УДК 621.313.3
DOI:10.53015/18159958_2025_21_2_14

К ВОПРОСУ О ПАРАМЕТРАХ СИНХРОННЫХ МАШИН В СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ

CONCERNING PARAMETERS OF SYNCHRONOUS MACHINES UNDER SYMMETRICAL AND UNSYMMETRICAL CONDITIONS

©2025

Воронов Павел Леонидович, кандидат технических наук, инженер

Voronov Pavel Leonidovich, Candidate of Technical Sciences, Engineer

ООО НПП «ЭКРА», Чебоксары (Россия)
NPP EKRA LLC, Cheboksary (Russia)

E-mail: plv911@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7328-0777

Аннотация: В статье рассмотрены параметры схем замещения мощных синхронных машин генераторов и двигателей в симметричных и несимметричных режимах с учетом демпферной системы роторов, а также подробно рассматриваются соответствия между параметрами синхронных машин в различных системах координат.

Ключевые слова: синхронные машины, системы координат, анализ электрических режимов, преобразование координат.

Для цитирования: Воронов, П.Л. К вопросу о параметрах синхронных машин в симметричных и несимметричных режимах // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 2 (78). – С. 14-23. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_2_14.

Abstract: The article discusses the parameters of substitution schemes for powerful synchronous machines of generators and motors in symmetrical and asymmetrical modes, taking into account the rotor damper system, and also discusses in detail the correspondences between the parameters of synchronous machines in different coordinate systems.

Keywords: synchronous machines, coordinate systems, analysis of electrical modes, coordinate transformation.

For citation: Voronov, P.L. Concerning parameters of synchronous machines under symmetrical and unsymmetrical conditions // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 2 (78). – P. 14-23. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_2_14.

ВВЕДЕНИЕ

Для анализа установившихся и переходных процессов в электроэнергетических системах, в том числе и для целей релейной защиты и автоматики, широко применяются при моделировании на ЭВМ схемы замещения и системы дифференциальных уравнений синхронных машин (СМ) [1, 2]. Они представляются в многочисленных системах координат и в разных формах записи уравнений. Чаще всего анализ проводится с точки зрения наблюдателя, и в зависимости от задачи исследования могут использоваться как полные, так и упрощенные уравнения Парка-Горева [3, 4]. Применение этих уравнений наиболее эффективно для случаев, когда не нарушается симметрия фаз статора СМ, и преобразованные от фазных координат A, B, C уравнения в d, q, 0 координатах не содержат переменных во времени коэффициентов. Анализ же переходных процессов, вызванных различными несимметричными повреждениями (обрывы фаз, корот-

кие замыкания и т. д.), выполняется с помощью эквивалентных схем замещения, например, в которых генератор через линию электропередачи работает на шины неограниченной мощности. Даже при этом полные уравнения Парка-Горева, как правило, упрощаются путем пренебрежения активными сопротивлениями, трансформаторными ЭДС и дополнительными ЭДС вращения, наводимыми в статоре СМ при отклонении скорости вращения ротора от синхронной скорости системы.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Для облегчения и повышения точности расчетов в ряде случаев прибегают к использованию других систем координат: $\alpha, \beta, 0$, которые жестко связаны со статором; f, b, 0, которые были впервые использованы Г. Кроном для построения схем замещения энергосистем с целью анализа малых колебаний. Не вдаваясь в подробности, подчеркнем, что при исследовании несимметричных режимов в большинстве случаев не удается избавиться от периодических коэффициентов в дифференциальных уравнениях СМ. К тому же, в электроэнергетических системах с несколькими генераторами периодические коэффициенты в уравнениях могут появляться даже при симметричных повреждениях. Они вызываются [5] изменениями относительных скоростей роторов СМ относительно друг друга.

Благодаря мощным вычислительным средствам в настоящее время стали прибегать к анализу несимметричных систем непосредственно фазных координат A, B, C. Наряду с этим по-прежнему широко используется и система 1, 2, 0 координат (симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей).

