

Расчет электромагнитных нагрузок электрических контуров ротора криотурбогенератора при установившихся асинхронных режимах с помощью схем замещения

Представлена методика расчета токов и потерь в n металлических оболочках ротора криотурбогенератора в установившихся асинхронных режимах с использованием эквивалентных электрических схем замещения.

Наведена методика розрахунку струмів та втрат у n металевих оболонках ротора криотурбогенератора в установившихся асинхронних режимах з використанням еквівалентних електричних схем заміщення.

При эксплуатации возможна работа синхронных машин в асинхронных режимах [1]. Ввиду особенностей конструкции ротора криотурбогенератора (КТГ) [2] являются весьма критичными к этим режимам, а расчет их имеет свою специфику.

Рассмотрим асинхронный режим невозбужденного КТГ при постоянной скорости вращения ротора со скольжением s относительно магнитного поля статора. Для расчетов используем уравнения Парка-Горева, которые в операторной форме имеют вид:

$$\omega_c p \Psi_{d1}(p) = -r_{d1} i_{d1}(p);$$

$$\dots$$

$$\omega_c p \Psi_{dn}(p) = -r_{dn} i_{dn}(p);$$

$$\omega_c p \Psi_{q1}(p) = -r_{q1} i_{q1}(p);$$

$$\dots$$

$$\omega_c p \Psi_{qn}(p) = -r_{qn} i_{qn}(p);$$

$$\omega_c p \Psi_d(p) = -U_d(p) - r_a i_d(p) + \omega \Psi_q(p); \quad (1)$$

$$\omega_c p \Psi_q(p) = -U_q(p) - r_a i_q(p) - \omega \Psi_d(p); \quad (2)$$

$$\omega_c p \Psi_f(p) = U_f(p) - r_f i_f(p),$$

где обозначения приняты, согласно [4]. Потокосцепления обмоток определяются следующим образом:

$$\omega_c \Psi_{dk}(p) = \sum_{j=1}^n x_{dkj} i_{dj}(p) + 1,5 x_{ak} i_d(p) + x_{dkf} i_f(p);$$

$$\omega_c \Psi_{qk}(p) = \sum_{j=1}^n x_{dkj} i_{qj}(p) + 1,5 x_{ak} i_q(p);$$

$$\omega_c \Psi_d(p) = \sum_{j=1}^n x_{adj} i_{dj}(p) + x_d i_d(p) + x_{af} i_f(p);$$

$$\omega_c \Psi_q(p) = \sum_{j=1}^n x_{aj} i_{qj}(p) + x_q i_q(p);$$

$$\omega_c \Psi_f(p) = \sum_{j=1}^n x_{djf} i_{dj}(p) + 1,5 x_{af} i_d(p) + x_f i_f(p),$$

где $k = 1, \dots, n$ — нумерация электрических контуров ротора, эквивалентирующих его цилиндрические оболочки.

Используя операторные индуктивные сопротивления обмоток статора $X_d(p)$ и $X_q(p)$ соответственно по продольной и поперечной осям, принимая $U_f(p) = 0$ и $\omega = (1+s)\omega_c$, уравнения (1) и (2) можно представить в виде:

$$-U_d(p) = (p X_d(p) + r_a) i_d(p) - X_q(p) (1+s) i_q(p);$$

$$-U_q(p) = X_d(p) (1+s) i_d(p) + (p X_q(p) + r_a) i_q(p).$$

Так как рассматриваются установившиеся режимы, то можно непосредственно от уравнений в области изображений перейти к комплексной форме переменных величин, заменив p на js и отбросив начальные значения. Действительная часть полученных таким образом комплексных величин представляет действительное мгновенное значение рассматриваемых величин [1]. Тогда уравнения равновесия напряжений по осям d и q после замены оператора p на js примут вид

$$-\dot{U}_d = [js X_d(js) + r_a] \dot{I}_d - X_q(js) (1+s) \dot{I}_q; \quad (3)$$

$$-\dot{U}_q = X_d(js) (1+s) \dot{I}_d + [js X_q(js) + r_a] \dot{I}_q; \quad (4)$$

Для определения $X_d(js)$ и $X_q(js)$ можно использовать схемы замещения КТГ по соответствующим осям [6]. Решая систему уравнений (3)—(4), находим выражение для комплексов тока статора [1]:

$$\dot{I}_d = - \frac{\dot{U}_d \underline{Z}_q(js) + \dot{U}_q X_q(js) (1+s)}{\underline{Z}_d(js) \underline{Z}_q(js) + X_d(js) X_q(js) (1+s)^2}; \quad (5)$$

$$\dot{I}_q = - \frac{\dot{U}_q \underline{Z}_d(js) - \dot{U}_d X_d(js) (1+s)}{\underline{Z}_d(js) \underline{Z}_q(js) + X_d(js) X_q(js) (1+s)^2},$$

где $\underline{Z}_d(js) = r_a + js X_d(js)$; $\underline{Z}_q(js) = r_a + js X_q(js)$. Токи в роторных контурах КТГ находим, определяя токи в отдельных ветвях схемы замещения, исходя из известных \dot{I}_d и \dot{I}_q . При этом для учета поверхностного эффекта целесообразно реальные экраны делить на ряд концентрических оболочек, толщина которых меньше половины глубины проникновения электромагнитной волны [4].

