

Исследование зависимости радиальной вибрации сердечника статора двухполюсного турбогенератора от тока статора и коэффициента мощности¹

ГРИГОРЬЕВ А.В.

Рассмотрены причины и характер зависимости радиальной вибрации сердечника статора двухполюсного турбогенератора от тока статора и коэффициента мощности. Выведены приближённые математические соотношения, которые позволяют предвидеть и объяснять изменения вибрации статора турбогенератора при изменениях эксплуатационной нагрузки.

Ключевые слова: турбогенератор, сердечник статора, электромагнитные силы, вибрация

Постановка задачи. Основная причина вибрации статора двухполюсного турбогенератора — переменная радиальная деформация сердечника статора под действием вращающегося магнитного поля. В двухполюсном турбогенераторе основной магнитный поток пронизывает сердечник статора и ротор в радиальном направлении, в результате действия электромагнитных сил кольцевое поперечное сечение сердечника статора приобретает форму эллипса. Уровень вибрации сердечника определяется соотношением действующих на него радиальных сил и упруговязких свойств сердечника в составе конструкции статора.

В процессе эксплуатации уровень вибрации статора турбогенератора меняется. Причины следующие: с одной стороны, — это зависимость электромагнитных сил, деформирующих сердечник, от текущего режима работы турбогенератора, с другой, — естественное, с течением времени, изменение свойств механической системы статора, основным силовым узлом которой является шихтованный сердечник. Основным же механическим качеством сердечника, которое в значительной степени предопределяет эксплуатационную надёжность статора, является усилие сжатия сердечника, заданное ему при изготовлении. Изменение в ходе эксплуатации усилия сжатия сердечника ведёт к изменению его вибромеханических свойств и, естественно, отражается на параметрах вибрации как самого сердечника, так и статора в целом. На этом основании параметры вибрации могут использоваться

Factors causing the dependence of radial vibration arising in the stator core of a two-pole turbine generator from the stator current and power factor and the pattern of this dependence are considered. Approximate mathematical correlations are derived using which it is possible to predict and explain changes of turbine generator vibration when changes occur in the operating load.

Key words: turbine generator, stator core, electromagnetic forces, vibration

для контроля и оценки изменений, происходящих в механической системе конструкции статора.

Однако хорошо известное [1—3] влияние параметров режима работы турбогенератора на вибрацию статора является обстоятельством, которое существенно затрудняет указанное использование вибрационных параметров. Простой путь преодоления этого затруднения — регистрация вибрационных сигналов при соблюдении условия идентичности функциональных параметров турбогенератора. Но в эксплуатационной практике это трудно выполнимо, так как связано с крайне нежелательным вмешательством в диспетчерский график эксплуатационных нагрузок. Представляет интерес возможность приведения значений вибрации, зарегистрированных в произвольных текущих режимах работы турбогенератора, к заданному базовому режиму с помощью их соответствующей коррекции, учитывающей отклонения фактических параметров работы турбогенератора от их значений в базовом режиме, обеспечив таким образом их корректное сопоставление. Такая возможность позволяет регистрировать вибрационные сигналы без вмешательства в производственный процесс и с их помощью выявить признаки изменения механических свойств конструкции статора. Поэтому возникли потребности исследования влияния функциональных параметров турбогенератора на вибрацию статора и разработки приемлемого для инженерной практики алгоритма приведения вибрации статора, измеренной при текущих функциональных параметрах, к вибрации с выбранными базовыми функциональными параметрами.

Радиальные силы, действующие на сердечник статора. В известной работе проф. А.В. Иванова-

¹ Автор посвящает статью памяти проф. Ф.Б. Быкадорова.

Смоленского [4] показано, что полная радиальная сила, действующая на сердечник статора электрической машины, складывается из сил магнитного тяжения и сил, действующих на проводники с током в пазах сердечника, и что силы, действующие на проводники с током в пазах сердечника, являются компонентом, ослабляющим полную радиальную силу. Если условиться для удобства дальнейшего изложения называть силы магнитного тяжения магнитными, а силы, действующие на проводники с током в пазах сердечника, электродинамическими, то можно резюмировать, что радиальные магнитные силы стремятся сжимать кольцевое поперечное сечение сердечника, а электродинамические такому сжатию противодействуют.

Сила магнитного тяжения. Из теории электрических машин известно, что результирующий магнитный поток синхронной электрической машины складывается из магнитных потоков возбуждения и реакции якоря. Количественное значение потока реакции якоря и его угловое положение относительно потока возбуждения зависят от значений тока статора и коэффициента мощности машины. Кроме того, значения рассматриваемых магнитных потоков обуславливаются уровнем напряжения на выводах статора.

На рис. 1 представлена диаграмма напряжений синхронного генератора, иллюстрирующая связь её электромагнитных параметров.

Из диаграммы следует, что результирующий магнитный поток электрической машины, обусловленный результирующей МДС F_d и возбуждающий ЭДС E_d , связан с уровнем напряжения U и падением напряжения Ix_s . При неизменном или мало изменяющемся напряжении на выводах статора, что характерно для практики эксплуатации турбогенераторов, результирующий магнитный поток, необходимый для поддержания заданного уровня напряжения, зависит в основном от Ix_s . В свою очередь, размер и положение этого вектора при постоянном значении индуктивного сопротивления рассеяния x_s определяются током статора и углом j между векторами U и I .

