

## К РАСЧЕТУ ОСЕВЫХ СИЛ В СЕРДЕЧНИКЕ СТАТОРА МОЩНОГО ДВУХПОЛЮСНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА

(комментарии к статье Ю.Н. Васьковского, Ю.А. Шумилова и А.В. Штогринина "Анализ вибровозмущающих осевых сил в сердечнике статора мощного турбогенератора" (Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 2))

*У статті доведено, що розрахунки осевих сил в осерді статора турбогенератора за методою магнітних натягів дають результати, що суперечать даним експерименту як якісно, так і кількісно.*

*В статті показано, що розрахунки осевих сил в сердечнике статора турбогенератора по методу магнитных натяжений дают результаты, которые противоречат данным эксперимента как качественно, так и количественно.*

### ВВЕДЕНИЕ

В попытке "обойти" теоретические подходы к расчету осевых сил в мощных турбогенераторах, которые изложены в [1] и не только качественно, но и количественно апробированы данными экспериментов и опытом эксплуатации, авторы допускают ряд принципиальных ошибок, сводящих на нет практическую ценность "второй гипотезы".

### НЕДОСТАТКИ "АЛЬТЕРНАТИВНОГО" ПОДХОДА

1. Первые симптомы схоластики проявляются уже на стадии постановки задачи исследований – у турбогенераторов ТВВ-1000-2 шпильки никогда не обрывались (материал – Ст. 45), такие явления наблюдались на некоторых генераторах серии ТГВ мощностью 200 и 300 МВт. На большинстве генераторов всех заводов отмечался срыв контртовки (и последующее отвинчивание) стяжных гаек, но всегда только в верхнем секторе. Здесь ни "старая", ни "новая" теория усталостной прочности ни при чем.

Накопленный в последние десятилетия опыт свидетельствует о том, что сердечник статора мощного двухполюсного турбогенератора – отнюдь не статический "узел, служащий для крепления обмотки и проведения магнитного потока" (Ч. Конкордия), а сложная многоэлементная конструкция активного типа, подверженная действию комплекса сил различной природы, влияние которых на работоспособность машины может быть учтено на базе накопленного арсенала классических подходов [1, 6].

2. Заключение о том, что для разрушения шпилек "суммарная амплитуда действующих на статор ТВВ-1000-2 осевых вибровозмущающих сил ... может быть оценена в 51,4 тс; оценка среднего давления (на две стороны) на поверхности крайних пакетов дает значение 51,8 кПа" ничем не обосновано.

Во-первых, на каждую "сторону" статора действует пара коллинеарных сил, т.е. четыре силы с амплитудой 2 А, равной 12,85 тс – по "новой" теории усталостной прочности, 10,68 тс – по расчету авторов якобы достаточных для инициирования ненаблюдаемого явления – обрыва хвостовиков шпилек в ТВВ-1000-2.

При этом следует отметить, что авторам известны результаты наших расчетов (по "первой гипотезе"),

которые дают намного большую величину этой амплитуды – около 100 тс (см. приложение). Причем последнее значение найдено на базе экспериментальных данных, о чем речь пойдет ниже.

Во-вторых, для того, чтобы получить среднее значение магнитного тяжения на поверхности концевой пакета 57,8 кПа необходимо, чтобы "среднее" же значение осевой составляющей индукции находилось на уровне 0,38 Тл (согласно (5) в приложении). Это может быть только в случае, если через оба торца (перпендикулярно поверхности крайних пакетов) в статор входит около 15 % рабочего магнитного потока (3,8 Вб), что – явный абсурд.

3. В чем же причина фиаско, которое потерпела предложенная авторами альтернативная гипотеза? Их несколько.

Во-первых, при выполнении полевых расчетов концевой зоны ТВВ-1000-2 принята неадекватная область – как по самой геометрии скоса концевых пакетов, так и в части полного отсутствия экранов. Несмотря на конструктивное разнообразие экранов (медный под или над фланцем, магнитный шунт) все они эффективно подавляют потоки рассеяния [3-5].

В приложении приведены опытные данные по распределению осевых составляющих индукции в районе крайнего листа концевой пакета турбогенератора ТГВ-200-2М, а на их базе – расчет амплитуды осевой силы по методу магнитных натяжений. Результат – 0,4 тс для ТГВ-200-2М, 0,6 тс для ТГВ-320-2П. По последней машине были проведены уникальные эксперименты по измерению 100-герцовых напряжений в шпильках. На их основе была найдена оценка той же силы 70 тс (т.е. в 100 раз больше).