Нередко при моделировании и расчетах в качестве первого шага в анализе обращаются к уравнениям так называемой обобщенной машины Г. Крона, представляющей собой двухфазную систему. Полученные в результате анализа значения параметров режима затем по правилам тензорного (матричного) метода преобразуются к действительным параметрам трехфазной системы [6]. При этом возникает необходимость приведения в соответствие исходных параметров, применяемых в обобщенной и классической теориях машин. Это связано также с особенностями применения инвариантных преобразований и с выбором предпочтительной системы относительных единиц (о. е.) [7].

При использовании универсальной типовой математической модели СМ в виде системы дифференциальных уравнений в d, q, 0 координатах, необходимо обращать особое внимание на исходную форму записи этих уравнений [4], т. е. на выбор положительных направлений токов, вращения координатных осей и ротора. От этого выбора зависят матрицы преобразования к фазным и другим системам координат.

В конкретных числовых расчетах всегда возникают проблемы, связанные с определением достоверных значений активных и индуктивных сопротивлений, входящих в схемы замещения и уравнения математических моделей СМ, а также с выбором системы о. е. [8–13].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей статье подробно рассматриваются соответствия между параметрами СМ в A, B, C; d, q, 0 и 1, 2, 0 координатах, которые чаще всего находят применение при анализе несимметричных режимов. Кроме этого, в статье приводятся значения параметров схем замещения мощных современных турбогенераторов при двухконтурном представлении их демпферной системы ротора (рис. 1) и схем замещения мощных синхронных двигателей с массивным ротором (рис. 2). Параметры схем замещения в d, q, 0 координатах рассчитаны по каталожным и опытным данным в системе о. е. согласно методикам, приведенным в [9, 10]. Значения сопротивлений приведены в табл. 1 и 2.

Замещая естественные демпферные контуры турбогенераторов двумя контурами по продольной и поперечной оси ротора, будем исходить из физической картины потокораспределения в нагруженной машине. При этом потоки рассеяния роторных цепей расчленяются на потоки, связанные непосредственно с каждым из контуров, и потоки, связанные взаимно с разными роторными контурами.

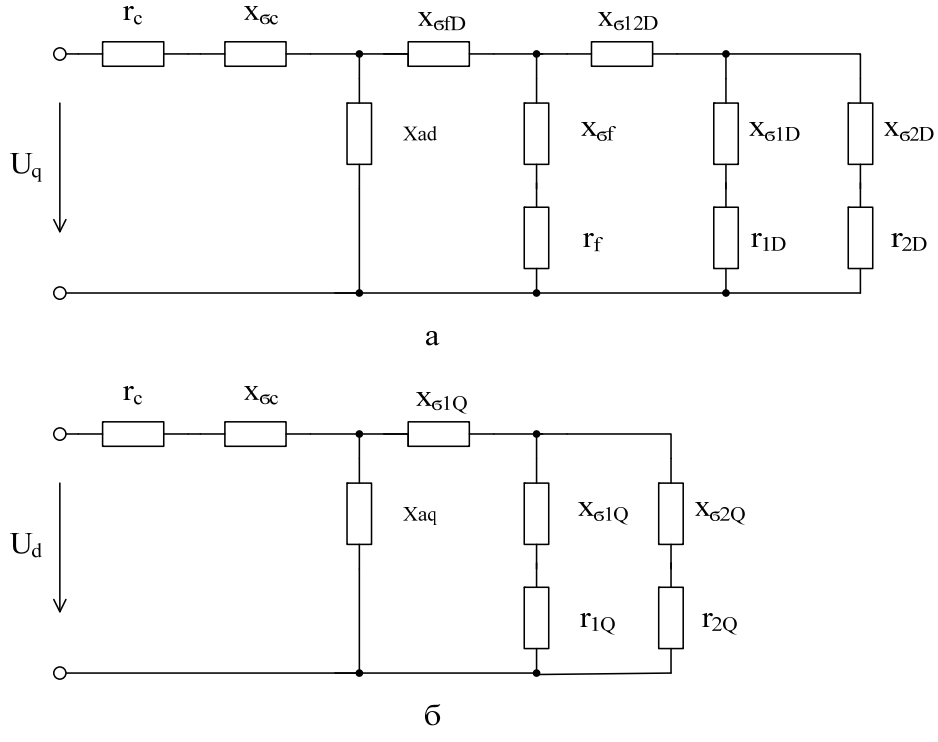


Рис. 1. Схемы замещения мощных турбогенераторов при двухконтурной демпферной системе ротора: а – по продольной оси d, б – по поперечной оси q

