



УДК 621.313.322

КУЗЬМИН В.В., докт.техн.наук,
ЛИВШИЦ А.Л., канд. техн.наук, АО "МЭА"Элта"
ШПАТЕНКО Т.В., канд. техн.наук, АО "МЭА"Элта"
ШПАТЕНКО В.С., инженер, ООО "Элта-Инжиниринг"

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ШИХТОВАННЫХ МАГНИТОПРОВОДАХ КРУПНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН — НОВЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ЯВЛЕНИЙ И РАЗРАБОТКЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ПОЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ



КУЗЬМИН В.В.



ЛИВШИЦ А.Л.



ШПАТЕНКО Т.В.

История проблемы. Впервые ведущие заводы мира столкнулись с проблемой аномальных вибромеханических явлений в сердечниках статоров, когда по мере роста единичной мощности турбогенератора, сопровождавшегося заметным увеличением диаметральных размеров сердечника статора, собственная частота колебаний его стала опасно приближаться к частоте радиальных сил магнитного тяжения в воздушном зазоре. Использование "on-line" мониторинга и экспертных систем диагностики позволяет получать данные о состоянии электроэнергетического оборудования и заключения без вмешательства человека. Преимущества таких методов, способов и систем очевидны — это оперативность, непредвзятость при проведении диагностического анализа, независимость от личного опыта и навыков персонала, централизация контроля. Комплекс диагностических параметров, скорость изменения параметров и их тенденции, выявление проблем с оборудованием на более раннем этапе развития, эксплуатация "критического" оборудования, выявление дефектов, проявляющихся только в реальных режимах, накопление электронного архива — вот далеко не полный перечень возможностей современных комплексов мониторинга и диагностики.

В 60-х годах завод "Электротяжмаш" потратил много средств и времени на то, чтобы отстроить сердечник статора турбогенератора 300 МВт, 3000 об/мин от частоты радиального резонанса [1].

Через несколько лет в процессе профилактических осмотров статоров генераторов серии ТГВ мощностью 200 и 300 МВт начали обнаруживаться случаи самопроизвольного отвинчивания гаек крепления нажимного фланца, которым предшествовали процессы разрушения стопорящих деталей. Затем начали обнаруживаться и случаи обрыва хвостовиков прессующих шпилек [2].

Характер повреждений заключается в усталостном изломе хвостовиков шпилек, который с течением времени прогрессирует — в 2004 г. на турбогенераторе ст. № 3 Трипольской ТЭС оборвалось одновременно несколько хвостовиков. Аналогичные усталостные изломы хвостовиков шпилек

наблюдались и в статорах гидрогенераторов [3].

Анализ рассмотренных статистических данных, протоколов расследования повреждений, а также дополнительной информации из ряда источников позволяет отметить следующие наиболее существенные моменты, характеризующие появление дефектов в узлах крепления нажимных фланцев.

1. Обрыв хвостовиков призм и износ их резьбовой части однозначно носит усталостный характер.
2. Среднее время наработки до обнаружения дефекта составляет 22 года.
3. Наиболее часты групповые повреждения концов призм (3 и более) — отмечены в 10 из 14 рассмотренных случаев.
4. Появление групповых обрывов приводит к повышению шума и вибрации корпуса статора.
5. Групповые повреждения призм были сосредоточены в верхней половине сердечника статора.

Отмеченные "симптомы" однозначно приводят к следующим заключениям о причинах появления рассматриваемых дефектов.

Во-первых, характер излома (п.1) свидетельствует о том, что кроме статического давления от запрессованного сердечника на нажимной фланец действуют также **знакопеременные усилия**. В отечественной и мировой практике проектирования турбогенераторов [4] определение и учет влияния таких знакопеременных нагрузок никогда не велись. И как следствие — осевая вибрация нажимных фланцев до последних лет также систематически не измерялась.

Впервые на наличие такой вибрации обратила внимание "Электросила" в процессе доводки турбогенераторов типа ТВВ-1000-2 мощностью 1000 МВт.



В 2003 году после модернизации турбогенератора ТВВ-1000-2 ст. № 3 Южно-Украинской АЭС при ревизии были обнаружены местные повреждения стали крайних пакетов с изломом более 100 мелких кусочков листов вследствие каких-то экстремально-динамических процессов ударного характера.

Первоначально причиной таких дефектов было принято считать нарушение плотности прессовки шихтованных сердечников, чему в 70-х – 80-х годах были посвящены десятки статей и патентов.

