

Влияние параметров рабочего режима на вибрацию статора турбогенератора

ГРИГОРЬЕВ А.В.

Рассмотрены физические причины и объяснен характер зависимости радиальной вибрации сердечника статора двухполюсного турбогенератора от параметров рабочего режима турбогенератора. Выведена формула зависимости вибрации статора от указанных параметров. Формула позволяет предвидеть и объяснять изменения вибрации статора при изменениях эксплуатационной нагрузки турбогенератора. По расчетной формуле коэффициентов вибрационного отклика статора можно оценивать физически оправданные изменения вибрации статора при изменении параметров рабочей нагрузки турбогенераторов и при необходимости, например в диагностических интересах корректно сопоставлять уровни вибрации в различающихся рабочих режимах и делать предположения о вероятном изменении свойств механической системы статора. Представлены данные экспериментальной проверки состоятельности полученной формулы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: турбогенератор, сердечник статора, электромагнитные силы, вибрация

Цель публикуемой статьи, дополняющей и развивающей ранее опубликованную автором работу [1], – доходчиво с разъяснением физического смысла раскрыть сущность зависимости вибрации статора от параметров режима работы турбогенератора.

Специалистам известно, что регистрируемая на статоре турбогенератора вибрация зависит от параметров режима работы турбогенератора, однако нет достаточно ясного представления, отчего и как это происходит и как эту зависимость можно оценивать количественно.

Вибрация, как известно, есть отклик механической конструкции на возмущающие её динамические нагрузки, есть результат взаимодействия возмущающих конструкцию сил и собственно конструкции, наделённой определёнными механическими свойствами.

Понятно, что если механические свойства конструкции остаются неизменными, то при изменении возмущающих сил изменится и вибрационный отклик. Если же возбуждающие вибрацию силы остаются неизменными и при этом существенно изменяется вибрация, то такое обстоятельство даёт основание предполагать изменение механических свойств вибрирующей конструкции. Второе, в частности, представляет интерес как возможность по изменению вибрационного отклика конструкции выявлять и отслеживать степень утраты конструкцией исходных механических свойств.

Как известно, одной из существенных физических причин вибрации статора турбогенератора является переменная радиальная деформация сердеч-

ника статора, побуждаемая в общем к силовому действию на сердечник вращающимся рабочим магнитным полем. Состав и взаимодействие электромагнитных сил, вызывающих радиальную деформацию сердечника статора турбогенератора, представленных ранее в [1], и характер зависимо-

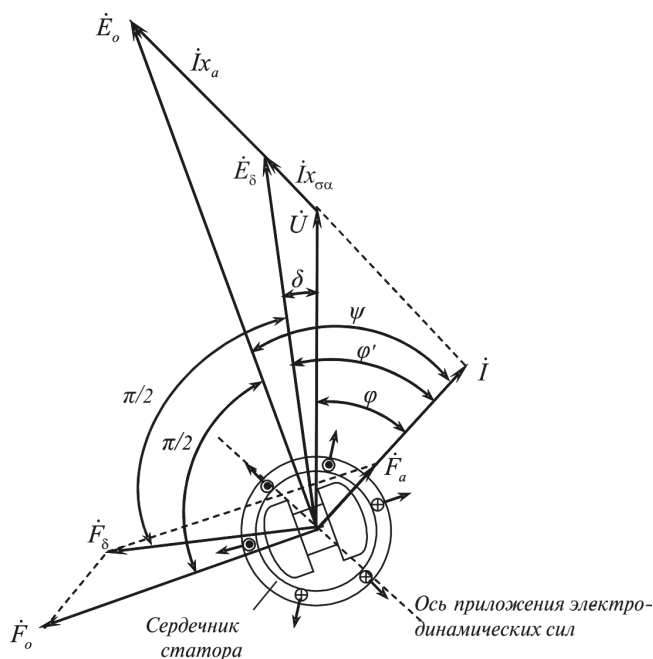


Рис. 1. Диаграмма напряжений синхронного генератора: F_o , F_a , F_δ – МДС возбуждения, реакции якоря и результирующая; E_o , E_δ – ЭДС, создаваемые МДС возбуждения F_o и результирующей МДС F_δ ; U – напряжение на выводах генератора; I – ток статора; $I x_a$ – падение напряжения на индуктивном сопротивлении якоря; $I x_{\sigma a}$ – падение напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния

сти их от параметров рабочего режима турбогенератора рассмотрим детально на диаграмме электромагнитных параметров турбогенератора (рис. 1).