Во-вторых, в дискуссиях с авторами мы неоднократно указывали на то, что метод магнитных натяжений (ММН) [2] имеет ограниченную область применения – он пригоден только для расчета сил, действующих на ферромагнетик во внешнем магнитном поле, т.е. для пассивного тела, каким сердечник статора является лишь в режиме холостого хода; во всех остальных режимах (короткое замыкание, нагрузка) он активен.

Но эксперименты четко показывают, что в режи-

ме холостого хода полей рассеяния в торцевой зоне практически нет, а осевые силы есть и вызывают такую же вибрацию, как и при коротком замыкании.

Более того:

- при испытаниях статоров турбо- и гидрогенераторов в режиме "кольцевого намагничивания" никаких полей рассеяния нет, а осевая вибрация возбуждается [6];

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

Другими словами, во всех рассмотренных случаях основное действие оказывают внутренние, а не внешние силы. В попытке доказать обратное авторы идут на ряд искажений картины физических процессов. Более подробно эффективность рассматриваемых методов расчета осевых сил оценена в приложении.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Результаты экспериментального определения осевых составляющих индукции на поверхности крайнего пакета статора турбогенератора ТГВ-200-2М в нагрузочных режимах приведены в табл. 1.

Таблица 1

Осевые компоненты индукции ( $B_{zm}$ ) на поверхности первого листа концевого пакета (лист С1 по [4])

Расположение датчика	В зоне зубца			В ярме сердечника		
	у коронки	посередине	у ножки			
Радиус центра датчика, м	0,67	0,738	0,806	0,82	0,86	0,96
Индукция $B_{zm}$ , Тл						
- в зоне 1	0,58	0,26	0,12	0,10	0,07	0,03
- в зоне 2	0,37	0,18	0,11			
- в зоне 3	0,22	0,14	0,10			

Примечание. Два прореза зубца разделены на три зоны: 1 – набегающий край, 2 – середина, 3 – сбегающий край.

Закономерности изменения амплитуды индукции по радиусу хорошо описываются следующими аналитическими соотношениями

$$B_{zm1} = 0,0189 \cdot R^{-8,56} \text{ для зоны 1; } \quad (1)$$

$$B_{zm2} = 0,0265R^{-6,59} \text{ для зоны 2; } \quad (2)$$

$$B_{zm3} = 0,0396R^{-4,29} \text{ для зоны 3; } \quad (3)$$

$$B_{zma} = 0,0218R^{-7,71} \text{ для ярма. } \quad (4)$$

Параметры геометрии торца сердечника статора: число пазов  $Z_1 = 30$ , радиус расточки  $R_1 = 0,6375$  м, радиус по дну паза  $R_n = 0,82$  м, наружный радиус ярма  $R_a = 1,215$  м, ширина зубца: в зонах 1 и 3 –  $b_1 = b_3 = 0,063 \cdot R - 0,0195$ ; в зоне 2 –  $b_2 = 0,084 \cdot R - 0,026$ .

Согласно формуле (9.7), приведенной в [3], верхняя граница нормальной составляющей силы осевого тяжения составляет (при пренебрежении касательны-

ми составляющими поля)

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot \int_S \mu_0 \cdot H_z^2 \cdot dS = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot \int_S B_z^2 \cdot dS. \quad (5)$$

Расчет компонентов этой силы в рассматриваемом случае необходимо вести отдельно по зубцовой зоне и ярму сердечника:

- в первом случае:

$$F_{zi} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \sum_{n=0}^{14} \sin^2(6^\circ + n \cdot 12^\circ) \int_{R_1}^{R_n} B_{zmi}^2 \cdot b_i \cdot dR, \quad (6)$$

- во втором:

$$F_{za} = \frac{1}{2 \mu_0} \int_0^\pi \sin^2 \varphi d\varphi \int_{R_n}^{R_a} B_{zma}^2 \cdot R \cdot dR. \quad (7)$$

В обоих случаях учитывается синусоидальная форма волны индукции в воздушном зазоре. Данные расчета осевых сил по (6) и (7) приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Компоненты осевых сил

Участок	Зубцы			Ярмо	Всего на одну сторону
	Зона 1	Зона 2	Зона 3		
Сила $F_z$ , Н	2140	1252	391	317	2×4100

Доля потоков рассеяния, которая проникает через торцы сердечника статора, определяется как:

$$\begin{aligned} \Phi_\sigma &= 2 \cdot (\Phi_{z1} + \Phi_{z2} + \Phi_{z3} + \Phi_{za}) = \\ &= 2 \sum_{n=0}^{14} \sin^2(6^\circ + n \cdot 12^\circ) \cdot \int_{R_1}^{R_n} (B_{zmi}^2 \cdot b_1 + B_{zmi}^2 \cdot b_2 \times \\ &\times b_2 + B_{zmi}^2 \cdot b_3) \cdot dR + 2 \cdot \int_0^\pi \sin^2 \varphi d\varphi \int_{R_n}^{R_a} B_{zma}^2 \cdot R \cdot dR. \end{aligned} \quad (8)$$

Вычисления по последней формуле дают значения  $\Phi_\sigma$  на уровне  $0,075 \cdot B_\delta$ , что составляет около 1,5 % от рабочего потока в этом генераторе ( $5,07 \cdot B_\delta$ ), т.е. традиционную для современных турбогенераторов величину.

