

**МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ
В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА
ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ В РЕЖИМАХ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ**

В. Л. Ахременко, А. И. Титко

Институт электродинамики НАН Украины, Киев

А. П. Грубой, В. И. Чередник

ГП з-д "Електротяжмаши", Харьков

Г. М. Федоренко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Исследовано влияние электродинамических усилий на механическую прочность элементов конструкции ротора мощных турбогенераторов при переходных процессах. Показана необходимость при модернизации машин учитывать помимо центробежных нагрузок и электромагнитных моментов также электродинамические усилия, которые действуют на отдельные детали ротора при переменных режимах эксплуатации.

Энергоблоки 200 и 300 МВт, составляющие основу тепловой энергетики Украины, используются для покрытия переменной части графика нагрузки. Так, например, только в течение 2006 г. они 1748 раз выводились в резерв, не считая аварийных отключений [1]. Если учесть, что коэффициент использования установленной мощности не превышает 25,8 %, то на один энергоблок приходится свыше 30 - 50 отключений в год, т.е. энергоблоки эксплуатируются в условиях переменных режимов [2].

При нормальных (базовых) режимах эксплуатации турбогенератора ротор вращается синхронно с электромагнитным полем и элементы ротора испытывают только механические нагрузки. Работа турбогенератора в динамических режимах (пуски и остановки, внезапные короткие замыкания, синхронизация, изменение мощности и др.) предполагает электродинамические нагрузки на узлы и детали ротора, которые в отдельных случаях могут достигать значений сопоставимых с механическими.

При усовершенствовании (модернизации) конструкции турбогенераторов появляется необходимость установки на концевых частях ротора различных деталей и узлов, механические части которых могут выступать за пределы концевых поверхностей ротора. При синхронных режимах эксплуатации в этих зонах возбуждается постоянное магнитное поле и, кроме механических нагрузок, дополнительных усилий на вновь установленные детали и узлы не возникает. В динамических режимах переменный магнитный поток возбуждает в теле этих деталей (изготовленных из магнитных материалов) вихревые токи, вследствие чего на них воздействуют электродинамические усилия (ЭДУ) [3].

ЭДУ находятся как векторное произведение

$$\vec{f} = [\vec{\delta} \vec{B}] \frac{H}{m^3}, \quad (1)$$

где $\vec{\delta}$ – плотность тока, \vec{B} – индукция магнитного поля.

Будем рассматривать сосредоточенные токи. Тогда вместо $\vec{\delta}$ подставляются токи $I d\vec{l}$, и ЭДУ рассчитывается в ньютонах на метр. При подстановке значение тока I в (А), индукции B в (Тл). Исходя из конфигурации токов в болту (рис. 1, токи замыкаются в области резьбы), на болт действуют следующие силы:

аксиальная составляющая индукции магнитного поля вызывающая радиально-тангенциальные силы, которые снимают или растягивают магнитные металлические части узлов в радиальном направлении;

тангенциальная составляющая индукции, воздействующая на радиальные составляющие тока, вызывает аксиальные силы. Они распределены по длине выступающей за пределы поверхности концевой части ротора магнитных металлических частей узлов, приложены к обеим противоположным боковым поверхностям металлических деталей, по которым протекают две ветки тока, пульсируют в одном направлении (вектор индукции тока также меняет знак) и действуют как нагрузки, которые создают изгибающие моменты в этих деталях и носят характер электродинамического удара, так как воздействуют на детали с большой частотой.

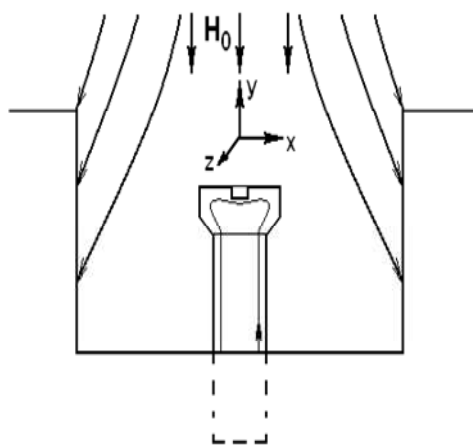


Рис. 1

напряжения. Расчет электромагнитных полей, возбуждаемых обмотками статора и ротора в переходных режимах, производится по методике, изложенной в работе [3].