Fig. 1. Replacement schemes for powerful turbo generators with a dual–circuit rotor damper system: a - along the longitudinal axis d, b – along the transverse axis q

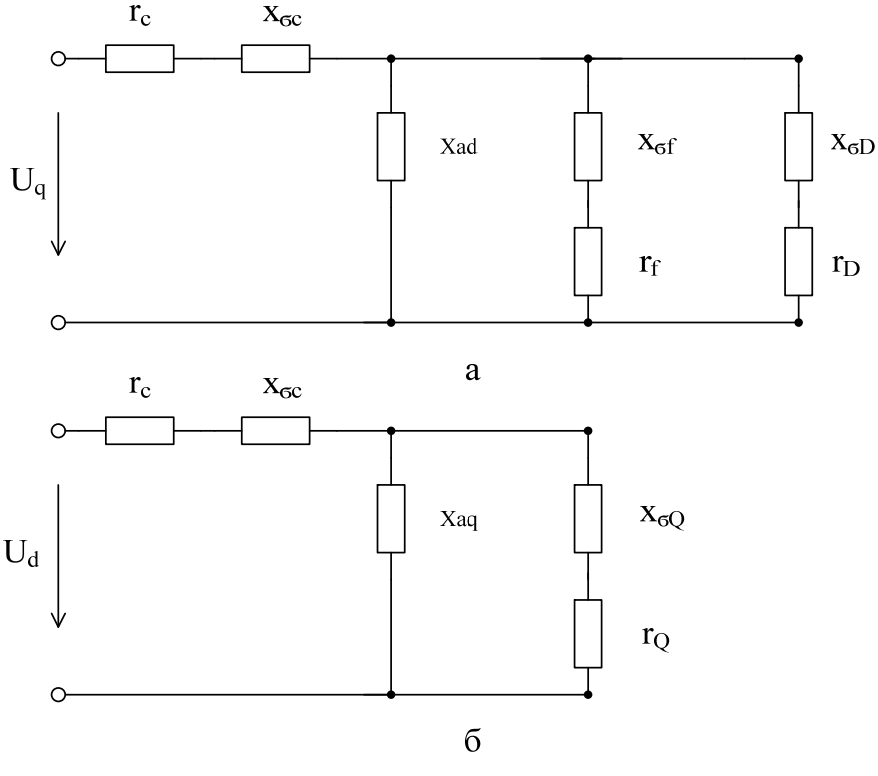


Рис. 2. Схемы замещения мощных синхронных двигателей:
а – по продольной оси d, б – по поперечной оси q

Fig. 2. Replacement schemes of powerful synchronous motors:
a – along the longitudinal axis d, b – along the transverse axis q

Таблица 1

Расчетные значения сопротивлений и параметры схем замещения мощных синхронных генераторов (о. е.)

Table 1

Calculated values of resistances and parameters of replacement circuits of powerful synchronous generators (pu)