Сердечник статора работающего турбогенератора претерпевает динамическую упругую радиальную деформацию суммарным действием результирующего рабочего магнитного потока, создаваемого МДС F_δ , который сжимает кольцо сердечника вдоль вектора F_δ , и электродинамических сил, действующих на электрические проводники в пазах сердечника статора, которые, напротив, растягивают кольцо сердечника. Генеральное направление сосредоточенного суммарного приложения к сердечнику статора электродинамических сил, действующих в пазах сердечника статора, — по оси, перпендикулярной вектору МДС реакции якоря F_a (рис. 1).

Реальное распределение электродинамических сил по пазам сердечника статора, полученное расчётным путём для режима номинальной нагрузки турбогенератора, показано на рис. 2 [2].

Сложением магнитных и электродинамических сил, соответственно сжимающих и растягивающих кольцо сердечника, определяется упругая радиальная деформация сердечника, которая синхронно с вращающимся магнитным полем перемещается вдоль кольца сердечника статора.

Из диаграммы электромагнитных параметров (рис. 1) следует, что суммарное магнитное поле турбогенератора, создаваемое МДС F_δ , складывается из поля возбуждения от МДС F_o и поля реакции якоря от МДС F_a . Результат их сложения зависит от угла между векторами F_o и F_a .

Согласно теореме косинусов

$$F_\delta = \sqrt{F_o^2 + F_a^2 - 2F_oF_a \cos\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right)}. \quad (1)$$

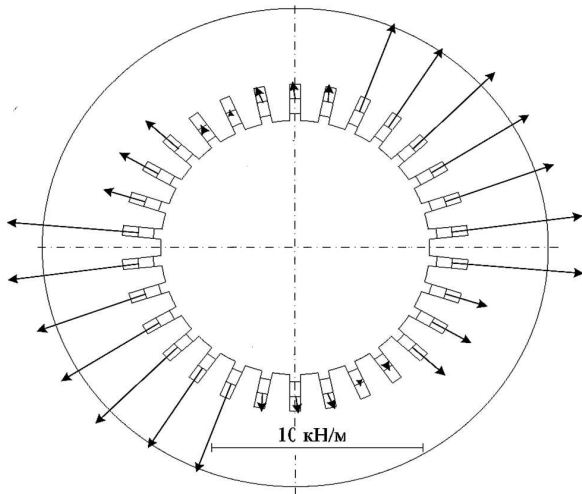


Рис. 2. Распределение электродинамических усилий по пазам сердечника статора в режиме номинальной нагрузки

Угол ψ (в град) с учетом соотношений диаграммы рис. 1 выражается формулой

$$\psi = \arctg\left\{\frac{\sin \varphi + I^* (x_a^* + x_{oa}^*)}{U^*} / \cos \varphi\right\}, \text{ град.} \quad (2)$$

Радиальная магнитная сила, сжимающая кольцевой сердечник статора вдоль оси результирующего магнитного потока, созданного МДС F_δ , согласно теории электротехники, будет пропорциональна квадрату магнитной индукции в воздушном зазоре электрической машины:

$$F_{RM} = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0}, \quad (3)$$

где F_{RM} — радиальная магнитная сила; B_δ — магнитная индукция в воздушном зазоре; μ_0 — магнитная проницаемость воздушного зазора, $4\pi 10^{-7}$ Гн/м.

Поскольку магнитная индукция пропорциональна току, её создающему, то соответствующая ей сила магнитного тяжения согласно (3) оказывается пропорциональной квадрату тока, возбуждающему магнитную индукцию. Магнитная индукция в воздушном зазоре турбогенератора создаётся совместным действием электрического тока возбуждения обмотки ротора и тока нагрузки обмотки статора. Индукция от каждого из этих токов пропорциональна их значениям. Электродинамические радиальные силы, действующие на токи в пазах сердечника статора и в отличие от магнитных сил растягивающие кольцевое сечение сердечника, пропорциональны значению квадрата тока в каждом пазу:

$$F_{эл.д} = BI = \mu_0 HI = \mu_0 \frac{I}{l} I = \mu_0 \frac{I^2}{l} = K_{эл.д} I^2,$$

где $F_{эл.д}$ — электродинамическая сила, действующая на проводник с током; B — магнитная индукция в зоне проводника; I — ток в проводнике пазы; H — напряжённость электрического поля; l — длина магнитной силовой линии; $K_{эл.д}$ — коэффициент пропорциональности.