Комплексы напряжений \dot{U}_d , \dot{U}_q определяются из следующих соображений. Предположим, что к обмотке статора приложена симметричная система напряжений:

$$u_a = U_m \cos(\omega_c t + \alpha_0);$$

$$u_b = U_m \cos(\omega_c t + \alpha_0 - 2\pi/3);$$

$$u_c = U_m \cos(\omega_c t + \alpha_0 + 2\pi/3),$$

следовательно, угол, образованный изображающим вектором напряжения относительно оси фазы a , будет $\alpha = \alpha_0 + \omega_c t$. Положение оси d ротора относительно фазы определяется углом $\gamma = \gamma_0 + \omega t$, γ_0 — начальный угол между осями d и a ; $\omega = \omega_c(1+s)$ — угловая скорость вращения ротора. Таким образом, получим $\gamma = (1+s)\omega_c t + \alpha_0$, а угол между векторами напряжения и осью ротора d будет равен $\delta = \Theta_0 + \frac{\pi}{2} + \gamma$, где $\Theta_0 = \alpha_0 - \gamma_0$ — угол между вектором напряжения и осью ротора d в начальный момент времени. Таким образом, проекции вектора напряжения на оси d и q ротора

$$u_d = U_m \cos(\omega_0 s t + \Theta_0 + \frac{\pi}{2}) = -U_m \sin(st + \Theta_0);$$

$$u_q = U_m \sin(\omega_0 s t + \Theta_0 + \frac{\pi}{2}) = -U_m \cos(st + \Theta_0).$$

В показательной форме записи комплексы напряжений при $\Theta_0 = 0$

$$\dot{U}_d = j U_m e^{jst}; \quad \dot{U}_q = U_m e^{jst}. \quad (6)$$

Тогда уравнения (5) можно представить в виде:

$$\dot{I}_d = - \frac{[r_a + j(1+2s)X_q(js)] j U_m e^{jst}}{\underline{Z}_d(js) \underline{Z}_q(js) + X_d(js) X_q(js) (1+s)^2};$$

$$\dot{I}_q = - \frac{[r_a + (1+2s)X_d(js)] U_m e^{jst}}{\underline{Z}_d(js) \underline{Z}_q(js) + X_d(js) X_q(js) (1+s)^2}.$$

Из уравнений (6) следует, что при работе в установившемся асинхронном режиме статорные токи i_d и i_q точно так же, как и приложенные к обмотке напряжения, имеют частоту скольжения. Токи в роторных контурах рассчитываются по схемам замещения [6], исходя из известных комплексов токов I_d и I_q , по уравнениям

$$\dot{I}_{dk} = I_d Y_{dk}; \quad \dot{I}_{qk} = I_q Y_{qk},$$

где I_{dk} и I_{qk} — токи k -х ветвей схем замещения соответственно по осям d и q ; Y_{dk} и Y_{qk} — взаимные проводимости k -х ветвей схем замещения по осям d и q относительно ветвей с токами I_d и I_q соответственно.

Очевидно, что токи в экранах ротора по осям d и q также будут иметь частоту скольжения. Мгновенные значения токов при известных значениях комплексов определяются как

$$i_d = \operatorname{Re} |I_d| = 0,5 (I_d + I_d^*); \quad i_q = \operatorname{Re} |I_q| = 0,5 (I_q + I_q^*);$$

$$i_{dk} = \operatorname{Re} |I_{dk}| = 0,5 (I_{dk} + I_{dk}^*); \quad i_{qk} = \operatorname{Re} |I_{qk}| = 0,5 (I_{qk} + I_{qk}^*),$$

где звездочкой обозначаются сопряженные величины.

Комплексные выражения потокоцеплений обмоток статора для установившегося асинхронного режима при $U_f = 0$:

$$\omega_c \Psi_d = X_d(j s) I_d; \quad \omega_c \Psi_q = X_q(j s) I_q.$$

Мгновенное значение тормозного момента M , развиваемого КТГ, вычисляется по формуле

$$M = 1,5 (\Psi_q i_d - \Psi_d i_q),$$

в которую входят мгновенные значения величин. Среднее значение момента за период вычисляем следующим образом:

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M_d d(s \omega_0 t) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [\Psi_d^* I_q - \Psi_q^* I_d].$$

Пульсирующая составляющая момента рассчитывается по формуле

$$M_n = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [\Psi_d I_q - \Psi_q I_d].$$

При расчете асинхронных режимов в КТГ несомненный интерес представляют потери в роторных контурах КТГ:

$$P_{kd} = I_{kd}^2 R_{kd}; \quad P_{kq} = I_{kq}^2 R_{kq}.$$

Приведенная методика расчета реализована в виде программы на ЕС ЭВМ и использовалась при проведении расчетных исследований электромагнитных нагрузок электрических контуров одного из вариантов КТГ-300-2 в установившихся асинхронных и несимметричных режимах. Расчеты выполнены для одного из вариантов КТГ мощностью 300 МВт, параметры которого приведены в работе [2]. Оболочки № 2 и № 5 — соответственно тепловой и радиационный экраны ротора КТГ. Результаты этих исследований представлены на рис. 1—4.

