент мощности, номинальное напряжение, рабочая частота вращения ротора, число фаз, значения ОКЗ и статической перегружаемости. В рассматриваемой методике, как и в любой другой, проектирование машины начинается с определения ее основных размеров – диаметра расточки статора, аксиальной длины сердечника статора и воздушного зазора, которые в конечном итоге будут определять массу машины. Основное внимание при выборе размеров активного ядра машины, согласно данной методике, уделяется степени использования основных материалов, рабочей температуре обмоток статора и ротора, а также ряду других параметров генератора. Прежде всего, по характеристикам, построенным на базе уже разработанных и успешно работающих машин, в зависимости от мощности машины выбираются предварительные значения диаметра расточки статора и наружного диаметра бочки ротора, значения которых затем нормализуются, исходя из предложенного автором методики ряда значений диаметров роторов, а также может быть определен ожидаемый КПД проектируемой машины. Затем, используя построенные графические зависимости постоянной Арнольда, линейной нагрузки статора и магнитной индукции поля в воздуш-

ном зазоре от диаметра расточки статора оцениваются значения данных параметров и предварительно определяется аксиальная длина сердечника статора. Размер воздушного зазора согласно методике, предложенной Г. М. Хуторецким, определяется из условия обеспечения заданной статической перегружаемости или ОКЗ. В дальнейшем, после уточнения диаметра расточки статора рассчитываются отношения аксиальных длин сердечников статора и ротора к диаметру расточки статора и наружному диаметру бочки ротора соответственно, исходя из которых оценивается расход меди на обмотки статора и ротора [3]–[4].

Следующим этапом расчета, необходимым для разработки конструкции сердечника статора с обмоткой, в рассматриваемой методике является определение обмоточных данных статора и ротора, под которыми понимаются число пазов сердечника статора, число витков статорной обмотки, число параллельных ветвей в обмотке, размеры пазов и уложенной в них меди, а также аксиальная длина и количество пакетов стали, из которых состоит сердечник статора. Также в ходе данного этапа, исходя из объема тока в пазу статора, уточняется принятое ранее значение линейной нагрузки. Автором методики на базе огромного опыта проектирования и анализа эксплуатационных параметров турбогенераторов разработаны рекомендации относительно выбора и расчета ширины паза статора и соотношения между шириной паза и зубцовым шагом, обеспечивающим оптимальное использование зубцовой зоны сердечника статора. Ширина меди в пазу определяется вычитанием из ширины паза двухсторонней толщины корпусной изоляции статорного стержня, которая определяется рабочим напряжением статора. Значение ожидаемой плотности тока в статорной обмотке определяется по опытным семействам графических зависимостей и выбирается, исходя из объема тока в пазу и ширины паза статора или из полученной ширины меди статорного стержня [3]–[4].

Высота паза сердечника статора должна обеспечивать требуемое по расчету сечение стержня при уже известной его ширине и складывается из толщин множества элементарных проводников, изоляционных прокладок и корпусной изоляции. Кроме того, по высоте паза необходимо предусмотреть место для клиньев, обеспечивающих крепление стержней к пазу и исключаящих их радиальное перемещение. В методике также при-

водятся нормальные значения отношений высоты паза статора к диаметру его расточки, а также к ширине паза. На этапе определения обмоточных данных статора, исходя из значений магнитных потока и индукции в воздушном зазоре, уточняется определенная ранее аксиальная длина сердечника статора. После определения габаритов элементов зубцовой зоны статора, согласно рассматриваемой методике, основываясь на рекомендациях по выбору значения магнитной индукции в спинке статора, сформированных автором методики, определяется необходимое сечение спинки статора, ее высота и наружный диаметр сердечника статора. Достаточность высоты спинки статора оценивается посредством определения ожидаемой амплитуды радиальных колебаний сердечника статора от сил магнитного тяжения, которая зависит от жесткости сердечника, определяемой размерами спинки, и близости частоты возмущающего усилия к резонансной частоте. При превышении данной амплитудой существующих норм необходимо увеличивать высоту спинки статора и, следовательно, наружный диаметр стали статора до нормализации амплитуды радиальных колебаний сердечника [3]–[4]. Следовательно, высота спинки статора выбирается, главным образом, из соображений обеспечения благоприятного механического состояния статора.