Генератор	Параметры				
	ТВФ -100 – 2 U = 13,8 кВ; cosφ = 0,85	ТВВ – 200 - 2 U = 15,75 кВ; cosφ = 0,85	ТГВ - 300 U = 20 кВ; cosφ = 0,85	ТВВ – 500 U = 20 кВ; cosφ = 0,85	ТВВ – 800 U = 24 кВ; cosφ = 0,9
r_c	0,0009	0,0011	0,0021	0,0181	0,0165
$x_{\sigma c}$	0,113	0,124	0,171	0,242	0,224
x_{ad}	1,687	1,716	2,040	2,318	2,309
x_{aq}	1,607	1,661	1,961	2,207	2,283
x_d	1,798	1,839	2,211	2,525	2,533
x_q	1,720	1,785	2,031	2,449	2,507
x'_d	0,242	0,295	0,374	0,387	0,401
x''_d	0,183	0,191	0,195	0,243	0,272
x''_q	0,237	0,248	0,253	0,316	0,354
x_2	0,210	0,221	0,224	0,279	0,313
x_0	0,094	0,086	0,097	0,146	0,151
x_f	1,827	1,906	2,268	2,786	2,499
$x_{\sigma f}$	0,140	0,190	0,226	0,464	0,191
$x_{\sigma 1D}$	0,184	0,445	0,146	0,202	0,122
$x_{\sigma 2D}$	0,091	0,036	0,207	0,182	0,050
$x_{\sigma 1Q}$	0,130	0,131	0,208	0,402	0,266
$x_{\sigma 2Q}$	0,420	0,548	0,498	0,187	0,064
r_{1D}	0,0074	0,031	0,013	0,0141	0,0241
r_{2D}	0,057	0,079	0,205	0,195	0,091
$x_{\sigma 12D}$	0,113	0,078	- 0,058	- 0,095	- 0,032
r_{1Q}	0, 038	0,012	0,121	0,021	0,033
r_{2Q}	0,154	0,091	0,095	0,161	0,181
r_f	0,0058	0,0085	0,0145	0,0107	0,0097

На схемах замещения такое представление потоков отражается введением соответствующих сопротивлений рассеяния ($x_{\sigma f}$, $x_{\sigma 1D}$, $x_{\sigma 2D}$, $x_{\sigma 12D}$ и т. д.).

Определение этих сопротивлений является громоздкой задачей, требующей решения ряда систем алгебраических уравнений. В статье приведены лишь результаты выполненных вычислений параметров ряда СМ с целью иллюстрации. Расчеты показывают, что взаимные сопротивления рассеяния $x_{\sigma fD}$ и $x_{\sigma fQ}$ на два порядка меньше остальных сопротивлений схем замещения и ими вполне допустимо пренебречь. Из анализа различных режимов известно, что демпферные системы по поперечной оси ротора не оказывают заметного влияния на переходные процессы в СМ.

Таблица 2

Расчетные значения сопротивлений и параметры схем замещения мощных синхронных двигателей типа СТД, U=10кВ

Table 2

Calculated resistance values and parameters of replacement circuits of high-power synchronous motors of the STD type, U=10 kV

Двигатель	Параметры								
	СТД 2000	СТД 2500	СТД 3200	СТД 4000	СТД 5000	СТД 6300	СТД 8000	СТД 10000	СТД 12500
x_d	1,86	1,63	1,65	1,85	1,96	2,18	2,19	2,19	2,50
x''_{dc}	0,193	0,168	0,157	0,156	0,144	0,175	0,157	0,133	0,119
$x''_{dп}$	0,129	0,147	0,138	0,137	0,128	0,149	0,136	0,117	0,108
x''_{qc}	0,160	0,194	0,179	0,172	0,156	0,198	0,172	0,142	0,119
$x''_{qп}$	0,135	0,154	0,143	0,142	0,132	0,152	0,139	0,124	0,109
$x_{σc}$	0,104	0,122	0,115	0,114	0,107	0,126	0,116	0,101	0,092
x_{ad}	1,76	1,51	1,53	1,73	1,85	2,05	2,07	2,09	2,41
x'_{ad}	0,221	0,236	0,227	0,247	0,248	0,264	0,255	0,240	0,265
$x_{σf}$	0,129	0,126	0,123	0,147	0,157	0,151	0,153	0,155	0,194
$x_{σDc}$	0,058	0,075	0,067	0,060	0,051	0,075	0,058	0,043	0,032
$x_{σDп}$	0,032	0,031	0,029	0,028	0,025	0,026	0,023	0,019	0,017
x_f	1,885	1,635	1,634	1,882	2,009	2,204	2,225	2,244	2,602
r_f	$0{,}193\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}146\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}139\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}153\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}153\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}125\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}120\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}113\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}128\cdot\cdot10^{-2}$
r_c	$0{,}699\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}825\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}582\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}567\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}542\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}518\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}488\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}458\cdot\cdot10^{-2}$	$0{,}472\cdot\cdot10^{-2}$
r_{Dc}	0,029	0,023	0,021	0,022	0,021	0,016	0,015	0,014	0.015
$r_{Dп}$	0,053	0,054	0,048	0,047	0,042	0,044	0,038	0,032	0,028

В этой связи уместно использовать только одноконтурное представление демпферной системы по данной оси ротора.