Для любого произвольного режима работы машины, в том числе для номинального или какого-либо другого, выбранного за базовый, ЭДС E_d может быть рассчитана через параметры U , I , $\cos j$, x_s . В свою очередь, ЭДС E_d пропорциональна силе результирующего магнитного потока машины, поэтому соотношение значений E_d произвольного и базового режимов покажет относительное изменение силы результирующего магнитного потока и, следовательно, сжимающей сердечник магнитной силы.

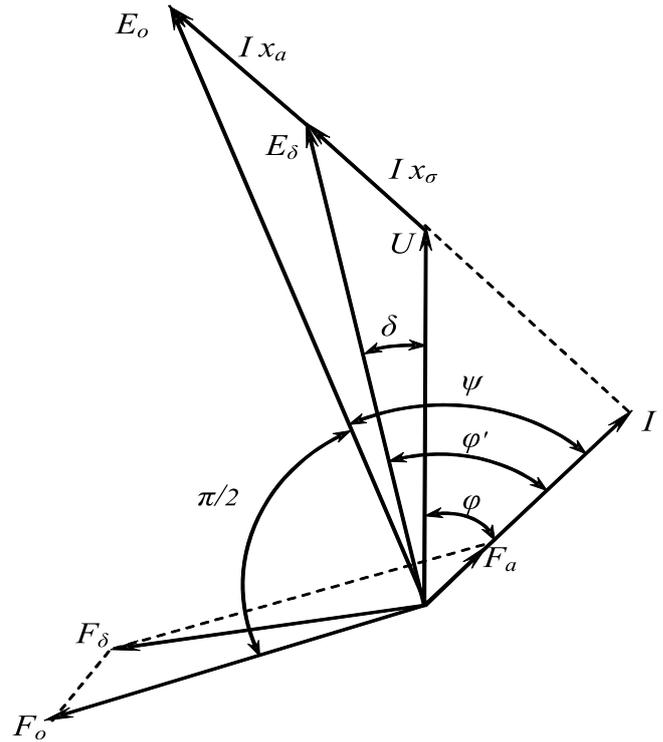


Рис. 1. Диаграмма напряжений синхронного генератора: F_o , F_a , F_d – МДС возбуждения, реакции якоря и результирующая; E_o , E_d – ЭДС, создаваемые МДС возбуждения и результирующей МДС; U – напряжение на выводах генератора; I – ток статора; Ix_a – падение напряжения на индуктивном сопротивлении якоря; Ix_s – падение напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния

Применительно к турбогенератору ТГВ-500 для неизменного, равного номинальному, напряжения на выводах статора ($U = U_H = 1$) были рассчитаны реальные соотношения ЭДС E_d при различных соотношениях значений тока статора и коэффициента мощности ($\cos j$) электрической машины и ЭДС E_H при номинальных токе статора и $\cos j$. Расчёт выполнен по формуле

$$A_d^* = U \sqrt{\cos^2 j + (\sin j + I^* x_s)^2},$$

где $x_s = 0,218$.

Расчеты показали, что сила результирующего магнитного поля в зависимости от параметров режима при неизменном напряжении на выводах может изменяться в пределах от 0,88 до 1,08 номинального значения. Однако известно, что сила магнитного тяжения пропорциональна квадрату магнитной индукции. Это значит, что радиальное усилие, сжимающее кольцо сердечника, будет изменяться в пределах от 0,78 до 1,17 от усилия, действующего при номинальных токе статора и $\cos j$. Таким образом, в зависимости от параметров режима работы турбогенератора интервал изменения силы магнитного тяжения ограничен значениями от -22 до $+17\%$ номинального значения.

Взаимодействие магнитной и электродинамических сил. Известно [4, 5], что мгновенные значения

радиальных электродинамических сил, действующих на проводники с током в пазах статора, пропорциональны квадрату мгновенных значений токов, протекающих через эти проводники, и что эти силы всегда направлены в сторону сердечника. Известно также, что сила магнитного потока — магнитная индукция — распределена вдоль воздушного зазора машины по синусоидальному закону. Очевидно, сжимающая поперечное сечение сердечника статора суммарная магнитная сила будет действовать в таком случае по оси, проходящей через максимальные значения волны результирующего магнитного потока. Токи в пазах статора также распределены вдоль окружности статора приблизительно по синусоидальному закону, которым в теории принято моделировать фактически ступенчатое распределение тока по пазам или группам пазов обмотки статора. Электродинамические силы, препятствующие радиальному сжатию сердечника магнитными силами, распределены по пазам сердечника пропорционально значению квадрата тока в каждом пазу.

В общем случае синусоидально распределенные вдоль воздушного зазора значения магнитной индукции и токов в пазах сердечника смещены относительно друг друга по окружности статора. Поэтому и результирующие магнитные и электродинамические силы оказываются смещёнными таким же образом (действуют в разных радиальных направлениях). Наиболее доступно и привычно такое смещение в определённой мере выражает коэффициент мощности машины.

Геометрическим сложением магнитной и интегрированных по группам пазов электродинамических сил образуется некая результирующая сила, которая будет находиться в определённой зависимости от параметров режима работы машины. При этом характер зависимости от параметров режима каждой из этих сил (магнитной и электродинамической) будет различным.

Из соотношений [4] следует, что основной деформирующей сердечник силой является магнитная радиальная сила, действие которой в той или иной мере ослабляется противодействием электродинамических сил. Степень ослабления определяется значениями токов в пазах сердечника и коэффициентом мощности машины.