Следуя методике Г. М. Хуторецкого, после получения обмоточных данных статора можно приступить к проектированию пазовой части ротора: определяют количество и размеры пазов, предназначенных для размещения в них обмотки возбуждения, размеры проводников катушек обмотки возбуждения и др. Ввиду того, что ротор является самым нагруженным в механическом отношении узлом турбогенератора, к проектированию его основных элементов подходят, главным образом, со стороны необходимости обеспечения их механической прочности. Применительно к зубцовой зоне ротора элементом, испытывающим наибольшие механические усилия при работе машины, является основание зубца ротора – самое узкое место зубца у его основания. Его ширина, наряду с высотой и шириной роторного паза, а также числом пазов определяются по соответствующим номограммам в зависимости от наружного диаметра бочки ротора и ожидаемому механическому напряжению в зубцах. После выбора типоразмера обмоточной меди определяют значения МДС возбуждения и плотности тока,

число витков в обмотке возбуждения, а также сила тока возбуждения. Затем, исходя из необходимого заполнения паза по ширине и высоте, учитывая наличие витковой, корпусной и подклиновой изоляции, а также клина, окончательно уточняются размеры роторного паза. Далее, руководствуясь рекомендациями автора методики по выбору значения индукции магнитного поля в спинке ротора, определяется ее сечение, обеспечивающее принятое значение индукции, посредством которого рассчитывается аксиальная длина пазовой части вала ротора.

Теперь, имея полную ясность относительно размеров сердечников и обмоточных данных статора и ротора, необходимо выполнить расчет магнитной цепи машины, который заключается в определении и уточнении ранее принятых значений магнитной индукции на ее участках: в зубцах и спинках сердечников статора и ротора, а также в воздушном зазоре. Фактически, согласно данной методике, электромагнитный расчет как бы является поверочным расчетом. Его результатом является определение МДС на каждом из перечисленных ранее участков магнитной цепи и МДС холостого хода. После его проведения рассчитываются индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора, потери, КПД, выполняются тепловые, а также механические расчеты турбогенератора и, кроме того, оценивается превышение температуры [3]–[4].

В заключение анализа подхода к проектированию турбогенераторов, предложенного Хуторецким Г. М., необходимо отметить, что он нацелен на проектирование машины с обеспечением минимума затрат на ее изготовление. Об этом свидетельствует тот факт, что автор методики, являвшийся в те времена главным конструктором-расчетчиком турбогенераторов крупнейшего в мире электромашиностроительного завода, всегда заострял внимание на необходимости учета размеров имеющейся на производстве технологической оснастки для обработки и изготовления тех или иных узлов и деталей машины. Кроме того, он призывал обращать внимание на использование стандартных, ранее применяемых типоразмеров, используемых в турбогенераторостроении материалов, что позволяет исключить материальные затраты и лишние затраты труда на создание новых типоразмеров материалов. Проще говоря, автор методики придерживается принци-

па создания технологичной конструкции машины, когда ее проектирование не отделимо от технологии ее изготовления и должно быть связано с технологическими возможностями производства. Все это, исходя из заложенного в методике принципа проектирования, отражается на выборе размеров основных элементов изготавливаемых турбогенераторов, к которым относятся ширина и глубина пазов статора и ротора, наружный диаметр и диаметр расточки статора и др.

Несколько своеобразным можно считать подход к проектированию турбогенераторов, предложенный другим советским инженером-электриком Натаном Акимовичем Поляком, который считал недостаточно характерным значение машинной постоянной Арнольда применительно к турбогенераторам ввиду следующих соображений:

1. Турбогенератор следует характеризовать значением активной мощности, а не кажущейся, так как он преобразовывает механическую энергию, подводимую к валу ротора, в электрическую энергию.

2. В зависимости от конструктивного исполнения турбогенераторов у них будет различная статическая перегружаемость, которую необходимо учитывать на стадии определения основных размеров машины.

3. В математическое выражение для машинной постоянной генератора должна входить некоторая обобщенная величина, которая характеризовала бы его основные электромагнитные свойства [5].

Автор данного подхода считал, что машинная постоянная должна включать в себя удельные электромагнитные нагрузки активных материалов ротора, как наиболее напряженного в механическом и тепловом отношениях узла турбогенератора. Исходя из анализа условий возникновения электромагнитного момента на валу ротора турбогенератора Н. А. Поляк представил собственную интерпретацию машинной постоянной двухполюсного турбогенератора, которая связывает основные размеры ротора турбогенератора – диаметр и аксиальную длину его бочки с активной мощностью и статической перегружаемостью турбогенератора, а также с удельными электромагнитными нагрузками ротора – линейной нагрузкой и магнитной индукцией в воздушном зазоре у наружной поверхности ротора. Кроме того, основываясь на сопоставлении машинной постоянной турбогенератора и машинной постоянной Арнольда, автор выявил связь между ли-

нейными нагрузками статора и ротора, а также между значениями магнитных индукций в зазоре машины у поверхности расточки статора и наружного диаметра бочки ротора. В конечном итоге он разработал рекомендации по выбору отношения диаметра расточки статора к наружному диаметру ротора в зависимости от значения линейной токовой нагрузки ротора и статической перегружаемости генератора в виде семейства кривых [5].