Подчеркнем, что при вычислениях важно в качестве исходного параметра принимать сверхпереходное сопротивление СМ, которое с большой точностью определяется опытным путем на заводах-изготовителях и приводится в паспорте машин.

Обратим внимание, что для синхронных двигателей очень важными являются режимы пуска и самозапуска. В этих режимах следует учитывать эффект вытеснения тока, поскольку из-за него происходит изменение активного и индуктивного сопротивления эквивалентных демпферных контуров ротора. С уменьшением скольжения (при разгоне двигателя) активное сопротивление заметно уменьшается, а индуктивное сопротивление рассеяния, наоборот, увеличивается (приблизительно в 2–3 раза). Поэтому в табл. 2 приводятся по два значения этих сопротивлений в о. е. как для режима пуска (индекс – «п»), так и синхронной работы (индекс – «с»). Естественно, что эффект вытеснения тока сказывается и на значениях сверхпереходных сопротивлений синхронных двигателей по продольной и поперечной осям.

При анализе несимметричных режимов значения сопротивлений токам прямой, обратной и нулевой последовательностей СМ можно определить из уравнений в координатах d, q, 0. Для этого целесообразно использовать известные матрицы и правила их преобразования [6, 7, 14].

Уравнения напряжений СМ с демпферными контурами при постоянном токе возбуждения и неизменной синхронной скорости вращения ротора можно в общем случае записать в матричной форме

$$[u]_{dq0} = [z(p)]_{dq0} \cdot [i]_{dqo},$$

или в развернутом виде как

$$\begin{bmatrix} -u_d \\ E_q - u_q \\ -u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r + pL_d(p) & -\omega L_q(p) & 0 \\ \omega L_d(p) & r + pL_q(p) & 0 \\ 0 & 0 & r_0 + pL_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}, (1)$$

где u_0 – напряжение, i_0 – ток нулевой последовательности в системе координат Парка-Горева.

Система уравнений (1) описывает процессы в статоре СМ. Она получена из полных уравнений после исключения переменных, относящихся к контурам ротора.

Для того чтобы выразить напряжения в формуле (1) через симметричные составляющие, воспользуемся следующими двумя соотношениями:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos\omega t & \cos(\omega t - 120^o) & \cos(\omega t + 120^o) \\ -\sin\omega t & -\sin(\omega t - 120^o) & -\sin(\omega t + 120^o) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В выражении (2) действующие значения неуравновешенных токов фаз A, B, C выражены через действующие значения токов симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей; a и a^2 - операторы поворота на 120^0 и 240^0 соответственно. В выражении (3) мгновенные значения токов в координатах d, q, 0 выражены через мгновенные значения токов в фазных координатах A, B, C, а ток $i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_A + i_B + i_C)$.

Здесь специально обращаем внимание на матрицу преобразования в уравнении (3), записанную с коэффициентом $\sqrt{\frac{2}{3}}$. При таком преобразовании выполняется инвариантность мощности, а само преобразование становится ортогональным.

Оба преобразования можно записать в обобщенной матричной форме:

$$[I]_{ABC} = [C]^{120}_{ABC} \cdot [I]_{120}, \quad (4)$$

$$[i]_{dq0} = [C]^{ABC}_{dq0} \cdot [i]_{ABC}. \quad (5)$$

Тогда мгновенные значения фазных токов будут вычисляться по формулам:

$$[i]_{ABC} = \mathrm{Re}\sqrt{2} \cdot e^{j\omega t} \cdot [I]_{ABC} \quad (6)$$

$$[i]_{ABC} = \mathrm{Re}\sqrt{2} \cdot e^{j\omega t} \cdot [C]^{120}_{ABC} \cdot [I]_{120}. \quad (7)$$