Соотношение магнитной и электродинамической радиальных сил. Причиной возникновения электродинамической силы является взаимодействие проводников с токами, расположенных в пазах статора, с магнитным потоком рассеяния обмотки статора. Понятно, что сила, действующая на проводники с током, будет определяться как значениями токов в проводниках, так и значением магнит-

ной индукции потока рассеяния. Оценить соотношение магнитных индукций потока рассеяния и реакции якоря можно по параметрам x_s и x_a . Объясняется это следующим образом. Известно, что ЭДС рассеяния $E_s = Ix_s$ создаётся магнитным потоком рассеяния в отличие от ЭДС реакции якоря $E_{ad} = Ix_a$, которая создаётся потоком реакции якоря. Эти две ЭДС наводятся в одних и тех же проводниках, но разными магнитными потоками, созданными одним и тем же током I . Разница в значениях ЭДС объясняется лишь различными индукциями этих потоков.

На векторных диаграммах напряжений (рис. 1) эти ЭДС моделируются падениями напряжений Ix_s и Ix_{ad} . Следовательно, отношение x_s / x_{ad} фактически отражает соотношение магнитных индукций потоков рассеяния и реакции якоря. Магнитная напряжённость и, соответственно, магнитная индукция этих потоков обусловлены разными путями их замыкания. ЭДС реакции якоря и ЭДС рассеяния в обоих случаях — это суммы ЭДС, созданных всеми витками фазы обмотки. И если известно соотношение ЭДС реакции якоря и рассеяния, то таким же будет и соотношение индукций этих двух потоков.

Для отечественных турбогенераторов мощностью 100, 500 МВт отношение x_s / x_a находится в пределах от 0,067 до 0,126. Если для ориентировочной оценки воспользоваться усреднённым значением 0,1, то силовое воздействие на проводники, лежащие в пазах статора и взаимодействующие с потоком рассеяния, можно ориентировочно оценить исходя из индукции магнитного потока рассеяния всего лишь в 0,1 от индукции потока реакции якоря. В свою очередь, поток реакции якоря является лишь частью результирующего (суммарного) магнитного потока, создаваемого потоками возбуждения и потоком реакции якоря. Именно этот суммарный поток является причиной действия сжимающей сердечник радиальной силы, пропорциональной квадрату его магнитной индукции. В таком случае соотношение радиальных сил, обуславливаемых результирующим магнитным потоком и потоком рассеяния, определится соотношением значений индукций этих потоков.

Однако, если радиальное усилие на сердечник, зависящее от результирующего магнитного потока, является общим и обуславливается суммарной МДС возбуждения и реакции якоря, то радиальные усилия на сердечник от проводников с токами в его пазах создаются отдельно в каждом пазу статора и зависят от тока в пазу в конкретный момент времени. Для выяснения соотношения и взаимодействия магнитной и электродинамической радиальных сил необходимо прежде всего определиться

с главными направлениями их приложения. Выше было отмечено, что основной деформирующей сердечник силой является магнитная радиальная сила, которая сжимает сердечник статора по оси результирующего магнитного потока. Это обстоятельство даёт основание считать эту ось основным направлением радиальной деформации сердечника и далее как дополнительное рассматривать влияние электродинамических сил на основное усилие, действующее по этой оси. Назовём её продольной осью результирующего магнитного потока. Влияние электродинамических радиальных сил, действующих в пазах статора, учтём путём их разложения на составляющие, действующие по продольной оси результирующего магнитного потока и по оси, ей перпендикулярной. Ось, перпендикулярную продольной оси, назовём поперечной.

Поскольку токи в пазах статора являются пульсирующими с частотой вращения результирующего магнитного поля, пульсирующими будут и электродинамические силы, действующие в пазах статора. В каждый момент времени синхронно с изменением положения результирующего магнитного поля относительно статора будут изменяться и электродинамические силы в его пазах. Кроме того, расклад сил по пазам статора будет зависеть и от угла отставания вектора тока статора от напряжения, т.е. от $\cos \delta$ генератора. В связи с этим возникла необходимость исследовать зависимость мгновенного распределения пазовых электродинамических сил от коэффициента мощности генератора и положения вращающегося результирующего магнитного потока относительно обмотки статора.

Такая задача была решена путём громоздких геометрических построений на упрощённой модели статора турбогенератора и несложных подсчётов сумм проекций электродинамических сил на продольную и поперечную оси результирующего магнитного потока. В качестве прообраза упрощённой модели выбран статор турбогенератора типа ТГВ-500 с двухслойной трёхфазной обмоткой, уложенной в 48 пазов (по 8 на фазу и полюс) и соединённой по схеме двойной звезды. Удобной особенностью такой обмотки явилось то, что её фазные группы смещены относительно друг друга по окружности статора ровно на половину. Это обстоятельство позволило разделить результирующий магнитный поток по окружности статора на 14 условных секторов (10 с углом охвата в 4 паза и 4 с углом охвата в 2 паза) и затем путём последовательных поворотов поля на угол 30° (каждым поворотом охватывается как раз половина пазов фазной группы статорной обмотки) рассматривать группы пазов в каждом из выделенных секторов магнитного поля как укрупнённый единичный элемент ста-

тора с обособленными мгновенными параметрами действующей на статор электродинамической силы. Детально методика определения распределения по окружности статора электродинамических сил не приводится из-за ограниченности объёма статьи.