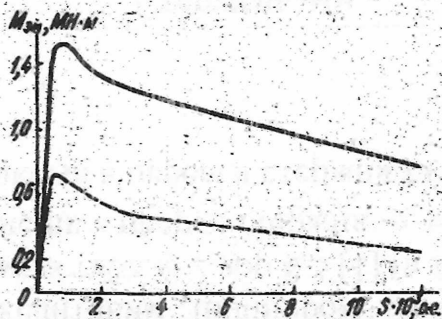


Рис. 1

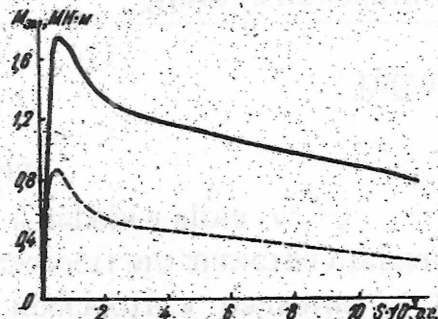


Рис. 2

На рис. 1, 2 представлены значения асинхронного момента на валу КТГ соответственно при замкнутой накоротко и разомкнутой с ПОВ, при работе непосредственно на сеть бесконечной мощности (сплошная линия) и через трансформатор (пунктирная линия), а на рис. 3, 4 приведены величины тепловых потерь в металлических оболочках № 2 и № 5 ротора КТГ в асинхронном режиме соответственно при замкнутой накоротко и разомкнутой СПОВ.

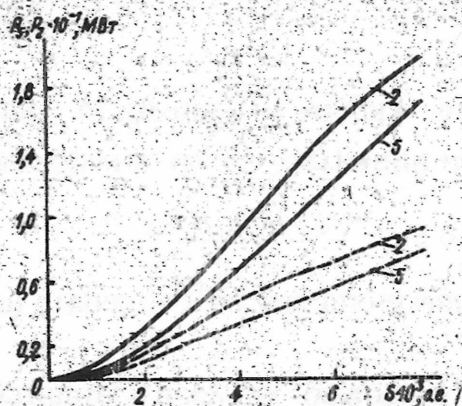


Рис. 3

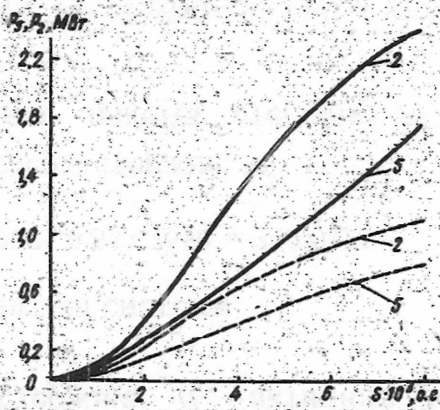


Рис. 4

Сопоставление результатов, полученных по приведенной методике, с результатами, полученными применением методов системного анализа [5], показало их хорошее совпадение (отличие не превысило 0,5%).

1. *Важнов А. Н.* Основы теории переходных процессов синхронной машины. — М.: Л.: Госэнергоиздат, 1960. — 312 с.
2. *Иванов А. В., Праздников В. И.* Индуктивные сопротивления синхронной машины с беззубцовым статором и немагнитным ротором // *Электротехника*. — 1982. — № 1. — С. 26—29.
3. *Конonenko Е. В., Силайлов Г. А., Хорыков К. А.* Электрические машины. — М.: Высш. шк., 1975. — 279 с.
4. *Кувeда В. П.* Определение электрических параметров демферных оболочек криостата ротора криотурбогенератора при моделировании переходных процессов // *Пробл. техн. электродинамики*. — 1979. — Вып. 70. — С. 54—59.
5. *Кувeда В. П., Балота С. Н.* Расчет доков в обмотках криотурбогенератора и в цилиндрических оболочках его ротора при переходных и установившихся электромагнитных процессах на основе методов системного анализа // *Техн. электродинамика*. — 1988. — № 6. — С. 63—67.
6. *Кувeда В. П., Балота С. Н., Твердяков В. В.* Эквивалентные электрические схемы замещения криотурбогенератора с п контурами ротора // *Там же*. — 1991. — № 2. — С. 71—75.

Поступила 25.06.90