Представим матрицу $[C]^{ABC}_{dq0}$, содержащую тригонометрические функции, в комплексной форме:

$$[C]^{ABC}_{dq0} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) & \frac{1}{2}(a^2 e^{j\omega t} + a e^{-j\omega t}) & \frac{1}{2}(a e^{j\omega t} + a^2 e^{-j\omega t}) \\ j\frac{1}{2}(e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}) & j\frac{1}{2}(a^2 e^{j\omega t} - a e^{-j\omega t}) & j\frac{1}{2}(a e^{j\omega t} - a^2 e^{-j\omega t}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, (8)$$

Найдем из (5) с помощью выражений (7) и (8) токи в координатах d, q, 0 через сим-

метричные составляющие 1, 2, 0. После несложных преобразований находим

$$[i]_{dq0} = \mathrm{Re}\sqrt{3}\cdot\begin{bmatrix} 1 & e^{j2\omega t} & 0 \\ -j & je^{j2\omega t} & 0 \\ 0 & 0 & e^{j\omega t} \end{bmatrix}\cdot[I]_{120} \qquad (9)$$

или $[i]_{dq0} = \mathrm{Re}\sqrt{3}\cdot[Z(j\omega)]\cdot[I]_{120}$.

Подставив выражение (9) для токов $[i]_{dq0}$ в уравнение (1), получаем

$$[u]_{dq0} = [Z(p)]_{dq0}\cdot\mathrm{Re}\sqrt{3}\cdot[Z(j\omega)]\cdot[I]_{120}. \qquad (10)$$

После раскрытия матрицы $[Z(p)]_{dq0}$ определяем выражение (11), где индуктивности $L_d^{"}$ и $L_q^{"}$, получаются из операторных сопротивлений $L_d(p)$ и $L_q(p)$.

Для схем замещения СМ только с двумя демпферными контурами на роторе сопротивления имеют вид:

$$\begin{bmatrix} -u_d \\ E_q - u_q \\ -u_0 \end{bmatrix} = \mathrm{Re}\sqrt{3}\cdot\begin{bmatrix} r + j\omega L_q & (r + j2\omega L_d^{"} - j\omega L_q)\cdot e^{j2\omega t} & 0 \\ -j(r + j\omega L_d) & j(r + j2\omega L_q^{"} - j\omega L_d^{"})\cdot e^{j2\omega t} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2}\cdot e^{j\omega t}\cdot(r_0 + j\omega L_0) \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix}, \qquad (11)$$

$$L_d(p) = L_d - \frac{p^2 M_{Dd}\cdot[(R_f + pL_f)\cdot(R_D + pL_D) - p^2 M_{Df}] + p^2[M_d + (R_D + pL_D) - M_{Df}M_{dD}]^2}{[(R_f + pL_f)\cdot(R_D + pL_D) - p^2 M_{Df}^2]\cdot(R_D + pL_D)}; \qquad (12)$$

$$L_d(p) = L_d - \frac{pM_{Qq}^2}{(R_Q + pL_Q)}, \qquad (13)$$

где L_i, M_{ij}, R_i – индуктивности, взаимные индуктивности и активные сопротивления соответствующих ветвей схемы замещения СМ. Операторные сопротивления представляют собой входные сопротивления этих схем замещения со стороны ветви статора. Чаще операторные сопротивления выражаются в о. е., как $X_d(p)$ и $X_q(p)$. В этом случае $L_i = X_i$, а в «системе X_{ad}» все взаимные индуктивности принимаются равными X_{ad} и X_{aq}. Однако в данной статье применена более общая форма записи операторных сопротивлений без каких-либо дополнительных допущений. Обычно для мощных СМ вполне допустимо пренебрегать активными сопротивлениями. Тогда при всех $R_i = 0$, а также когда в (12, 13) $p \to \infty$ (т. е. рассматриваются режимы при $t \to 0$) операторное сопротивление представляют собой очень простые выражения [7]:

$$X_d(p) = X_d - \frac{X_{ad}\cdot(X_{\sigma f} + X_{\sigma D})}{X_f\cdot X_D - X_{ad}^2} = X_d^{"};$$

$$X_q(p) = X_q - \frac{X_{aq}^2}{X_Q} = X_q^{"}.$$

Из системы уравнений (11) можно выделить матрицу напряжений $[u^{'}]_{dq0}$, в виде

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_q \\ 0 \end{bmatrix} - \mathrm{Re}\sqrt{3}\cdot[Z^{"}(j\omega)]\cdot\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix}, \qquad (14)$$

где $[Z^{"}(j\omega)]$– матрица сопротивлений, входящих в систему уравнений (11).