Методика перехода от радиальных сил к радиальной вибрации. Переход от радиальных сил, деформирующих сердечник, к его радиальной вибрации осуществлён через значения радиальных деформаций сердечника с учетом представления, что размах радиальной вибрации сердечника DS есть полусумма максимального приращения $d_{уд}$ удлинившегося диаметра кольца и максимального укорочения $d_{ук}$ диаметра кольца, подвергшегося сжатию (рис. 2):

$$DS = 0,5(d_{уд} + |d_{ук}|). \quad (1)$$

В таком случае резонно применить известные математические формулы расчёта деформаций кольца по двум взаимно перпендикулярным диаметрам под действием сосредоточенных сил [6].

Деформация тонкого кругового кольца по продольному диаметру (вдоль действующих на растяжение двух противоположно направленных радиальных сил) подсчитывается по формуле:

$$d_{прод} = 0,149 \frac{Pr^2}{EJ_z}, \quad (2)$$

где P – сила, растягивающая кольцо; r – средний радиус сечения кольца; E – модуль упругости материала кольца; J_z – центральный момент инерции поперечного сечения кольца.

Увеличение продольного диаметра (по которому действует растягивающая сила) сопровождается уменьшением поперечного диаметра (перпендикулярного продольному), которое подсчитывается по формуле²:

$$d_{поп} = 0,137 \frac{Pr^2}{EJ_z}. \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) дают возможность оценивать радиальные деформации кольцевого сечения сердечника от действия сосредоточенных сил по двум взаимно перпендикулярным диаметрам и радиальную вибрацию сердечника. В расчёте используем взаимно перпендикулярные диаметры сердечника, ориентированные по названным выше продольной

² Использование приведённых формул при характерном для статоров соотношении среднего радиуса спинки сердечника к высоте спинки 1,5/1 позволяет рассчитать деформации сердечника с погрешностью 6,7% [6]. Это вполне приемлемо, учитывая, что в рассматриваемом применении важны не абсолютные значения деформаций, а их соотношения.

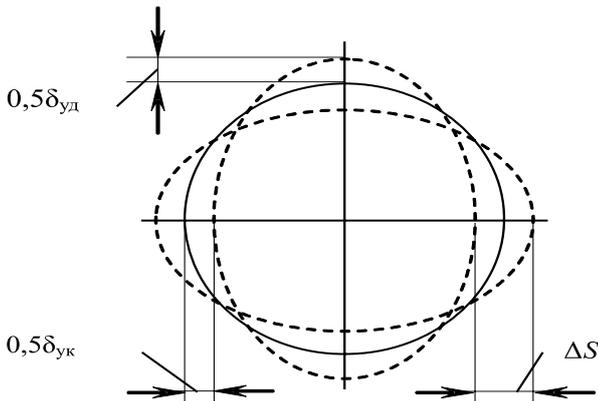


Рис. 2. Выражение радиальной вибрации DS кольца через полусумму его радиальных деформаций

и поперечной осям волны результирующего магнитного потока генератора. По этим диаметрам будут максимальные деформации сжатия и растяжения под действием результирующего магнитного потока. Влияние же радиальных электродинамических сил, действующих в пазах статора, учтём путём их проецирования на эти диаметры. Суммы проекций всех действующих на сердечник радиальных электродинамических сил образуют две пары сосредоточенных сил, растягивающих кольцевое сечение сердечника.

Влияние радиальных электродинамических сил на деформацию и вибрацию сердечника. На рис. 3 показаны зависимости продольной $F_{пр}$ и поперечной $F_{поп}$ составляющих электродинамических сил от $\cos j$ генератора, полученные в результате расчётов. Значения составляющих сил представлены в долях амплитуды тока статора, принятой за единицу (число пазов в условных секторах и параллельность ветвей обмотки не учитывались).

Распределение электродинамических сил по пазам статора при различных значениях $\cos j$ показало, что суммы их проекций на продольную и поперечную оси волны результирующего магнитного потока остаются практически постоянными (с точностью до 5%, что может быть отнесено к погрешности расчёта) при разных угловых положениях вращающегося результирующего магнитного поля относительно неподвижного статора.

Из полученных зависимостей следует, что продольная составляющая с уменьшением $\cos j$ уменьшается более чем в два раза, а поперечная увеличивается в такой же пропорции. Было проверено влияние тангенциальных сил, действующих на проводники с током в пазах статора, на суммарные электродинамические силы по продольной и поперечной осям результирующего магнитного потока. Расчёты показали, что они значимы лишь при работе генератора со значениями $\cos j$, равными или

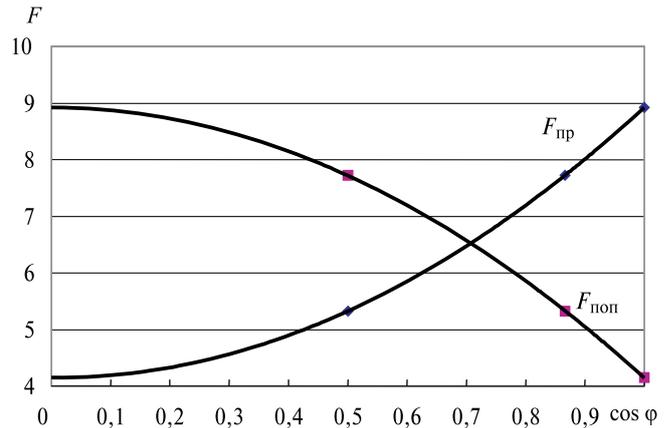


Рис. 3. Зависимости продольной и поперечной электродинамических сил от коэффициента мощности

близкими нулю. При $\cos j = 0,866$ эти силы на два порядка меньше радиальных электродинамических сил, а при $\cos j = 0,5$ – на порядок, поэтому в настоящих расчетах их влияние можно не учитывать.