Для вычисления ЭДУ приведем методологию расчета электромагнитных полей в области болта. Так как болт находится в пазу, то распределение поля в пазу может быть найдено по методике, изложенной в [4].

На рис. 2 показано распределение вектора индукции магнитного поля, который входит по нормали к поверхности вала ротора и ответвляется в сторону стенок паза. Это относится к индукции поля, возбуждаемого токами статора. Видно, что радиальная составляющая индукции в области болта, находящегося в пазу, становится приблизительно в два раза меньше, чем индукция внешнего поля. Аксиальная составляющая в пазу (на его стенках существенная) в зоне радиальных токов болта в 10 раз меньше радиальной составляющей на поверхности вала.

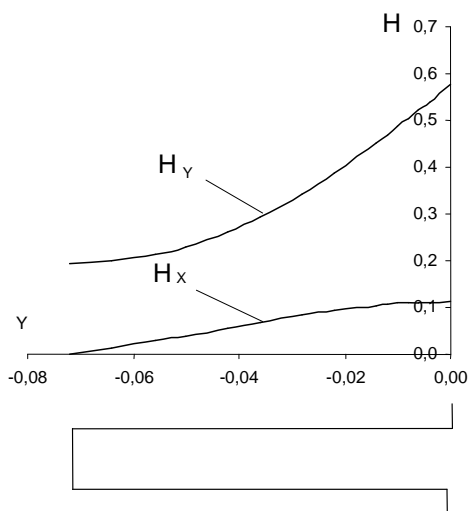


Рис. 2

Анализ электромагнитных процессов показывает, что наиболее существенными электродинамическими усилиями являются те, которые возникают по такой схеме. Вихревые токи наводятся аксиальным потоком обмотки ротора. Токи в болте распределяются в тангенциально-радиальном направлении (см. рис. 1). Радиальный магнитный поток обмотки статора H_0 на участке головки болта вызывает знакопеременные аксиальные ЭДУ.

При этом ответвленный магнитный поток (тангенциальная составляющая индукции) обмотки статора (ОС), действуя на радиальные токи болта, вызывает противоположно направленные аксиальные усилия, т.е. вызывает изгибающие

напряжения. Расчет электромагнитных полей, возбуждаемых обмотками статора и ротора в переходных режимах, производится по методике, изложенной в работе [3].

Так как болт находится, хотя и незначительно, ниже и дальше «центра тяжести» тангенциальных токов лобовых частей обмотки ротора (ОР), расстояние до токов ОР меньше, чем ширина паза, то будем считать, что на оси паза, где расположен винт, аксиальный поток не деформируется.

Рассмотрим теперь влияние болта, изготовленного из магнитного материала, на распределение поля в пазу. Пусть болт находится во внешнем магнитном поле с напряженностью H_0

(рис. 3). Величина $2a$ – диаметр болта, от начала координат до точки, где рассчитывается поле.

Если болт магнитный, то в пазу происходит перераспределение магнитного потока, который ответвляется в тело болта. Если болт находится в поле H_0 (см. рис. 3), то магнитное поле вблизи болта будет иметь такие составляющие индукции [5]

$$B_r = -\mu_0 H_0 \left[1 - \left(\frac{1 - \mu_1'}{1 + \mu_1'} \right) \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] \cos \alpha;$$

$$B_\varphi = -\mu_0 H_0 \left[1 + \left(\frac{1 - \mu_1'}{1 + \mu_1'} \right) \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right] \sin \alpha.$$
(2)

Величина μ_1' – относительная магнитная проницаемость материала болта.

Внутри болта

$$B_\varphi = \mu_1 \mu_0 H_0 \frac{2}{1 + \mu_1'} \sin \alpha;$$

$$B_r = -\mu_1 \mu_0 H_0 \frac{2}{1 + \mu_1'} \cos \alpha.$$
(3)

Из выражений (3) видно, что даже при $\mu_1' > 10$ индукция вблизи болта повышается почти в два раза.