Нельзя отрицать, что нарушение плотности прессовки является одним из сопутствующих факторов, но в соответствии с канонами классической механики твердого тела усталостные изломы могут возникать только в результате действия достаточно мощных осевых знакопеременных усилий.

В последние годы возросла актуальность проблемы надежности сердечников статоров турбогенераторов в связи с тремя факторами [5]:

- все большее число турбогенераторов имеет срок службы, близкий к установленному техническими условиями на них, или превышают его;

- многие турбогенераторы по режимным условиям эксплуатируются при повышенном напряжении и (или) с высоким коэффициентом мощности и (или) в режимах потребления реактивной мощности;

- снизилось качество технического обслуживания и ремонта.

Эти факторы способствуют ослаблению плотности прессовки торцевых зон сердечников, что приводит к возникновению дефектов. Чаще всего эти дефекты обнаруживаются в процессе испытаний и диагностических процедур или при осмотрах во время плановых ремонтов. Ослабление прессовки и распушение зубцов в торцевой зоне приводит к вибрации листов активной стали под действием аксиальных знакопеременных электродинамических усилий и усталостным повреждениям с последующим выкрашиванием фрагментов, которое представляет большую опасность и ограничивает работоспособность турбогенератора.

Наиболее часто серьезные разрушения этих зон, нередко приводящие к аварийным отключениям, происходят на турбогенераторах мощностью 165–300 МВт, изготовлявшихся до 1975 г. с незапеченными крайними пакетами сердечников [6].

При создании турбогенераторов с запеченными крайними пакетами сердечников статоров предполагалось, что подобные повреждения не будут иметь место. Однако последующая эксплу-

атация и обследования таких турбогенераторов показали, что и у них имеют место повреждения зубцов крайних пакетов, хотя и существенно реже, чем у турбогенераторов с незапеченными пакетами. На нескольких турбогенераторах по этой причине возникали аварийные отключения.

Наибольшую опасность представляют выкрашивания в зоне вентиляционных каналов, которые, как правило, начинаются с механического повреждения отслоившихся, вибрирующих листов активной стали о вентиляционные распорки и в дальнейшем развиваются путем обрыва листов вдоль вентиляционных распорок и их излома в глубине зубца. Разрушения распространяются на значительную глубину зубцов, а также возрастает скорость развития повреждений активной стали. Характерным признаком рассматриваемой стадии дефекта является износ вентиляционных распорок и нажимных пальцев. В отдельных случаях вентиляционные распорки полностью разрушаются на глубину до 50 мм и имеют износ на 1–3 мм по толщине распорки на глубину до 150 мм и более от поверхности расточки статора.

Принято считать, что одно из наиболее эффективных решений этой задачи – разработка и внедрение новых методов технической диагностики, которое позволяет получить достоверную оценку технического состояния оборудования; выработать комплекс рекомендаций по техническому обслуживанию и эксплуатации; продлить срок службы и оптимизировать затраты на ремонт и модернизацию за счет своевременного выявления дефектов и наиболее изношенных узлов генераторов.

Однако чрезмерно высокая повторяемость однотипных дефектов на обширном парке турбогенераторов различной конструкции наводит на мысль, что повреждение зубцовой зоны сердечника статора является следствием более глубоких причин, чем те, что перечислены в [5–7].

Диагностика, как и в медицине, нужна большой или стареющей системе, а здесь мы явно имеем дело с какой-то патологией, заложенной при разработке машин.

О природе возникновения и характере внутренних сил. Одна из немногих безуспешных попыток рассчитать осевые силы, действующие на зубцы крайних пакетов сердечника статора рассмотрена в [8], но как показано в [9], гипотеза о возникновении осевых сил в результате воздействия внешних магнитных полей рассеяния не может быть положена в основу анализа рассматриваемых вибромеханических процессов, ибо:

- при испытаниях статоров турбо- и гидрогенераторов в режиме "кольцевого намагничива-



ния" никаких полей рассеяния нет, а осевая вибрация возбуждается [10],

- в трансформаторе при любом режиме работы поток замкнут внутри магнитопровода, а осевая вибрация также возникает.

Другими словами, во всех рассмотренных случаях основное действие оказывают **внутренние**, а не внешние силы.