На рис. 3 силы $F_{пр}$ и $F_{поп}$ выражены относительно амплитуды тока, принятой за единицу. Фактическое же значение силы, действующей на проводник с током в пазу, в общем виде выразится формулой:

$$F_i = ki^2 = k(\sqrt{2}I \cos \omega t)^2, \tag{4}$$

где k – коэффициент пропорциональности; I – действующее значение тока в пазу статора; ω – круговая частота.

Показанные на рисунке зависимости с достоверностью $R^2=1$ аппроксимируются полиномами второй степени:

$$F_{пр} f(\cos j) = 4,8487(\cos j)^2 - 0,0725 \cos j + 4,1498; \tag{5}$$

$$F_{поп} f(\cos j) = -4,7423(\cos j)^2 - 0,04 \cos j + 8,926. \tag{6}$$

Силы $F_{пр}$ и $F_{поп}$ одинаково пропорциональны квадрату тока, но, как следует из рис. 3, по-разному зависят от $\cos j$. Это является важнейшим обстоятельством, которое предопределяет влияние $\cos j$ на периодическую деформацию и, следовательно, на вибрацию сердечника.

Основываясь на (4) и используя зависимости (5) и (6), выразим действующие на сердечник продольную и поперечную силы следующим образом:

$$F_{пр} = ki^2 F_{пр} f(\cos j) = k(\sqrt{2}I \cos \omega t)^2 F_{пр} f(\cos j); \tag{7}$$

$$F_{поп} = ki^2 F_{поп} f(\cos j) = k(\sqrt{2}I \cos \omega t)^2 F_{поп} f(\cos j). \tag{8}$$

Установленная расчётом практическая независимость значений рассматриваемых электродинамических сил в координатах вращающегося маг-

нитного потока от его углового положения относительно неподвижного статора позволяет упростить (7) и (8), исключив из них множитель $(\cos \omega t)^2$, которым выражается пульсирующий характер электродинамической силы в отдельно взятом пазу статора. Объединив в (7) и (8) постоянные величины и исключив из них множитель $(\cos \omega t)^2$, получим:

$$F_{\text{пр}} = K_{\Gamma} I^2 F_{\text{пр}} f(\cos j); \quad (9)$$

$$F_{\text{поп}} = K_{\Gamma} I^2 F_{\text{поп}} f(\cos j), \quad (10)$$

где K_{Γ} – коэффициент пропорциональности, учитывающий влияние на электродинамическую силу геометрии паза статора конкретной электрической машины; I – действующее значение переменного тока.

Действующие по продольной и поперечной осям магнитного потока растягивающие сердечник электродинамические силы будут вызывать деформацию растяжения по диаметру действия и одновременно деформацию сжатия по перпендикулярному диаметру. Складывая алгебраически деформации растяжения и сжатия по двум взаимно перпендикулярным диаметрам, получим результирующие деформации сечения сердечника по каждому диаметру.

Выразим деформацию сердечника по продольной оси $d_{\text{прS}}$, суммируя деформации $d_{\text{пр1}}$ и $d_{\text{пр2}}$ от совместного действия электродинамических сил соответственно по продольной и поперечной осям:

$$d_{\text{прS}} = d_{\text{пр1}}(F_{\text{пр}}) - d_{\text{пр2}}(F_{\text{поп}}).$$

Используя (2), (3), (9), (10) и выполнив преобразования, получаем:

$$d_{\text{прS}} = [0,149 F_{\text{пр}} f(\cos j) - 0,137 F_{\text{поп}} f(\cos j)] \frac{K_{\Gamma} I^2 r^2}{E J_z}. \quad (11)$$

Аналогично для деформации по поперечной оси:

$$d_{\text{попS}} = d_{\text{поп1}}(F_{\text{поп}}) - d_{\text{поп2}}(F_{\text{пр}})$$

или с учетом (1), (2), (8) и (9)

$$d_{\text{попS}} = [0,149 F_{\text{поп}} f(\cos j) - 0,137 F_{\text{пр}} f(\cos j)] \frac{K_{\Gamma} I^2 r^2}{E J_z}. \quad (12)$$

Общий множитель $r^2 / E J_z$ в (11) и (12) включает неизменные для конкретной машины постоянные, отражающие механические свойства конструкции, поэтому обозначим его общим коэффициентом K_M .

С учетом (5) и (6) получим:

при $\cos j = 0$

$$F_{\text{пр}} f(\cos j) = 4,1498 \gg 4,15; \quad F_{\text{поп}} f(\cos j) = 8,926 \gg 8,93;$$

при $\cos j = 1$

$$F_{\text{пр}} f(\cos j) = 8,926 \gg 8,93; \quad F_{\text{поп}} f(\cos j) = 4,1437 \gg 4,144.$$

Относительные значения деформаций сердечника по продольной и поперечной осям результирующего магнитного поля составляют:

при $\cos j = 0$

$$d_{\text{прS}} = -0,60 K_{\Gamma} K_M I^2; \quad d_{\text{попS}} = 0,76 K_{\Gamma} K_M I^2;$$

при $\cos j = 1$

$$d_{\text{прS}} = 0,76 K_{\Gamma} K_M I^2; \quad d_{\text{попS}} = -0,60 K_{\Gamma} K_M I^2.$$

Знак «минус» соответствует деформации сжатия, «плюс» – растяжению.