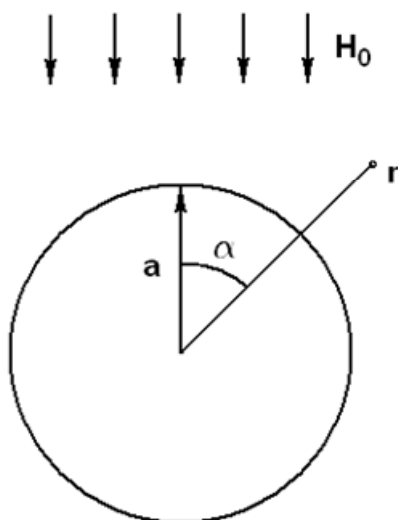


Рис. 3

Аксиальный поток входит в боковую поверхность болта, таким образом создавая в нем ЭДС E . Из рис. 1 и выражений (2), (3) видно следующее: чтобы найти ЭДС, необходимо проинтегрировать по поверхности болта составляющую B_r .

Тогда

$$E = -\omega l \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} B_r a dx,$$
(4)

где l – длина линии тока в радиальном направлении.

Глубина проникновения волны в тело болта составляет

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}.$$

Учитывая, что индукция магнитного поля в рассматриваемых режимах, в случае неуспешного включения при синхронизации генератора, составляет несколько десятых, а порой и единицы тесла, магнитная проницаемость будет невысокой. Тогда будем предполагать, что ток протекает по всему телу болта. Сопротивление в этом случае равно

$$R = \frac{\rho 2l}{\frac{\pi a^2}{2}}.$$
(5)

Исходя из принятой схемы (см. рис. 2), наведенная ЭДС является источником тока в болте, который рассчитывается как

$$I = E/R.$$

Методику учета влияния электродинамических усилий покажем на примере расчета на прочность болтового соединения, которое используется для крепления стеклотекстолитовых колодок, установленных в пазах концевых частей ротора и предназначенных для улучшения газораспределения в турбогенераторе мощностью 250 МВт.

Схема этой конструкции приведена на рис. 4: 1 – ротор (D – наружный диаметр ротора в месте установки стеклотекстолитовых колодок); 2 – стеклотекстолитовая колодка; 3 – болт.

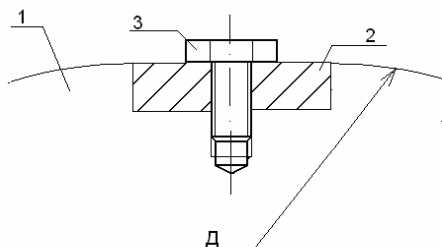


Рис. 4

К механическим нагрузкам, воздействующим на болт, относятся нагрузки от затяжки болта и центробежных усилий. В качестве примера выберем болт М12. На сечение болта, находящегося на уровне поверхности ротора, в который он вкручен, действуют усилия от затяжки, которое принимаем 700 кг и которое создает в минимальном сечении болта постоянные растягивающие напряжения $\sigma_{зам} = 87,5 \text{ Мн/м}^2$.

Центробежные усилия, действующие на самое опасное сечение болта (на уровне поверхности ротора), зависят от массы стеклотекстолитовой колодки и выступающей части болта, скорости вращения и расстояния их центра масс от оси вращения.

Удельный вес стеклотекстолита принимаем равным $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$, материала болта – $8 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$.

Расстояние центра тяжести колодки от оси вращения 29,15 см, а болта – 29,0 см.

Тогда общее центробежное усилие, действующее на сечение болта, будет

$$P = P_k + P_b = m_{колодки} \omega^2 \cdot r_{колодки} + m_{болта} \omega^2 \cdot r_{болта} = 2536 \text{ кг}, \quad (6)$$

где $\omega = \pi n/30$; ω – угловая частота вращения; n – скорость вращения ротора, об./мин.

