

**В.И. МИЛЫХ**, д-р техн. наук, проф., зав. каф., НТУ "ХПИ", Харьков  
**В.С. ШПАТЕНКО**, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков

## **ОСОБЕННОСТИ СИЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В МАГНИТОПРОВОДАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Розглянуті характерні особливості силових процесів в шихтованих магнітопроводах, що викликають шум, вібрацію та пошкодження елементів конструкції потужних електричних машин.

Рассмотрены характерные особенности силовых процессов в шихтованных магнитопроводах, вызывающие шум, вибрацию и повреждение элементов конструкции крупных электрических машин.

**Введение.** Известно, что в процессе работы электрических машин и аппаратов особенно в агрегатах большой единичной мощности возникают шумы и вибрации [1], которые часто выходят за допустимые пределы и ведут к отказам в эксплуатации.

В последние годы вследствие старения оборудования в сердечниках статоров мощных турбо- и гидрогенераторов участилось появление и развитие серьезных дефектов, ведущих к резкому снижению показателей надежности и срока службы этих машин [2, 3].

Перечень основных дефектов сводится к излому стальных листов сердечников (наиболее часто – в зубцовой зоне), повреждению изоляционных покрытий этих листов, самоотвинчиванию и обрыву крепежа нажимных фланцев, сопутствующему повреждению прилегающих к сердечнику элементов конструкции статора – обмотки, элементов ее крепления, водяных коллекторов и т.д.

Выкрашивание отдельных листов активной стали пакетов отмечается при несвоевременном выявлении и устранении дефектов на ранних стадиях их развития. В отличие от турбогенераторов с незапеченными крайними пакетами разрушение происходит без распушения всего зубца и характеризуется сравнительно быстрым распространением вглубь зубцовой зоны сердечника.

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.

**Цель работы** – рассмотреть особенности силовых процессов в шихтованных магнитопроводах, вызывающих значительные повреждения статоров мощных электрических машин.

**Основные материалы исследования.** Характер вышеприведенных дефектов 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.

Одна из немногих попыток рассчитать осевые силы, действующие на зубцы крайних пакетов сердечника статора содержится в [5], но как показано в [6], 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 намагничивания" никаких полей рассеяния нет, а осевая вибрация возбуждается [7],

– 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.

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

На примере решения актуальной практической задачи была убедительно доказана правильность высказанной в [8] гипотезы 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 которых 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.

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. Также практически не исследованы силы в крайних пакетах и элементах крепежей торцевых частей, которые возникают из-за вихревых токов, наведенных в них переменным магнитным полем [9].

**Выводы.** 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 шихтованного 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.

– 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.

**Список литературы:** 1. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин – Л.: Энергоатомиздат, 1986. 2. Голоднова О.С., Ростик Г.В. Анализ и мероприятия по предупреждению поврежденных сердечников статоров турбогенераторов // В сб.: "Электросила". – СПб: Электросила. – 2004. – № 43. – С. 56-64. 3. Александров А.Е., Гуцин Е.В. и др. Обнаружение дефектов гидро-

генераторов – М.: Энергоатомиздат, 1985. **4.** *Титов В.В., Хуторецкий Г.М.* и др. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. – Л.: Энергия, 1967. **5.** *Вольдек А.И., Данилевич Я.Б.* и др. Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин. – М.: 1983. **6.** *Кузьмин В.В., Шпатенко В.С.* К расчету осевых сил в сердечнике статора турбогенератора (по поводу статьи Ю.Н. Васьяковского, Ю.А. Шумилова и А.В. Штогрин "Анализ вибровозмущающих осевых сил в сердечнике статора мощного турбогенератора") // Электротехника и электромеханика. – 2010. – № 2. – С. 13-15. **7.** *Кузьмин В.В., Шофул А.К., Шпатенко В.С.* Вибромеханика статоров мощных синхронных генераторов при кольцевом намагничивании // Электротехника и электромеханика. – 2008. – № 3. – С. 33-36. **8.** *Кузьмин В.В., Шпатенко В.С.* К разрешению парадоксов, порожденных ошибочной концепцией о локализации потенциальной энергии в электромагнитном поле // Вісник КДУ ім. М. Остроградського. – Вип. 4/2010 (63). – Ч. 3. – С. 90-93. **9.** *Милых В.И., Дубинина О.Н.* Расчет вихревых токов и потерь мощности в сегментах крайнего пакета статора турбогенератора // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – №1. – С. 44-48.



**Міліх Володимир Іванович**, професор, доктор технічних наук. Захистив диплом інженера, дисертації кандидата і доктора технічних наук в Харківському політехнічному інституті за фахом електричні машини і апарати, відповідно в 1972, 1978 та 1996 рр. Завідувач кафедру "Електричні машини" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з 2004 р. Наукові інтереси пов'язані з дослідження електромагнітних параметрів та процесів в електричних машинах різних типів.



**Шпатенко Віктор Сергійович**, аспірант. Захистив диплом магістра в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" в 2010 р. Наукові інтереси пов'язані з дослідженням електромагнітних та силових процесів в потужних синхронних генераторах.

*Поступила в редколлегию 13.12.2010  
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.*