Полученные выражения показывают, что радиальная деформация сердечника от действия электродинамических сил при работе турбогенератора с $\cos j = 0$ и 1 практически одна и та же. Различие лишь в том, что при $\cos j = 1$ суммарный эффект от их действия выражается в растяжении кольца сердечника по продольной оси результирующего магнитного потока, а при $\cos j = 0$ – по поперечной. На рис. 4 показаны расчетные зависимости относительных (в долях амплитудного значения тока статора) деформаций сердечника по продольной и поперечной осям результирующего магнитного потока от значений $\cos j$.

Зависимости на рис. 4 с достоверностью $R^2 = 1$ аппроксимируются полиномами второй степени:

$$d_{\text{пр}} = 1,3721 \cos j^2 - 0,0053 \cos j - 0,6045; \quad (13)$$

$$d_{\text{поп}} = -1,3708 \cos j^2 + 0,0039 \cos j + 0,7614 \quad (14)$$

и пересекаются в точке со значением $\cos j = 0,707$, которое соответствует углу отставания тока статора от напряжения на 45° .

Действующая на сердечник статора радиальная магнитная сила сжимает его по продольной оси магнитного потока, вызывая удлинение поперечной оси, поэтому при работе генератора с $\cos j$ в диапазоне от 0 до 0,707 электродинамические силы усугубляют деформацию сердечника. В этом случае противодействующая сжатию электродинамическая сила по продольной оси имеет минимальное значение, а способствующая сжатию продольной оси и действующая по поперечной оси в направлении её растяжения электродинамическая сила максимальна. В диапазоне $\cos j$ от 0,707 до 1 электродинамические силы ослабляют деформацию сердечника от действия магнитной силы. В этом случае соотношение электродинамических сил по продольной и поперечной осям становится противоположным

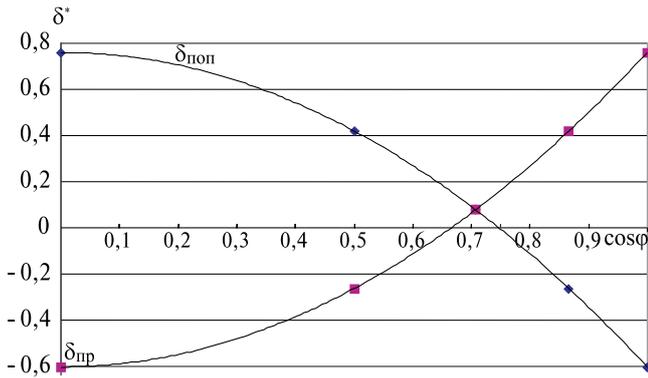


Рис. 4. Зависимости от $\cos j$ продольной и поперечной деформаций сердечника от действия электродинамических сил

тому, которое было при $\cos j$ в диапазоне от 0 до 0,707. При работе с $\cos j = 0,707$ электродинамические силы, равные по обеим осям, не влияют на соотношение деформаций по продольной и поперечной осям сердечника, которое обуславливается только действием магнитной силы.

Совместное влияние на радиальную вибрацию сердечника магнитных и электродинамических сил. Основываясь на сделанных выше рассуждениях, оценим суммарное влияние на вибрацию сердечника рассматриваемых сил в зависимости от параметров работы генератора.

Из теории известно, что действующая на сердечник радиальная сила, вызываемая основным магнитным потоком, пропорциональна квадрату его магнитной индукции. Известно также, что ЭДС, возбуждаемая в обмотке переменным магнитным потоком, пропорциональна его магнитной индукции. В рассматриваемом случае (рис. 1) такой ЭДС будет E_d , рассчитав которую, оценим относительное значение магнитной индукции результирующего магнитного поля. Далее, основываясь на том, что сжимающая сердечник магнитная сила пропорциональна квадрату магнитной индукции, а радиальная деформация сердечника — сжимающей его силе, можем в (2) и (3) заменить силу P на $(E_d^*)^2$ и получить относительные значения деформаций сердечника по продольной и поперечной осям результирующего магнитного потока:

$$d_{\text{м.пр}}^* = -0,149(E_d^*)^2; \quad d_{\text{м.поп}}^* = -0,137(E_d^*)^2.$$

Далее, по (13) и (14) определим относительные деформации сердечника по тем же осям результирующего магнитного потока, для чего необходимо учесть условия и допущения, при которых эти соотношения были получены.

Соотношения (13) и (14) выведены для относительного значения радиальной силы, пропорциональной квадрату принятого за единицу амплитуд-

ного значения тока в проводниках двухслойной обмотки статора. В случае же двухслойной обмотки статора, имеющей две параллельные ветви в фазе, и принятия за единицу действующего значения номинального тока статора амплитудное значение тока в проводниках каждого слоя будет в два раза меньше. При переходе от амплитудного значения тока к действующему справедливо соотношение $I_m = \sqrt{2}I$ и $I_n^2 = 2I^2$. В связи с этим в выражения сил и деформаций по (9), (10) и (13), (14) для двухслойной обмотки необходимо ввести коэффициент 0,5 (2/4). Кроме того, в принятой модели статора силы рассчитывались по условным секторам обмотки, каждый из которых учитывался как единственный силовой элемент с одним мгновенным значением тока (число пазов в секторе не учитывалось). В действительности, как уже отмечалось, электродинамические силы возникают и действуют в каждом пазу статора. Поэтому на практике при применении указанных соотношений необходимо учесть число пазов, приходящихся на один силовой сектор. В рассматриваемом случае их было 4, поэтому в (9), (10), (13), (14) нужно дополнительно подставить коэффициент 4.