Это усилие от центробежных сил создает напряжение в сечении болта равным

$$\sigma_{ц} = 317 \text{ Мн/м}^2.$$

Вместе с усилиями от затяжки максимальные усилия будут

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{зам} + \sigma_{ц} = 404,5 \text{ Мн/м}^2.$$

В зоне резьбы с учетом концентрации напряжений $K_{\sigma} = 2,5$ (для резьбовых соединений) [6]

$$\sigma = K_{\sigma} \cdot 404,5 = 1010 \text{ Мн/м}^2. \quad (7)$$

Характеристики магнитной стали 30ХГСНА ($\sigma_{0,2} = 1350 \text{ Мн/м}^2$, $\sigma_b = 1750 \text{ Мн/м}^2$, $\delta = 10 \%$) [7].

Если вести расчет только по напряжениям от механических нагрузок, то обеспечивается достаточный запас прочности, даже по отношению к пределу упругости $K = 1,35$.

Кроме центробежных усилий и усилий от затяжки могут возникнуть напряжения от смещения центра тяжести колодки, например на 0,5 мм. Изгибающие напряжения в этом случае будут [6]

$$\sigma = \frac{M_{изг}}{W_{болта}}, \quad (8)$$

где $M_{изг} = P_k \cdot \Delta$, P_k – центробежные усилия от колодки, $\Delta = 0,5$ мм (смещение центра тяжести колодки); $W_{болта}$ – момент сопротивления сечения болта.

$$W_{болта} = \pi d^3/32,$$

$$\sigma = 120,9 \text{ Мн/м}^2.$$

Тогда суммарные напряжение от механических сил достигнут величины 1130 Мн/м^2 и запас прочности по упругим напряжениям $\approx 1,2$.

Однако, кроме механических нагрузок при переменных режимах в турбогенераторе, как было сказано ранее, возникают и электродинамические нагрузки, которые влияют на прочность болта, изготовленного из магнитного материала и выступающего над поверхностью ротора.

Рассмотрим влияние электродинамических нагрузок на выступающую за пределы поверхности ротора часть болта при неуспешном включении турбогенератора при самосинхронизации, а именно, когда угол между напряжениями сети и турбогенератора составляет 120° , которые накладываются на механические нагрузки, проведенные выше.

Для данного турбогенератора расчеты показывают, что в режиме включения, когда фазы напряжений сети и турбогенератора отличаются на 120° , ток статора составит 6,5 о.е., ток ротора - 4,2 о.е.

При этом радиальные составляющие индукции магнитного потока, возбуждаемые токами статора и ротора в области головки болта, складываются. По приведенной ранее методике для переходного процесса, когда токи обмоток статора имеют периодическую и аperiodическую составляющие, суммарная радиальная составляющая индукции в области болта будет равна [3]

$$B_{r\Sigma} = 0,89 (1 - \cos \alpha t) \text{ Тл.}$$

Электродинамическая аксиальная составляющая, действующая на головку болта, определяется по формуле (1)

$$P_{\text{эд}} = 600 (\cos \alpha t - 0,5 - 0,5 \cos 2\alpha t) \text{ Н/м,}$$

где t – время.

В соответствии с расчетными значениями эти силы воздействуют на головку болта в направлении оси ротора. Время достижения максимума нагрузки 0,01 с (частота 100 Гц), что можно рассматривать как ударную циклическую нагрузку.

Максимальное значение $P_{\text{эд}} = 1200 \text{ Н/м}$. С учетом размеров болта и характера ресурсных электродинамических данных эту силу с достаточной степенью точности можно заменить на сосредоточенную силу $P = 2,5 \text{ кг}$, действующую на головку болта. Расстояние от головки болта до поверхности ротора составляет 4,5 см. Тогда перемещение головки болта в осевом направлении от действия статической силы 2,5 кг выражается формулой [6]

$$\delta_{cm} = \frac{Pl^3}{3EI},$$

где l - длина выступающей части болта – 4,5 см; P - нагрузка от электродинамических сил; E - модуль упругости материала болта; I - осевой момент инерции сечения болта - $\pi d^4/64$.