Огромный вклад в развитие теории проектирования турбогенераторов внес еще один крупный советский ученый и конструктор Евгений Григорьевич Комар, являвшийся в разное время главным конструктором, а затем главным инженером завода «Электросила». Он четко разделял активные части турбогенератора, в которых протекают основные электромагнитные процессы, и поддерживающие и укрепляющие их конструктивные части машины, которые в процессе работы взаимно обеспечивают друг друга. Также не отделимы друг от друга, по мнению автора, должны быть расчет машины, основой которого является определение объема ее активного ядра и электромагнитных нагрузок, и ее конструкция [6]. Особенностью турбогенераторов является то, что активная часть ротора главным образом выполняет конструктивную функцию и подвержена в процессе работы возникающим в ней значительным механическим напряжениям, которые не связаны с электромагнитной природой машины. Отсюда автор сделал вывод, что размеры активной части ротора турбогенератора – бочки его вала, главным образом определяются исходя из условия обеспечения достаточной механической прочности элементов сердечника ротора и деталей ротора, сопрягаемых с ним. Относительно активного железа статора автор сделал заключение, что большие токовые нагрузки статора требуют обеспечения его эффективного охлаждения, условия которого в большей мере определяют конструкцию статорного железа и его размеры. Несмотря на свои выводы, касающиеся размеров активного ядра, у Е. Г. Комара выработан своеобразный подход к их выбору. Главными размерами автор считал диаметр расточки статора и его аксиальную длину. Причем их соотношение должно быть наилучшим и выбирается, главным образом, исходя из опыта построенных машин и имеющейся в условиях конкретного производства дорогостоящей технологической оснастки для изго-

товления их деталей. В целом, подход к проектированию турбогенераторов, предложенный данным автором, основывается на применении машинной постоянной Арнольда, однако он уделил большое внимание анализу влияния значения отношения аксиальной длины сердечника статора к диаметру его расточки на массы активного железа и меди обмоток статора и ротора. Так, например, связав математически размеры элементов сердечника статора с магнитными индукциями на соответствующих участках магнитной цепи, ему удалось доказать, что размеры сердечника в радиальном направлении пропорциональны с некоторым постоянным коэффициентом диаметру расточки статора, а объем активного железа статора и, следовательно, его масса не зависят от значения отношения аксиальной длины сердечника к диаметру его расточки. Кроме того, ввиду конструктивного расположения лобовых частей обмоток статора и ротора по торцам их сердечников автор сделал вывод, что длины лобовых частей также пропорциональны диаметру расточки, причем коэффициенты пропорциональности рассчитываются однозначно. С помощью математического моделирования Е. Г. Комар получил выражения, связывающие массы меди обмоток статора и ротора с отношением основных размеров, из которых следует, что при некоторых значениях данного отношения расход меди будет минимальным. Эти исследования побудили автора сформировать рекомендации по выбору оптимального с точки зрения расхода меди соотношения между аксиальной длиной сердечника статора и диаметром его расточки, корректность которых подтверждается проверкой данного показателя на большом количестве построенных турбогенераторов [6].

Помимо этого автор дал рекомендации по выбору ширины паза сердечника статора, которая, по его мнению, ограничена двумя обстоятельствами: максимально допустимым значением магнитной индукции в самом тонком сечении зубца и значением потерь от зубчатости статора на наружной поверхности ротора [6]. Найдя математическую связь между размерами паза и магнитными индукциями в воздушном зазоре и в зубце, а затем и с уровнем потерь от зубчатости статора, автор нашел оптимум и сформировал числовой диапазон рекомендуемых при проектировании значений отношения ширины паза сердечника статора к зубцовому шагу статора по расточке.