При исследовании распределения моментальных сил по выделенным секторам статора было принято упрощающее допущение, что векторы U и E_d совпадают по направлению. Это позволило использовать значение угла j для расчёта проекций мгновенных радиальных сил на продольную и поперечную оси результирующего магнитного поля. В действительности же положение оси результирующего магнитного поля расходится с вектором U на угол $d + p/2$ (рис. 1), а её положение относительно вектора тока I может быть выражено углом $j \neq p/2$ (рис. 1). Такое допущение, конечно, внесло определённую погрешность в выведенные $d_{\text{пр}}$ и $d_{\text{поп}}$ от $\cos j$, однако не помешало выявить принципиальную сторону этих зависимостей. В каких-либо конкретных случаях погрешность может быть частично компенсирована заменой в (13) и (14) угла j на $j \neq$

В таблице представлены значения угла d для различных значений токов статора и $\cos j$ при $U = U_n = 1$ и $x_s^* = 0,218$.

Из вышеприведённых рассуждений следует пропорциональность составляющих ЭДС обмотки значениям соответствующих индукций, т.е. $E_d \propto B_d$, а $E_s \propto B_s$. Сжимающая сердечник радиальная сила пропорциональна квадрату магнитной индукции, а сила, действующая на проводник с током, пропорциональна магнитной индукции в первой степени. Следовательно, соотношение индукций или ЭДС выразит относительную долю радиальной силы в пазу статора при любом текущем значении тока

статора. Эту долю удобно выразить в виде относительного значения ЭДС рассеяния $E_S^* = E_S / E_d$.

Очевидно, значение E_S^* является своеобразным коэффициентом, выражающим соотношение действующих на сердечник радиальных сил, возбуждаемых результирующим магнитным потоком и токами в пазах статора, и соответствующих этим силам деформаций сердечника.

Запишем выражения для относительных деформаций сердечника статора по продольной и поперечной осям результирующего магнитного потока, вызываемых радиальными силами в пазах статора, применительно к допущениям, принятым при выводе ориентировочных зависимостей (13) и (14):

$$d_{\text{пр.эл}}^* = n_{\text{паз}} E_S^* (1,3721 \cos j \varphi^2 - 0,0053 \cos j \varphi - 0,6045) (\sqrt{2} I^* / a)^2; \quad (15)$$

$$d_{\text{поп.эл}}^* = n_{\text{паз}} E_S^* (-1,3708 \cos j \varphi^2 + 0,0039 \cos j \varphi + 0,7614) (\sqrt{2} I^* / a)^2, \quad (16)$$

где $n_{\text{паз}}$ — число пазов в условном единичном силовом секторе статора; a — число параллельных ветвей в фазе обмотки статора;

$$j \varphi = \arctg(\sin j + I^* x_S^* / U^*) / \cos j, \text{ град,}$$

или после введения фактических числовых значений, обусловленных условиями вывода зависимостей (13) и (14):

$$d_{\text{пр.эл}}^* = 2 E_S^* (1,3721 \cos j \varphi^2 - 0,0053 \cos j \varphi - 0,6045) I^{*2};$$

$$d_{\text{поп.эл}}^* = 2 E_S^* (-1,3708 \cos j \varphi^2 + 0,0039 \cos j \varphi + 0,7614) I^{*2}.$$

Таким образом, деформации сердечника от совместного действия сжимающей силы результирующего магнитного потока и радиальных сил в пазах статора выразятся как

$$D_{\text{пр}}^* = d_{\text{м.пр}}^* + d_{\text{пр.эл}}^*;$$

$$D_{\text{поп}}^* = d_{\text{м.поп}}^* + d_{\text{поп.эл}}^*$$

или в развёрнутом виде

$$D_{\text{пр}}^* = -0,149 (E_d^*)^2 + n_{\text{паз}} E_S^* (1,3721 \cos j \varphi^2 - 0,0053 \cos j \varphi - 0,6045) (\sqrt{2} I^* / a)^2; \quad (17)$$

$$D_{\text{поп}}^* = 0,137 (E_d^*)^2 + n_{\text{паз}} E_S^* (-1,3708 \cos j \varphi^2 + 0,0039 \cos j \varphi + 0,7614) (\sqrt{2} I^* / a)^2. \quad (18)$$

Радиальная вибрация сердечника статора двухполюсной синхронной машины под действием на сердечник электромагнитных сил обуславливается эллипсообразной деформацией по окружности сердечника. Численное значение такой вибрации в размерности виброперемещения будет равно сумме модулей односторонних с противоположными знаками деформаций сердечника по двум осям, из которых одна максимально растягивающая, другая максимально сжимающая. Размах радиальных колебаний поверхности сердечника выражается формулой (1), проиллюстрированной рис. 2. Однако из