Даже в последних работах ведущих специалистов Российской Федерации по этой проблеме [11, 12] продолжается рассмотрение только внешних усилий, действующих на магнитопровод статора. Не удивительно, что и применительно к другим видам крупных электрических машин эта проблема не решалась [13].

Наличный арсенал методов теоретических основ электротехники (ТОЭ) не давал ответа на вопрос о природе появления таких знакопеременных сил, не говоря уже о полном отсутствии подходов к расчету их величины в таких элементах магнитопроводов электрических машин, как, например, ярмо сердечника статора (в простейшем случае — в режиме кольцевого намагничивания).

Детальный анализ показал, что расхожая версия о том, что шум и вибрация магнитопроводов всех видов электрических машин есть продукт явления магнитострикции не выдерживает никакой критики.

В такой обстановке пришлось начинать "ab ovo", подвергнув критическому анализу некоторые основные положения ТОЭ в области энергетических и силовых взаимодействий активных элементов (обмоток, ферромагнетиков) в магнитном поле.

Неоспоримым доказательством существования мощных осевых сил, которые с частотой 100 Гц "раскачивают" узлы концевых зон, послужили результаты измерений напряжений в хвостовиках стержневых призм турбогенератора 320 МВт, выполненные на стенде завода "Электротяжмаш".

Оказалось, что как в режиме холостого хода (ХХ), так и в режиме короткого замыкания (КЗ) на каждый хвостовик действуют силы, достигающие в пике 100 кН (100 Гц), а при номинальной нагрузке — около 200 кН, т.е. того же порядка, что и статические усилия от давления запрессовки.

Впервые на примере решения актуальной практической задачи была убедительно доказана правильность высказанной нами гипотезы [14] о том, что энергия магнитного поля любого типа накапливается не в пространстве, где существует это поле, а в токовых контурах, создающих его. И самое главное — не только в контурах с "макроскопическими", но и с "поверхностными" (молекулярными, амперовыми) токами, влияние кото-

рых до последнего времени игнорировалось в практических расчетах.

На базе теоретических исследований и общеизвестного принципа о взаимосвязи силовых и энергетических процессов разработаны оригинальные методы расчета сил "бокового" распора элементов магнитопроводов. Расчет эпюр осевых давлений (с частотой 100 Гц) для сердечника статора турбогенератора типа ТГВ-320-2П и последующее моделирование деформированного состояния нажимного фланца дали результаты, которые хорошо совпали с данными эксперимента (тензометрирование напряжений в хвостовиках стержневых призм).

Использование новых методов расчета динамических усилий показало, что на концевую зону (крайние пакеты и нажимной фланец) турбогенератора ТВВ-1000-2 действует пара диаметрально приложенных сил порядка 500 кН (50 тонн силы!) при холостом ходе (100 тонн силы при нагрузке) с частотой 100 Гц.

Дальнейший анализ особенностей вибромеханики концевой зоны сердечника статора турбогенератора ТВВ-1000-2 показал, что:

- в первоначальный период эксплуатации после нормальной заводской запрессовки вибромеханика концевой зоны сердечника статора должна находиться в допустимых пределах и обеспечивать требуемую надежность работы машины,

- то же относится и к вибрационному состоянию шин обмотки, закрепленных на фланце.

Дефекты сердечника статора и его обмотки начинают проявляться со временем, в основном, при наступлении субрезонансных вибромеханических явлений вследствие:

- ослабления давления прессовки под действием тех же осевых знакопеременных сил и (или) потери связи сердечника с верхней группой призм (ребер) вследствие "проседания" активной зоны статора под действием силы тяжести,

- ослабления узлов крепления и (или) развития микротрещин в соединительных шинах на фоне ухудшения вибрационного состояния нажимных фланцев (если шины имеют с ним жесткую связь).

Действующие системы мониторинга и диагностики состояния сердечника статора были сформированы без учета отмеченных выше особенностей, вследствие чего они совершенно неэффективны.

Рассматриваемый новый подход к анализу электромеханики шихтованных магнитопроводов электрических машин позволяет решить ряд практических задач в гораздо более широком классе узлов электромеханических преобразова-



телей, чем статора крупных синхронных генераторов.

Дело в том, что тензор внутренних напряжений, возникающий в магнитопроводах всех типов электромеханических преобразователей, является неотъемлемым и прямым следствием самого процесса преобразования энергии и существует во всем без исключения объеме магнитного потока — не только в воздушном зазоре, статоре, но и в роторной части магнитопровода.