Зная, что МДС и соответствующие им магнитные индукции одинаково пропорциональны электрическим токам, их создающим, используем выражение (1), отражающее зависимость результирующей МДС в воздушном зазоре турбогенератора от МДС обмоток ротора и статора, для записи выражения относительного значения результирующей индукции в воздушном зазоре через относительные значения токов ротора и статора:

$$H_{\delta}^* = \sqrt{I_o^{*2} + I_a^{*2} - 2I_o^* I_a^* \cos\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right)}. \quad (4)$$

Сопоставляя (3) и (4), видим, что в сущности сжимающая сердечник статора радиальная магнитная сила пропорциональна квадрату токов ротора и статора. Коэффициент пропорциональности выражается формулой

$$K_{RM} = I_o^{*2} + I_a^{*2} - 2I_o^* I_a^* \cos\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right), \quad (5)$$

разумеется, при известном эквивалентном соотношении токов ротора и статора.

Растягивающие сердечник статора электродинамические силы, пропорциональные, как известно из теории электротехники, квадрату мгновенных значений токов в пазах статора, пространственно жёстко связаны с вектором МДС F_a . В виде сосредоточенной суммарной силы они действуют по оси, перпендикулярной вектору МДС F_a . Угол между осью сосредоточения растягивающих сердечник электродинамических сил и сжимающей сердечник магнитной силы, как следует из диаграммы рис. 1, равен: $\varphi_{м-эл} = \varphi' + 90^\circ - 90^\circ = \varphi'$.

Проекция усилия от сосредоточенных электродинамических сил на направление действия магнитной силы определится путём умножения электродинамической силы, сосредоточенной по оси своего действия, на косинус угла между направлениями этих сил, т.е. на $\cos\varphi'$. Коэффициент пропорциональности в этом случае

$$K_{эл.д} = I_a^{*2} \cos\varphi'.$$

Угол φ' (в град) с учетом соотношений диаграммы рис. 1

$$\varphi' = \arctg(\sin\varphi + I^* x_{\sigma a}^* / U^*) \cos\varphi.$$

Учитывая представление [1] о том, что электродинамические силы, действующие на токоведущие части в пазах статора, являются следствием взаимодействия электрических токов в проводниках пазов и магнитного потока рассеяния в пазовой части статора и что индукция потока рассеяния в пазовой части статора соотносится с индукцией магнитного потока реакции якоря как $x_{\sigma a} / x_a$, введем это отношение в формулу для коэффициента пропорциональности

$$K_{эл.д} = \frac{x_{\sigma a}}{x_a} I_a^{*2} \cos\varphi'.$$

Однако, поскольку генеральное направление сосредоточенной электродинамической силы, действующей на растяжение сердечника, не совпадает

с направлением сжимающей сердечник магнитной силы, она наряду с направлением оси магнитной силы с равным правом проецируется и на направление, перпендикулярное оси магнитной силы. Растягивающее усилие в направлении, перпендикулярном оси магнитной силы, компенсирует частично или полностью действие электродинамической силы по оси магнитной силы. Полная компенсация наступит, когда эти силы по взаимно перпендикулярным направлениям оказываются равными. Такое происходит, когда $\cos\varphi'$ оказывается равным 45° . Это обстоятельство учитывается вычитанием из относительного значения силы, спроецированной на ось магнитной силы, значения силы, спроецированной на перпендикулярное оси магнитной силы направление. Получим выражение

$$K_{эл.д} = \frac{x_{\sigma a}}{x_a} I_a^{*2} (\cos\varphi' - \cos(90 - \varphi')). \quad (6)$$