"Среднее" давление на торец при этом составляет

$$\sigma_{cp} = \frac{\sum F \times 2}{S_T} = \frac{4100 \cdot 2}{3,07} = 2,67 \text{ кПа.}$$

Величина его в значительной степени определяется уровнем индукции в зазоре  $B_\delta$

$$\sigma_{cp} = k \cdot B_\delta^2. \quad (9)$$

При рабочей величине  $B_\delta = 0,809$  Тл значение  $k$  для ТГВ-200-2М составляет  $4,08 \text{ кПа} / \text{Тл}^2$ . На этой основе можно дать следующий прогноз по величине усилий магнитного тяжения в турбогенераторах ТГВ-320-2П и ТВВ-1000-2 (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение величины возмущающих осевых сил  
в турбогенераторах различных типов

Параметр	ТГВ-200-2М	ТГВ-320-2П	ТВВ-1000-2
Индукция в зазоре ( $B_\delta$ ), Тл	0,809	0,94	1,08
Площадь торца, ( $S_T$ ), м <sup>2</sup>	3,07	3,07	4,90
Среднее напряжение по ММН $\sigma_{ср}$ , кПа	2,67	3,60	4,76
Осевое усилие на половину торца по ММН, кН	4,1	5,5	11,7
То же по данным тензометрии [5], кН	–	700	–
То же согласно расчету по [1], кН	–	670	1000

Примечания:

1. Компоненты  $F_z$  в зубцовой зоне и в ярме: - коллинеарные по ММН; - ортогональны по методу [1].
2. Генераторы ТГВ-200-2М и ТГВ-320-2П имеют одинаковую геометрию поперечного сечения активной зоны.

### ВЫВОДЫ

Использование метода магнитных натяжений для расчета осевых вибровозмущающих сил в сердечниках статоров крупных турбогенераторов дает результаты, которые и количественно и качественно противоречат экспериментальным данным. Коренная причина здесь заключается в том, что эти осевые усилия возникают в результате воздействия основного, рабочего магнитного потока, а отнюдь не потока рассеяния в торцевых зонах сердечника.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидюк Б.М., Кузьмин В.В., Шпатенко В.С. О разработке физически содержательного подхода к анализу силовых и энергетических процессов в элементах магнитопроводов электрических машин // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – Випуск 3/2007 (44) Част. 1. – С. 51-55.

2. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: "Наука", 1976.
3. Вольдек А.И., Данилевич Я.Б. и др. Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин. – М., 1983.
4. Экспериментальные исследования магнитного поля, вихревых токов и нагрева в крайних пакетах статора АСТГ-200 (Бурштынская ГРЭС), ТГВ-200-2М (Приморская ГРЭС и Хабаровская ТЭЦ): Отчет о НИР (этап 0508) / Институт электродинамики АН УССР. – Киев, 1986. – 82 с.
5. Методика и результаты исследования механических напряжений в сердечниках статоров турбогенераторов ТГВ-320-2, ТГВ-325-2, ТХ129-2372, отчет ГП завод "Электротяжмаш", Харьков, 2004.
6. Кузьмин В.В., Шофул А.К., Шпатенко В.С. Вибромеханика статоров мощных синхронных генераторов при кольцевом намагничивании // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 3.

Поступила 30.01.2010

Кузьмин Виктор Владимирович, д.т.н., проф.  
Украинская инженерно-педагогическая академия,  
кафедра электроэнергетики  
Украина, 61140, Харьков, пр. Гагарина, 92, кв. 43  
тел. (057) 7379337, e-mail: t.spat@rambler.ru

Шпатенко Виктор Сергеевич  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61140, Харьков, пр. Гагарина, 92, кв. 143  
тел. (057) 7379403, e-mail: t.spat@rambler.ru

*V.V. Kuzmin, V.S. Shpatenko*

#### **On axial forces calculation in a large two-pole turbogenerator stator core.**

The article proves that calculations of axial forces in a turbogenerator stator core via a magnetic tension method give results that conflict with experimental data both qualitatively and quantitatively.

**Key words – turbogenerator, stator, axial forces, calculation methods.**