Выразим матрицу напряжений в фазных координатах через матрицу $[u^{'}]_{dq0}$ с помощью обратного преобразования вида

$$[u]_{abc} = [C_{ABC}^{dq0}]\cdot[u^{'}]_{dq0}, \qquad (15)$$

где обратная матрица $[C_{ABC}^{dq0}]$ вследствие ортогональности будет транспонированной к матрице преобразования для токов в выражении (3).

Преобразовав вектор ЭДС E_q к симметричным составляющим и использовав уравнения (14) и (15), запишем в общем виде

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \mathrm{Re}\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot E_q \cdot \begin{bmatrix} je^{j\omega t} \\ ja^2 e^{j\omega t} \\ jae^{j\omega t} \end{bmatrix} - \\ - \mathrm{Re}\sqrt{2} \cdot [C]_{ABC}^{dq0} \cdot [Z''(j\omega)] \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Раскрывая уравнение (16) после длительных преобразований и пренебрежения членами с $e^{j3\omega t}$ (третьими гармониками), определяем связь между мгновенными напряжениями в фазных координатах и токами симметричных составляющих, представляемую через сопротивления СМ в координатах d, q, 0 в формуле (17). При этом $[E] = jE_q\sqrt{3}$ и $L_2 = \frac{1}{2}(L_d'' + L_q'')$. Если ввести обозначения, представленные в (18), то система уравнений (17) может быть представлена как (19).

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \mathrm{Re}\sqrt{2} \cdot e^{j\omega t} \cdot \left(\begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \cdot [E] - \begin{bmatrix} r + j\omega L_d & r + j\omega L_2 & r_0 + j\omega L_0 \\ a^2(r + j\omega L_d) & a(r + j\omega L_2) & r_0 + j\omega L_0 \\ a(r + j\omega L_d) & a^2(r + j\omega L_2) & r_0 + j\omega L_0 \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$r + j\omega L_d = r + j\omega X_1 = Z_1; \\ r + j\omega L_2 = r + j\omega X_2 = Z_2; \quad (18) \\ r_0 + j\omega L_0 = r + j\omega X_0 = Z_0.$$

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \mathrm{Re}\sqrt{2} \cdot e^{j\omega t} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} E \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Поскольку

$$[u]_{ABC} = \mathrm{Re}\sqrt{2} \cdot e^{j\omega t} \cdot [C]_{ABC}^{120} \cdot [U]_{120},$$

то из (19) получаем известные уравнения СМ в симметричных составляющих

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

где параметры Z_1, Z_2, Z_0 определяются из (17) через параметры СМ в координатах d, q, 0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные в статье соотношения позволяют определять параметры СМ в различных системах координат, выраженные через сопротивления соответствующих схем замещения. Общепринято считать, что эти схемы в продольной и поперечной осях ротора правильно отражают основные процессы в машинах. Наиболее достоверными параметрами и характеристиками являются те, которые получены из экспериментальных или конструктивных данных. Однако исследователи режимов энергосистем этими параметрами, как правило, не располагают, поэтому необходимые сопротивления схем замещения рассчитываются с помощью только каталожных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Законьшек Я., Славутский А.Л. Цифровое моделирование современных энергосистем в реальном времени // Релейная защита и автоматизация. 2012. № 1 (6). С. 66-72.

2. Методика автоматизированного расчета ударного тока короткого замыкания в ПВК "АРУ РЗА" для проверки электроэнергетического оборудования / С.А. Абакумов,

А.В. Виштибеев, С.Е. Гаязов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. 2017. № 1 (26). С. 40-43.

3. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Москва : Энергия, 1964. 704 с.

4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. Москва : Высшая школа, 1978. 400 с.

5. Страхов С.В. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока. Москва : Госэнергоиздат, 1960. 247 с.