Знание того, что магнитное и электродинамическое усилия действуют на сердечник статора в противоположных направлениях и обе пропорциональны квадратам токов статора и ротора, позволяет составить формулу зависимости деформирующей сердечник радиальной силы от параметров рабочего режима турбогенератора, а именно, от тока статора, тока ротора и коэффициента мощности. Формулу зависимости деформирующей сердечник радиальной силы в виде своеобразного коэффициента пропорциональности определённой совокупности относительных значений указанных параметров получим путём вычитания $K_{эл.д}$ (6) из K_{RM} (5). Итоговый коэффициент обозначим $K_{вибр}$ и назовём коэффициентом вибрационного отклика статора на параметры рабочего режима:

$$K_{вибр} = K_{RM} - K_{эл.д} = \left(I_o^{*2} + I_a^{*2} - 2I_o^* I_a^* \cos\left(\frac{\pi}{2} - \psi\right) \right) - \frac{x_{\sigma a}}{x_a} I_a^{*2} (\cos\varphi' - \cos(90 - \varphi')). \quad (7)$$

Проверим полученное соотношение на заслуживающих доверия опытных данных, полученных на турбогенераторе типа ТВВ-320-2 в течение небольших между измерениями промежутков времени. Результаты дают основание с большой вероятностью считать, что механическая система статора за этот период времени не могла претерпеть существенных изменений (табл. 1).

В табл. 2 представлены относительные значения параметров опытных режимов и рассчитанные по (7) значения $K_{вибр}$.

Значения параметров, использованных при расчёте относительных значений и $K_{вибр}$:

Таблица 1

Период измерения, мин	Нагрузка		U_c , кВ	I_c , кА			U_p , В	I_p , кА	$\cos\varphi$	φ , град	Вибрация на корпусе статора, мм/с		
	акт., МВт	реакт., МВАр		A	B	C					$V_{\text{общ}}$	50 Гц	100 Гц
0	301	40	18,6	9,3	9,4	9,5	290	2,1	0,994	6,3	1,6	0,58	1,0
5	301	60	18,65	9,4	9,5	9,6	300	2,2	0,981	11,2	1,69	0,6	1,14
10	301	80	18,98	9,5	9,5	9,6	330	2,3	0,964	15,5	1,76	0,57	1,25
35	301	130	19,4	10	10,1	10,2	380	2,6	0,887	27,5	2,0	0,63	1,49
45	301	180	19,6	10,5	10,5	10,6	400	2,8	0,842	32,7	2,23	0,61	1,72

Таблица 2

P , МВт	Q , МВАр	$I_{c,\text{ср}}$, кА	$I_{c,\text{ср}}^*$, кА	U_c , кВ	U_c^*	I_p , А	I_p^* , отн. ед.	ψ	$\cos\varphi$	φ , град	φ' , град	$K_{\text{вибр}}$
301	40	9,40	0,922	18,6	0,93	2100	1,22	61,0	0,994	6,3	14,5	0,31
301	60	9,5	0,931	18,65	0,933	2200	1,28	62,6	0,981	11,2	19,3	0,34
301	80	9,5	0,931	18,98	0,949	2300	1,34	63,5	0,964	15,5	23,1	0,38
301	130	10,1	0,99	19,4	0,97	2600	1,51	68,0	0,887	27,5	34,7	0,47
301	180	10,53	1,033	19,6	0,98	2800	1,63	70,1	0,842	32,6	39,6	0,54

Таблица 3

P , МВт	Q , МВАр	$\cos\varphi$	φ , град	$K_{\text{вибр}}$	Изменение $K_{\text{вибр}}$, %	$V_{\text{общ}}^{10-1000}$, Гц	Изменение $V_{\text{общ}}$, %	Гармоника 50 Гц, мм/с	Изменение 50 Гц, %	Гармоника 100 Гц, мм/с	Изменение 100 Гц, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
301	40	0,994	6,3	0,31	100	1,60	100	0,58	100	1,00	100
301	60	0,981	11,2	0,34	108	1,69	106	0,60	103	1,14	114
301	80	0,964	15,5	0,38	122	1,76	110	0,57	98	1,25	125
301	130	0,887	27,5	0,47	149	2,00	125	0,63	109	1,49	149
301	180	0,842	32,6	0,54	173	2,23	139	0,61	105	1,72	172

$I_H = 10,2$ кА; $U_H = 20$ кВ; $\cos\varphi = 0,85$; $I_{p,H} = 2900$ А; $I_{p,\text{р.э}} = 1719$ А; $x_{\text{оа}} = 0,148$; $x_{\text{оа}} / x_a = 0,095$.

