

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОСКОРОСТНОГО ТОРЦЕВОГО
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

**Архипцев М.Г., Федий К.С.,
научный руководитель канд. техн. наук Встовский А.Л.
Сибирский Федеральный университет**

Современная гидроэнергетика по сравнению с другими традиционными видами электроэнергетики является наиболее экономичным и экологически безопасным способом получения электроэнергии.

В схеме любой гидро- и ветроэнергоустановки весьма важным компонентом является генератор. Основными требованиями, предъявляемыми к генератору, являются: управляемость, низкая частота вращения, обусловленная частотой вращения гидротурбины в свободном потоке, возможность его эксплуатации на открытом воздухе и в воде в течение длительного времени с высокой степенью надежности.

Математическая модель, основанная на классических схемных решениях, не позволяет эффективно провести оптимизацию параметров, с целью уменьшения массы и габаритов генератора и повышения его энергетических показателей. Поэтому для низкоскоростного торцевого синхронного генератора с магнитоэлектрическим возбуждением ранее разработана математическая модель торцевого генератора, основанная на решении основных уравнений классической электродинамики, описывающих распределение электромагнитного поля в активном объеме машины с учетом нелинейности характеристик ферромагнитных материалов. Математическая модель такого генератора позволяет рассчитывать токи, напряжения, электромагнитный момент в установившихся режимах.

Для определения токов короткого замыкания синхронного генератора, оценки влияния этих процессов на работу системы автоматического управления, выбор ее схемного решения необходима разработка математической модели переходных процессов.

Одной из основных задач исследования переходных процессов является определение параметров, определяющих величины напряжений и токов в обмотках генераторов. Такими параметрами, прежде всего, являются индуктивные сопротивления обмоток генератора. В машинах сравнительно малой мощности (до 50 – 100 кВт) необходим учет активных сопротивлений, величина которых соизмерима с индуктивными сопротивлениями.

В настоящей работе, для моделирования переходных процессов торцевого низкоскоростного синхронного генератора, применены общепринятые подходы исследования переходных процессов в синхронных генераторах цилиндрической конструкции с электромагнитным возбуждением, с учетом особенностей магнитоэлектрического возбуждения исследуемого генератора и распределения магнитных потоков в торцевой конструкции.

В рассматриваемой модели генератора, постоянный магнит полюса заменен эквивалентной одновитковой обмоткой, включенной на источник тока $I_B = const$, равным МДС фиктивной коэрцитивной силы $F_{мф} = H_{сф} \cdot l_m$. Полюсные наконечники представляют стержнями демпферной обмотки, также подключенными к источнику тока.

Обмотки статора и ротора имеют в общем случае разные число фаз и число витков, различное распространение в пространстве, поэтому необходимо произвести приведение роторной обмотки к статорной, с сохранением постоянства полной мощности в реальных и приведенных обмотках.

Для каждой из обмоток машины можно записать уравнения второго закона Кирхгофа, а так же уравнения для потокосцеплений с учетом явнополюсности, устанавливающих связь между напряжениями, токами и потокосцеплением машины. В них в качестве коэффициентов входят активные сопротивления обмоток якоря, возбуждения и демпферной, индуктивности само- и взаимоиндукции обмоток. Эти электрические параметры необходимы и для определения точки отхода прямой возврата и ЭДС холостого хода и зависят от формы магнитного поля в рабочем зазоре и, следовательно, от конструкции ротора. На рисунке 1 представлена расчетная модель явнополюсного низкоскоростного торцевого синхронного генератора с постоянными магнитами, с помощью которой можно составить схемы замещения магнитной цепи, и определить магнитные проводимости для составляющих магнитного потока машины и далее все выше перечисленные электрические параметры.