cos j	Угол d (град) при относительных значениях I										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,10	0,00	0,12	0,24	0,35	0,46	0,56	0,66	0,76	0,85	0,94	1,03
0,20	0,00	0,24	0,48	0,70	0,92	1,13	1,33	1,52	1,71	1,89	2,06
0,30	0,00	0,37	0,72	1,06	1,38	1,70	2,00	2,29	2,57	2,84	3,10
0,40	0,00	0,49	0,96	1,41	1,85	2,27	2,67	3,07	3,44	3,81	4,16
0,50	0,00	0,61	1,20	1,77	2,32	2,85	3,36	3,86	4,33	4,79	5,24
0,60	0,00	0,74	1,45	2,14	2,80	3,44	4,06	4,66	5,25	5,81	6,36
0,65	0,00	0,80	1,57	2,32	3,04	3,74	4,42	5,08	5,72	6,33	6,93
0,70	0,00	0,86	1,70	2,50	3,29	4,05	4,79	5,50	6,20	6,87	7,52
0,75	0,00	0,92	1,82	2,69	3,54	4,36	5,16	5,93	6,69	7,42	8,13
0,80	0,00	0,99	1,95	2,88	3,79	4,68	5,54	6,38	7,20	7,99	8,77
0,85	0,00	1,05	2,07	3,08	4,05	5,01	5,94	6,85	7,73	8,60	9,44
0,90	0,00	1,11	2,21	3,28	4,32	5,35	6,35	7,34	8,30	9,24	10,16
0,95	0,00	1,18	2,34	3,48	4,61	5,72	6,81	7,88	8,93	9,96	10,97
1,00	0,00	1,25	2,50	3,74	4,98	6,22	7,45	8,68	9,89	11,10	12,30

Примечание: $d = \arctg[(\sin j + I^* x_S^* / U^*) / \cos j] - \arccos j$, град; выделены номинальные значения параметров.

рис. 4 следует, что при действии растягивающих сердечник сил по двум взаимно перпендикулярным осям имеют место случаи, когда деформации по обеим осям имеют одно и то же направление (записываются с одинаковыми математическими знаками). В таком случае для выражения размаха колебаний целесообразно применить более универсальную формулу, которая применительно к выраженным выше итоговым деформациям будет иметь вид:

$$DS^* = 0,5 \left| D_{пр}^* - D_{поп}^* \right|. \quad (19)$$

Зависимость относительных значений радиальной вибрации сердечника от тока статора и коэффициента мощности генератора, рассчитанная по (17)–(19) для турбогенератора ТГВ-500 с учетом ориентировочных зависимостей (13) и (14), отражающих радиальную деформацию сердечника от действия электродинамических радиальных сил в пазах статора, показала, что уровень радиальной вибрации статора при малых токах статора слабо зависит от коэффициента мощности. Однако при номинальном и близких к номинальному значениях тока эта зависимость велика, и уровень вибрации сильно возрастает при низких значениях коэффициента мощности. Наименьшие уровни вибрации получаются при $\cos j = 1$ и токе статора, равном $0,8I_N$, и при номинальном токе статора и $\cos j = 0,9$.

Сопоставление с результатами измерений. На рис. 5, а и б представлены корреляционные зависимости фактически зарегистрированных значений параметров вибрации в различных эксплуатационных режимах турбогенераторов и относительных значений, рассчитанных по (17)–(19) для этих же режимов.

Использованы данные измерений вибрации статоров турбогенераторов, полученные на предприятии «Свердловэлектроремонт». Фактические измерения сделаны, к сожалению, путём регистрации вибрации лишь поверхности корпуса статора, а не собственно сердечника; при этом текущие электрические параметры генераторов регистрировались последовательно, а не синхронно с регистрацией

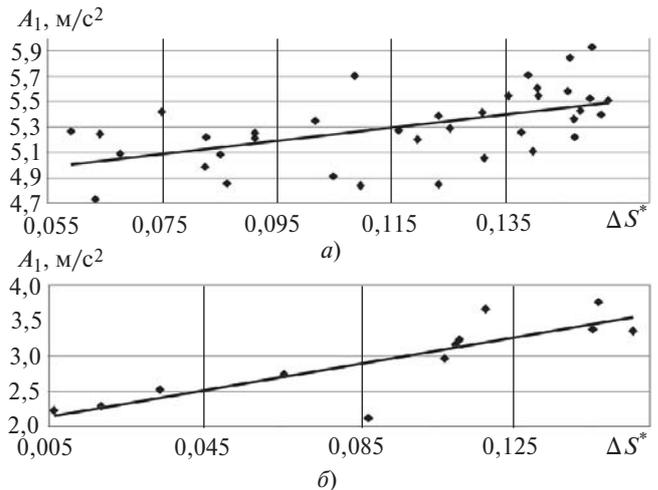


Рис. 5. Корреляционная зависимость расчётных и зарегистрированных параметров вибрации на статоре турбогенератора ТВФ-120-2

вибрации. Эти обстоятельства, конечно, снижают результативность сопоставления, тем не менее факт корреляции очевиден, и это лишь при приближённо выведенных зависимостях (13) и (14).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Детинко Ф.М., Шубов И.Г. Влияние нагрузки на вибрации статоров двухполюсных турбогенераторов. — Сб. «Электросила», 1970, № 28.
2. Мазин Э.М. Вибрация статора насыщенного турбогенератора при различных режимах его работы. — Сб. «Электросила», 1976, № 31.
3. Перчанок Б.Х., Руденко В.И. Вибрация сердечника турбогенератора. — Сб. «Электросила», 1976, № 31.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. — М.: Высшая школа, 1989.
5. Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В., Аванесов М.А., Хуан Море Оучи. Электромагнитные силы, действующие на элементы магнитного сердечника и провода с токами в области паза электрической машины. — Электричество, 1995, №11.
6. Тимошенко С.П. Сопrotивление материалов, т.1. — М.: Наука, 1965.

[16.02.10]

Автор: Григорьев Анатолий Владимирович окончил в 1962 г. электромеханический факультет Новочеркасского политехнического института по специальности «Электрические машины и аппараты». Ведущий инженер ОАО «Свердловэлектроремонт», Екатеринбург.