В табл. 3 представлены процентные соотношения средних квадратичных значений (СКЗ) виброскорости гармоник 50, 100 Гц и в полосе 10–1000 Гц, зарегистрированных в опытных режимах, и значений коэффициентов вибрационного отклика статора $K_{\text{вибр}}$, рассчитанных по (7). За 100% в столбцах 6, 8, 10, 12 таблицы приняты значения вибрации и коэффициента вибрационного отклика статора при наименьшей реактивной нагрузке турбогенератора.

Анализ представленных в табл. 3 значений составляющих вибрации частотой 50, 100 Гц и суммарных в полосе 10–1000 Гц показывает, что при изменении параметров нагрузки турбогенератора составляющая 50 Гц (см. столбцы 9, 10) практически не меняется (с учётом допустимой неизбежной погрешности измерений). А вот составляющая

100 Гц (столбцы 11, 12) изменяется существенно. Изменение же суммарного СКЗ вибрации (столбцы 7, 8) зависит от того, какая составляющая – существенно изменяющаяся 100 Гц или практически не изменяющаяся 50 Гц – превалирует в суммарном СКЗ.

В табл. 3 для удобства сопоставления выделены процентные соотношения коэффициентов вибрационного отклика статора $K_{\text{вибр}}$ в опытных режимах турбогенератора (столбец 6) и процентные соотношения значений составляющих вибрации 100 Гц (столбец 12). Хорошая корреляция свидетельствует о состоятельности выражения (7) и рассуждений при его выводе.

Логика полученного выражения и приведенные опытные данные применительно к составляющей 100 Гц подтверждают сделанный в [1] вывод, что уровень вибрации статора значительно и физически оправданно увеличивается на рабочих режимах

турбогенератора с низкими значениями коэффициента мощности и, напротив, снижается в рабочих режимах с коэффициентом мощности, близким к единице. Изменения же вибрации в широкой частотной полосе, в которой обычно измеряется уровень вибрации, будут зависеть от доли, занимаемой в ней составляющей 100 Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А.В. Исследование зависимости радиальной вибрации сердечника статора двухполюсного турбогенератора

от тока статора и коэффициента мощности. — *Электричество*, 2011, № 4, с. 43–51.

2. Мильх В.И., Бадовский В.А. Численно-полевой анализ силовых взаимодействий в турбогенераторе. — *Электротехника і Електромеханіка*, 2009, № 3. с. 32–36.

[27.05.2017]

А в т о р: Григорьев Анатолий Владимирович окончил в 1962 г. электромеханический факультет Новочеркасского политехнического института по специальности «Электрические машины и аппараты». В прошлом — ведущий инженер ОАО «Свердловэлектроремонт», Екатеринбург, в настоящее время — пенсионер.

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 9, pp. 65–69

DOI:10.24160/0013-5380-2017-9-65-69

Influence of the operating parameters on the vibration of the stator of a turbogenerator

GRIGOR'YEV Anatolii V. (*Ekaterinburg, Russia*) — *Pensioner*

The physical factors causing radial vibration of a two-pole turbine generator's stator core are considered, and the manner in which this vibration depends on the turbine generator operating mode parameters is explained. A formula correlating the stator vibration with these parameters is derived, which allows one to predict and explain the changes in the stator vibration pattern with variation of the turbine generator operating load. The proposed formula for the stator vibration response coefficients makes it possible to estimate the physically justified changes in the stator vibration levels caused by changes in the turbine generator operating load parameters. This, in turn, opens the possibility to correctly compare the vibration levels in different operating modes for diagnostic purposes and to make conjectures about probable changes in the stator mechanical system's properties. The results from experiments on verifying the consistency of the obtained formula are given.

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

REFERENCES

1. Grigor'yev A.V. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2011, No. 4, pp. 43–51.

2. Milykh V.I., Badovskii V.A. *Електротехніка і Електромеханіка — in Ukraine*, 2009, No. 3, pp. 32–36.

[27.05.2017]