Однако наиболее узким и напряженным узлом турбогенератора, как считал автор, ограничивающим его тепловые, механические и электромагнитные возможности, является ротор, так как его перечисленными возможностями прежде всего определяется степень использования активных материалов всего турбогенератора. В связи с этим доводом Е. Г. Комар провел анализ, в ходе которого определил МДС, обеспечиваемую ротором, при учете допустимых механических напряжений в основании зубца вала ротора и принятом значении магнитной индукции в данном сечении. Тем самым получено оптимальное соотношение между высотой и шириной роторного паза и его максимальная площадь поперечного сечения, пропорциональная наружному диаметру ротора. Определяемая МДС, в свою очередь, оказывается пропорциональной квадрату диаметра расточки статора [6]. Что касается основных электромагнитных нагрузок турбогенератора – магнитной индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки, то их выбор автор обосновал несложными математическими расчетами, и в конечном итоге они оказываются пропорциональными диаметру расточки статора, причем коэффициенты пропорциональности являются достаточно постоянными величинами.

Подытоживая предлагаемый обзор, можно предложить некоторые рекомендации:

1. Основу всех трех методик образует машинная постоянная Арнольда. Формально это означает, что каждая из рассмотренных методик представляет собой возможную вариацию физического содержания этой машинной постоянной. Данное обстоятельство лишь еще раз указывает на несовершенство и на неполноту физического содержания выражения машинной постоянной, которая описывает только объем расточки статора ТГ, в то время как сам статор учитывается только косвенно, через его линейную нагрузку. Ситуацию спасает только талант и интуиция авторов перечисленных методик, которые достаточно четко представляли себе, каким должен быть грамотно спроектированный ТГ.

2. С точки зрения проектирования и расчета ТГ представляет собой достаточно сложную электромеханическую систему или устройство, в которых тесно переплетены электромеханические, механические с точки зрения прочности, тепловые, технологические и конструктивные задачи, связанные в один тугий узел. Его практи-

чески невозможно однозначно распутать, не имея в своем распоряжении четкого математического описания как отдельных функциональных элементов ТГ, так и взаимных связей между этими элементами. Неопределенность решения и его сложность усугубляются тем, что отсутствует четкое ранжирование в порядке решения перечисленных ранее разноплановых частных задач, составляющих общую задачу проектирования ТГ, так как по ходу расчета приходится учитывать некие частные критерии, обеспечивающие качество проектируемого ТГ.

3. Среди возможного множества критериев как частных, так и достаточно общих, обеспечивающих надлежащее качество проектируемого ТГ, необходимо выбрать наиболее значимый критерий. С этой целью целесообразно еще раз вернуться к выражению машинной постоянной Ар-

нольда, правая часть которого содержит отношение объема расточки статора к некоторому расчетному моменту. А это означает, что правая часть выражения машинной постоянной характеризует собой степень использования активных материалов ТГ, но только, к сожалению, в объеме расточки статора.

4. Таким образом, машинная постоянная содержит в себе подсказку, руководствуясь которой можно сформулировать, а в дальнейшем и сформулировать главный критерий расчета ТГ.

5. Прямое или непосредственное отсутствие самого статора в выражении машинной постоянной обуславливает неопределенность в решении задачи проектирования ТГ. А это означает, что необходимо поставить статор на его законное место, т. е. обеспечить замкнутость ТГ как расчетной системы или модели в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И. П. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1986. 360 с.
2. Домбровский В. В., Лютер Р. А. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1985.
3. Турбогенераторы. Расчет и конструкция / В. В. Титов, Г. М. Хуторецкий, Г. А. Загородная и др. Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1967.

4. Хуторецкий Г. М., Токов М. И., Толвинская Е. В. Проектирование турбогенераторов. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987.
5. Поляк Н. А. Современные крупные двухполюсные турбогенераторы. М.: Энергия, 1972.
6. Комар Е. Г. Вопросы проектирования турбогенераторов. М.-Л.: Государственное энергетическое изд-во, 1955.

M. A. Vaganov, K. A. Kolupizkiy
Saint Petersburg Electrotechnical University

A BRIEF HISTORICAL OVERVIEW OF TECHNICAL INFORMATION FOR THE DESIGN OF TURBINE GENERATORS

The design of a turbine generator (TG) is a rather complicated task in the engineering sense, during the solution of which answers should be given to a number of questions of different physical content: electromagnetic calculation, selection of active ones, structural and electrical insulating materials TG, mechanical calculation and design of the TG, its thermal calculation. Only a successful solution to all of the above diverse tasks will be able to provide high technical and economic indicators of these electric machines, their reliability throughout the entire service life and durability. Operation of such giants of the domestic power industry as ours, and abroad has confirmed their high and effective performance. Figuratively speaking, we can say that at one time TGs were created, some of which deserve to be called scientific and technical she-devras, worthy of their display at exhibitions and in museums around the world.

Turbine generator, calculation and design methods, machine constant and its physical interpretation, calculation criteria