Напряжение в болте при ударном приложении нагрузки $\sigma_{\text{дон}} = \sigma_{cm} \cdot K_{\text{дин}}$, где σ_{cm} - напряжение от статического приложения нагрузки. Это будут изгибающие напряжения

$$\sigma_{cm} = \frac{M_{\text{изг}}}{W},$$

W - момент сопротивления сечения болта - $\pi d^3/32$; $M_{\text{изг}} - P \cdot l$. $\sigma_{cm} = 11,4 \text{ Мн/м}^2$.

При наличии люфта в резьбовом соединении 1 мм скорость болта в момент удара будет равна

$$V = \frac{2S}{t} = \frac{2 \cdot 0,1}{0,01} = 20 \text{ см/с.}$$

Тогда

$$K_{\text{дин}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{V^2}{g \delta_{cn}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{20^2}{981 \cdot 7,37 \cdot 10^{-4}}} = 24,5,$$

$$\sigma_{дин} = \sigma_{ст} \cdot K_{дин} = 11,4 \cdot 24,5 = 280 \text{ Мн/м}^2.$$

В результате учета всех сил максимальные напряжения в резьбе достигнут (если напряжения от изгиба, вызванные смещением колодки и электродинамических сил, совпадут) 1411 Мн/м^2 , что выше предела текучести $\sigma_{0,2} = 1350 \text{ Мн/м}^2$.

В реальных условиях эксплуатации переменные режимы неизбежны. И тогда на расчетные механические усилия, вызывающие напряжения в болте, которые практически постоянны и ниже предела текучести, будут накладываться усилия от электродинамических сил, которые периодически будут перегружать его за предел текучести и вызывать в зоне резьбы, где растягивающие напряжения складываются, пластические деформации, создавая предпосылки для возникновения и развития трещин. Характер нагружения болта в этом случае будет носить усталостный характер. По мере развития трещины напряжения на ее границе будут резко возрастать и, в конечном итоге, после определенного числа циклов может наступить хрупкое разрушение.

Из расчета видно, что электродинамическая составляющая нагрузки болта меняет характер нагружения, так как вносит циклическую составляющую в спектр нагружения, что вызывает необходимость вести расчет болта и по критериям механики разрушения.

Выводы

1. Предложена методика расчета электродинамических усилий при переходных режимах работы турбогенератора и на ее основе показана необходимость учета этих усилий для оценки реальных напряжений в элементах конструкции ротора турбогенератора применительно к режиму самосинхронизации (одному из наиболее опасных режимов эксплуатации).

2. Показано, что при проектировании турбогенераторов, в частности конструкции ротора, когда в нем имеются выступающие за пределы его поверхности детали и узлы, выполненные из магнитных материалов, для обеспечения их надежности следует учитывать помимо механических нагрузок и электродинамические нагрузки при переходных процессах. Это позволит оценить весь комплекс и характер нагрузок, действующих на детали турбогенератора, а также установить с учетом максимальных нагрузок необходимый запас прочности для избежания аварийных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мацевитый Ю.М., Шульженко Н.Г., Голощанов В.Н. и др.* Повышение энергоэффективности работы турбоустановок ТЭС и ТЭС путем модернизации, реконструкции и усовершенствования режимов их эксплуатации. - К.: Наук. думка, 2008. - 366 с.
2. *Улітїч Ю.І.* Стан теплової енергетики України, перспективи її оновлення та модернізації // Енергетика і електрофікація. - 2005. - № 1. - С. 9 - 13.
3. *Грубой А.П., Титко А.И., Федоренко Г.М., Чередник В.И.* Электромагнитные поля и электродинамические усилия в элементах конструкции ротора турбогенераторов при переходных процессах // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2008. - № 21. - С. 33 - 41.
4. *Титко О.І., Циганкова Г.А., Фищук А.К.* Магнітне поле в зубцево-пазовій області електричних машин і електромагнітних пристроїв // Там же. - 2007. – № 18. – С. 80 - 85.
5. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. шк., 1973. – 750 с.
6. *Беляев Н.М.* Сопrotивление материалов. - М.: Наука, 1976. - 608 с.
7. *Детали машин.* Расчет и конструирование. – М.: Машиностроение, 1968. - Т. 1. - 440 с.

Поступила в редакцию 13.01.09