Распределение этих сил (давлений) в активной зоне магнитопровода крайне неравномерно — в центральной части доминируют силы радиального (контурного по пути прохождения магнитного потока) тяжения, а в торцевых зонах — силы осевого (поперечного к оси потока) распора. При неизменных геометрических параметрах зоны магнитопровода давление от сил обоих видов пропорционально квадрату среднего значения индукции (по объему зоны), независимо от характера временной зависимости этой индукции. Эти силы возникают как при воздействии постоянного магнитного поля, так и переменного (в диапазоне промышленных частот без задержки во времени). Экранирование этих сил столь же невозможно, как и экранирование гравитационного поля земли.

В общем случае силовая сторона вибромеханики любого узла магнитопровода определяется комплексом воздействия

- внутренних сил в объеме рабочего магнитного потока,
- центробежных сил (для вращающихся узлов),
- поля земного тяготения.

Две первые составляющие в известной степени зависят от режима работы машины.

Анализ вибромеханики рассматриваемого класса узлов электрических машин на стадии разработки осложняется тем существенным обстоятельством, что в отличие от классических проблем динамики твердого тела здесь имеют место нестабильность во времени (в основном, ослабление)

- связей магнитопровода с опорами,
- жесткости его, особенно в направлении поперек шихтовки.

Последнее обстоятельство весьма существенно, так как оно дает возможность уточнить ряд важных моментов в электромеханических процессах таких узлов как шихтованные роторы гидрогенераторов всех типов, асинхронных генераторов и двигателей (не только большой, но и малой мощности, работающих при высоких частотах вращения).

Направления и варианты реализации. В последние годы проблема повышения надежности работы статоров мощных турбо- и гидрогенераторов вышла на первый план не только для машин, отработавших свой расчетный ресурс, но в еще большей степени для тех, которые были модернизированы (реабилитированы) по старым схемам — здесь неприятности начали возникать в пределах гарантийного периода. Неудивительно, что их решение неизменно входит в перечень предпочтительной тематики последних сессий СИГРЭ по техническому комитету А1. С учетом отмеченных моментов оно требует серьезного пересмотра существующей практики расчетов, конструирования, технологии изготовления и сервисного обслуживания турбо- и гидрогенераторов, а в ряде случаев также и других видов крупных электрических машин — асинхронных двигателей, трансформаторов, реакторов и т.п.

Актуальность реализации таких инноваций для заводов — изготовителей до сих пор отходила на второй план вследствие того, что пагубное влияние осевых сил согласно статистике начинает сказываться после истечения срока заводской гарантии — в среднем через 10 лет эксплуатации машины. В отличие от высокоразвитых стран, где по истечении расчетного срока службы (25–30 лет) производится замена основных узлов или всей машины в целом, в развивающихся странах наметилась другая тенденция — продление срока службы еще на 20–30 лет путем малозатратной модернизации ("реабилитации"), для реализации которой конструкция должна обладать должным уровнем ремонтпригодности.

Из наличного арсенала в несколько десятков вариантов классических решений прошлого века ни одно из них не может служить основой для комплексного решения проблемы обеспечения высокого уровня эксплуатационной надежности и ремонтпригодности шихтованных магнитопроводов упомянутых типов электрических машин.

Такое решение может быть получено только путем столь же комплексного внедрения ряда мероприятий, в первую очередь

- введение в практику проектирования расчета внутренних сил в шихтованных магнитопроводах (оценочно — по [10; 14], полевой 3D вариант расчета проходит процедуру патентной защиты),
- использование предыдущих данных для расчетов параметров вибромеханики и их экспериментальной апробации,
- проведение экспертной оценки и совершенствование конструктивных и технологических решений при изготовлении машин в направлении



повышения их вибромеханической устойчивости,
 - разработка нового подхода к контролю и диагностике вибрационного состояния магнитопроводов на всех этапах жизненного цикла электрической машины с переносом центра тяжести на измерение параметров вибрационной активности;

- пересмотр существующих концепций сервисного обслуживания крупных электрических машин как в части выполнения обследования состояния и прогнозирования работоспособности узлов шихтованных магнитопроводов, так и технологии проведения ремонтов, модернизаций и реабилитаций.

Заключение. На основании системного анализа большого объема накопленной информации о дефектах шихтованных магнитопроводов крупных электрических машин, выявленных в процессе их эксплуатации, а также разработанной нами принципиально новой концепции об активной роли ферромагнетика удалось впервые в мировой практике найти ключ к решению проблемы повышения надежности таких магнитопроводов.