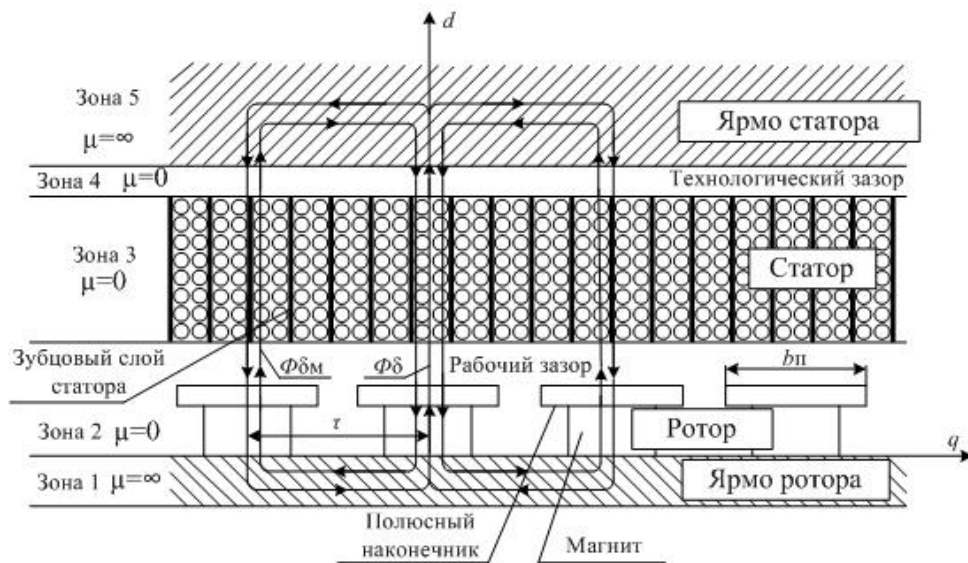


Рисунок 1 – Расчетная модель явнополюсного генератора

На основании представленной расчетной модели составлены схемы замещения магнитных цепей для различных положений ротора, показанные на рисунке 2.

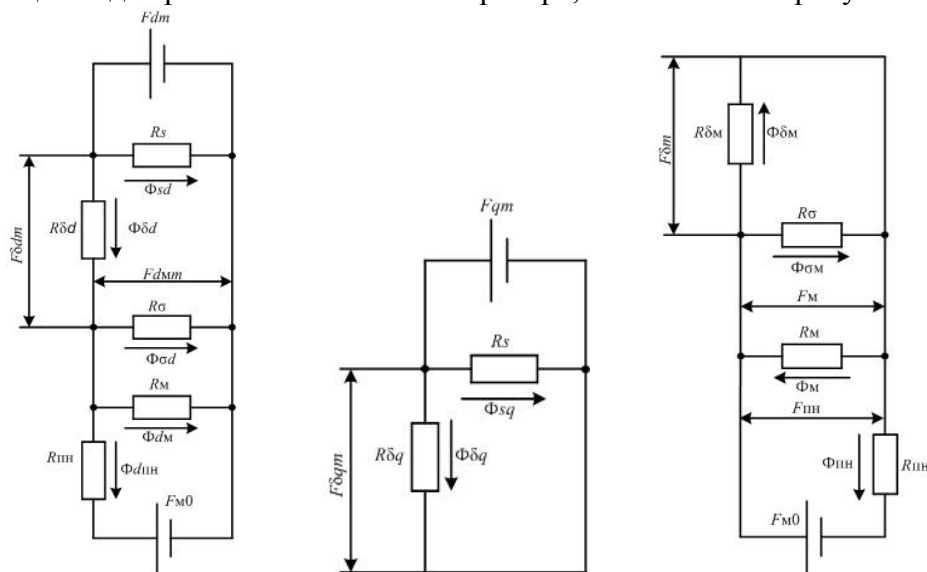


Рисунок 2 – Схемы замещения магнитных цепей

Сопротивление воздушного зазора $R_{\delta d}$ для потока $\Phi_{\delta d}$ будет равно:

$$R_{\delta d} = \frac{F_{\delta dm}}{\Phi_{\delta d}} = \frac{\pi \cdot \delta \cdot k_{\delta}}{2 \cdot \mu_0 \cdot \tau \cdot l_{\delta} \cdot k_{\phi d} \cdot k_d} = \frac{1}{\Lambda_{\delta d}}. \quad (1)$$

Аналогично находят сопротивление $R_{\delta q}$ для потока $\Phi_{\delta q}$:

$$R_{\delta q} = \frac{F_{\delta qm}}{\Phi_{\delta q}} = \frac{\pi \cdot \delta \cdot k_{\delta}}{2 \cdot \mu_0 \cdot \tau \cdot l_{\delta} \cdot k_{\phi q} \cdot k_q} = \frac{1}{\Lambda_{\delta q}}. \quad (2)$$