6. Хэнкок Н. Матричный анализ электрических машин. Москва : Энергия, 1967. 224 с.

7. Щедрин В.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учебное пособие. Чебоксары : Изд-во Чувашского университта, 2007. 422 с.

8. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. Москва : Высшая школа, 1975. 320 с.

9. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. Москва : Изд-во МЭИ, 1997. 424 с.

10. Щедрин В.А. Математическая модель и параметры неявнополюсной синхронной машины // Вестник Чувашского университета. 2007. № 2. С. 178-179.

11. Воронов П.Л., Щедрин В.А. Применение метода преобразования координат к анализу электрических сетей с распределенными источниками энергии // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения : сборник научных трудов. Чебоксары, 2015. С. 42-65.

12. Фишов, А.Г., Фролов М.Ю. Идентификация параметров синхронных машин в эксплуатационных режимах // Электротехника. Энергетика. Машиностроение : сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 2-6 декабря 2014 г. Ч. 2. Новосибирск, 2014. С. 113-116.

13. Меньшенин С.Е. Электрические машины. Расчет и моделирование параметров синхронной машины в среде MathCad : учебное пособие. Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2024. 191 с. ISBN 978-5-4497-3352-8.

14. Голованов И.Г., Голованова Н.Г. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах : учебное пособие для студентов направления "Электроэнергетика и электротехника" Ч. 1. Ангарск : Ангарский государственный технический университет, 2015. 104 с.

REFERENCES

1. Zakonshek Ya., Slavutskiy A.L. Digital modeling of modern energy systems in real time // Relay protection and automation. 2012. №. 1 (6). P. 66-72.

2. Methods of automated calculation of short-circuit shock current in the ARU RZA PVC for testing electrical equipment / S.A. Abakumov, A.V. Vishtibeev, S.E. Gayazov [et al.] // Electronic protection and automation. 2017. № 1 (26). P. 40-43.

3. Ulyanov S.A. Electromagnetic transient processes in electrical systems. Moscow : Energiya Publ., 1964. 704 p.

4. Venikov V.A. Transient electromechanical processes in electrical systems. Moscow : Higher School, 1978. 400 p.

5. Strakhov S.V. Transients in electrical circuits containing alternating current machines. Moscow : Gosenergoizdat, 1960. 247 p.

6. Hancock N. Matrix analysis of electric machines. Moscow : Energiya Publ., 1967. 224 p.

7. Shchedrin V.A. Electromagnetic transition processes in electrical systems : a textbook. Cheboksary : Publishing house of the Chuvash University, 2007. 422 p.

8. Postnikov I.M. Generalized theory and transient processes of electric buses. Moscow : Higher School, 1975. 320 p.

9. Gamazin S.I., Stavtsev V.A., Tsyruk S.A. Transient processes in industrial power supply systems caused by electric motor load. Moscow : MEI Publishing House, 1997. 424 p.

10. Shchedrin V.A. Mathematical model and parameters of an implicit synchronous machine // Bulletin of the Chuvash University. 2007. № 2. P. 178-179.

11. Voronov P.L., Shchedrin V.A. Application of the coordinate transformation method to the analysis of electrical networks with distributed energy sources // Regional energy and electrical engineering: problems and solutions collection of scientific papers. Cheboksary, 2015. pp. 42-65.

12. Fishov, A.G., Frolov M.Yu. Identification of parameters of synchronous machines in operational modes. Electrical engineering. Energy // Mechanical engineering collection of scientific papers of the I International Scientific Conference of Young Scientists, Novosibirsk, December 2-6, 2014, Part 2. Novosibirsk, 2014. P. 113-116.

13. Menshenin S.E. Electric buses. Calculation and modeling of synchronous machine parameters in the MathCad environment a textbook. Moscow : AI Art Media, 2024. 191 P. ISBN 978-5-4497-3352-8.

14. Golovanov I.G., Golovanova N.G. Transient processes in electric power systems. Electromagnetic transients in electrical systems : a textbook for students of the field "Electric Power engineering and electrical engineering" Part 1. Angarsk : Angarsk State Technical University, 2015. 104 p.