В результате удалось установить, что:

- в любом магнитопроводе возникает комплекс внутренних сил того же порядка, что и сила магнитного тяжения в воздушном зазоре вращающейся электрической машины,

- в любой конструкции магнитопровода (даже в ярме тороидального трансформатора) магнитное поле создает трехмерное в пространстве поле внутренних сил, которые локально и (или) в целом по шихтованному участку изменяются во времени по закономерностям, спектр которых в общем случае может включать составляющие различных частот,

- процедура расчетной оценки воздействий этих сил в осевом направлении более сложна, чем в радиальном, вследствие того, что как условия радиального закрепления участков магнитопровода, так и их осевая жесткость нестабильны во времени — они существенно ухудшаются в процессе эксплуатации.

Решение проблемы требует серьезного пересмотра существующей практики расчетов, конструирования, технологии изготовления и сервисного обслуживания турбо- и гидрогенераторов, а в ряде случаев также и других видов крупных электрических машин — асинхронных двигателей, трансформаторов, реакторов и т.п.

Проблема борьбы с вредными последствиями действия сил осевого распора не ограничивается только принятием мер по введению конструктивных усовершенствований — для шихтованных

магнитопроводов машин переменного тока ее решение требует также серьезных инноваций в практике эксплуатации. С учетом того, что эта патология носит "возрастной характер", особое внимание должно быть уделено машинам, работающим за пределами расчетного срока службы.

Реализация описанного в статье нового подхода позволит в 2—3 раза увеличить расчетный срок службы и повысить надежность сердечников статоров крупных синхронных генераторов за счет обеспечения требуемых запасов механической прочности элементов конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Станиславский Л.Я., Гаврилов Л.Г., Остерник Э.С. Вибрационная надежность мощных турбогенераторов — М.: Энергия, 1975.
2. Кузьмин В.В., Шпаченко Т.В., Шпаченко В.С. Статистика ушкоджень вузлів кріплення натискних фланців турбогенераторів серії ТГВ потужністю 200 — 300 МВт //Електроінформ, — 2009. — № 4. — С. 12 — 14.
3. Александров А.Е., Гуцин Е.В. и др. Обнаружение дефектов гидрогенераторов — М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Титов В.В., Хуторецкий Г.М. и др. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. — Л., Энергия, 1967.
5. Голоднова О.С., Ростик Г.В. Анализ и мероприятия по предупреждению повреждений сердечников статоров турбогенераторов/ Сб. Электросила. — 2004. — № 43. — С. 56—64.
6. Бутов А.Б., Мамиконянц Л.Г., Пикульский В.А. и др. Повреждаемость и контроль запеченных концевых пакетов стали сердечников статоров турбогенераторов //Электрические станции. — 2001. — № 5. — С. 41—47.
7. Кузнецов Д.В. и др. Дефекты турбогенераторов и метода их диагностики на начальной стадии //Электрические станции, 2004. — № 8.
8. Вольдек А.И., Данилевич Я.Б. и др. "Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин" — М.: 1983.
9. Кузьмин В.В., Шпаченко В.С. К расчету осевых сил в сердечнике статора турбогенератора (по поводу статьи Ю.Н. Васильковского, Ю.А. Шумилова и А.В. Штогриня Анализ вибровозмущающих осевых сил в сердечнике статора мощного турбогенератора) //Электротехника и электромеханика, — 2010. — № 2.
10. Кузьмин В.В., Шофул А.К., Шпаченко В.С. Вибромеханика статоров мощных синхронных генераторов при кольцевом намагничивании // "Электротехника и электромеханика", 2008, № 3.
11. Иогансен В.И. Исследование и разработка методов расчёта и конструирования основных узлов высокоиспользованных турбогенераторов: Дис. на соискание ученой степени доктора технических наук. — С.- Петербург, 2003.
12. Кузнецов Д.В. Развитие методов исследования процессов в узлах крепления сердечников статоров к корпусам турбогенераторов и совершенствование их диагностики в условиях эксплуатации: Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук — М., 2009.
13. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.
14. Кузьмин В.В., Шпаченко В.С. К разрешению парадоксов, порожденных ошибочной концепцией о локализации потенциальной энергии в электромагнитном поле //Вісник КДУ імені М.Остроградського. — 2010 Вип. 4/(63). Ч.3. — С. 90 — 93.