Сопротивление рабочего зазора $R_{\delta m}$ для потока $\Phi_{\delta m}$ будет равно:

$$R_{\delta m} = \frac{F_{\delta m}}{\Phi_{\delta m}} = \frac{\pi \cdot \delta \cdot k_{\delta}}{2 \cdot \mu_0 \cdot \tau \cdot l_{\delta} \cdot k_{\phi m} \cdot k_m} = \frac{1}{\Lambda_{\delta m}}. \quad (3)$$

Сопротивление полюса магнита по продольной оси:

$$R_m = \frac{h_m}{\mu_{\sigma} \cdot b_m \cdot l_m} = \frac{1}{\Lambda_m}. \quad (4)$$

Сопротивление рассеяния якоря:

$$R_s = \frac{p \cdot q}{2 \cdot \mu_0 \cdot \lambda_s \cdot l_{\delta}} = \frac{1}{\Lambda_s}. \quad (5)$$

Сопротивление рассеяния ротора на один полюс:

$$R_{\sigma} = \frac{1}{\Lambda_{\sigma}}. \quad (6)$$

Коэффициенты формы поля, входящие в формулы (1)–(3) магнитных сопротивлений, определяются разложением в гармонический ряд индукций соответствующих полей.

Магнитные проводимости получены как обратная величина соответствующих сопротивлений в схемах замещения (рис. 2), с учетом значений коэффициентов формы соответствующих магнитных полей. Определив все коэффициенты формы поля, можно определить индуктивные сопротивления. Главное индуктивное сопротивление якоря по продольной оси машины:

$$x_{ad} = \frac{2 \cdot m \cdot f_1 \cdot W_1^2 \cdot k_{01}^2}{p} \cdot \Lambda_{ad1} \quad (7)$$

где m – число фаз статора; f_1 – частота питающей сети; W_1 – число витков статора;

k_{01} – обмоточный коэффициент; $\Lambda_{ad1} = \frac{\Lambda_{ad}}{k_{\phi d}}$ – магнитная проводимость воздушного

зазора по продольной оси, определяется из

$$\Lambda_{ad} = \frac{1}{R_{\delta d}} \cdot \frac{\left(\frac{1}{R_{\sigma}} + \frac{1}{R_m} \right)}{\left(\frac{1}{R_{\delta d}} + \frac{1}{R_{\sigma}} + \frac{1}{R_m} \right)}$$

где $A_{\delta d} = \frac{2 \cdot k_d \cdot k_{\Phi d} \cdot \mu_0 \cdot \tau \cdot l_\delta}{\pi \cdot \delta_{\text{ЭКВ}}}$ – магнитная проводимость воздушного зазора в абсолютных единицах по продольной оси; $A_\sigma = A_{\sigma M} + A_{\sigma P}$ – магнитная проводимость рассеяния ротора на один полюс, состоящая из суммы магнитной проводимости рассеяния полюсных башмаков и магнитной проводимости рассеяния полюса магнита; $k_{\Phi d}$ и k_d – коэффициенты формы поля магнита; l_δ – активная длина пакета статора; τ – полюсное деление по среднему диаметру; $\delta_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный зазор.

Главное индуктивное сопротивление якоря по поперечной оси машины:

$$x_{aq} = \frac{2 \cdot m \cdot f_1 \cdot W_1^2 \cdot k_{01}^2}{p} \cdot A_{aq1} \quad (8)$$

где $A_{aq1} = \frac{1}{k_{\Phi q} R_{aq}}$ – магнитная проводимость воздушного зазора по поперечной оси.

Полные индуктивные сопротивления якоря:

$$x_S = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot W_1^2 \cdot A_S; \quad (9)$$

$$x_d = x_{ad} + x_S; \quad x_q = x_{aq} + x_S \quad (10)$$

где $A_S = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l_\delta \cdot \lambda_S}{p \cdot q}$ – магнитная проводимость рассеяния якоря; λ_S – суммарный коэффициент удельной проводимости для потокосцепления рассеяния обмотки якоря, состоящий из суммы коэффициента лобового рассеяния и коэффициента пазового рассеивания; q – число пазов на полюс и фазу.

Таким образом, определены параметры, входящие в уравнения переходного процесса синхронного низкоскоростного торцевого генератора с магнитоэлектрическим возбуждением.