

Исследование режимов и работы синхронных машин с массивным ротором

МУСТАФАЕВ Р.И., ГАСАНОВА Л.Г.

В синхронных машинах с массивными роторами необходим учет изменения эквивалентирующего активного сопротивления ротора в зависимости от частоты тока в роторе при пуске машины. Получена трехфазная математическая модель такой машины, управления записаны в осях, вращающихся с частотой вращения ротора. На модели проведено исследование режима пуска машины и ее работы в синхронном режиме при набросе нагрузки (динамический режим). Исследования позволили сделать следующие выводы. При пуске синхронных машин с массивными роторами наиболее предпочтителен учет изменения эквивалентирующего сопротивления в виде линейной функции от скольжения. Выявлено, что в синхронном режиме работы машины, в том числе и в устойчивых динамических режимах, нет необходимости учитывать изменения сопротивления ротора от скольжения, так как скольжение в этих режимах колебательно затухает около нулевого значения, не оказывая влияния на изменение эквивалентирующего сопротивления. Рекомендуется в этих режимах считать значение этого сопротивления неизменным и определенным при скольжении, равном нулю.

К л ю ч е в ы е с л о в а: синхронные машины, массивный ротор, активное сопротивление ротора, математическая модель, динамический режим, режим пуска

Синхронные машины с массивным ротором находят широкое применение [1, 2]. Для исследования статических и особенно динамических режимов их работы используются хорошо известные уравнения Горева-Парка [3, 4]. Однако наличие массивного ротора требует учета изменения активного сопротивления ротора в зависимости от частоты тока в нем. Наиболее полно этот вопрос нашел аналитическое решение в работе [5], хотя речь в ней идет о синхронных двигателях с массивным ротором, но результаты можно распространить и на синхронные генераторы малой мощности, так как асинхронный пуск в обеих машинах происходит идентично.

В [5] предлагается активное сопротивление массивного ротора изменять по следующему выражению:

$$r_r = r_{r_s=0} + (r_{r_s=1} - r_{r_s=0})\sqrt{s}, \quad (1)$$

где $r_{r_s=0}$ – активное сопротивление ротора при скольжении $s=0$ и закороченной накоротко обмотке возбуждения; $r_{r_s=1}$ – активное сопротивление ротора при $s=1$ также при закороченной обмотке возбуждения. В [5], как и, например в [6], определяется статическая характеристика асинхронного момента, т.е. на ее основе определяется пуск электрической машины. Для более точного представления режима пуска синхронных машин с массивным ротором необходимо учесть влияние переходных процессов при пуске.

Исходя из этого цель статьи — математическое моделирование синхронных машин с массивным ротором и исследование динамических режимов их работы при прямом асинхронном пуске.

За основу математической модели предлагается принять уравнения синхронных машин, записанные в трехфазной системе координат, в осях α_r , β_r , γ_r , вращающихся со скоростью ротора ω_r синхронной машины. Необходимо отметить, что эти уравнения нетрудно получить из уравнений трехфазной модели машины двойного питания, записанных в тех же осях, вращающихся со скоростью ротора машины [7]. И это можно осуществить, так как синхронная машина с массивным ротором — это симметричная в магнитном отношении электрическая машина, ротор которой выполнен неявнополюсным, т.е. воздушный зазор практически остается неизменным по всему периметру ротора.

С учетом сказанного уравнения синхронных машин с массивным ротором в трехкоординатной (трехфазной) системе в развернутой форме будут иметь вид:

$$p\Psi_{s\alpha} = U_{s\alpha} \sin\theta + \frac{1}{\sqrt{3}}\omega_r(\Psi_{s\beta} - \Psi_{s\gamma}) - r_s i_{s\alpha};$$

$$p\Psi_{s\beta} = U_{s\beta} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{\sqrt{3}}\omega_r(\Psi_{s\gamma} - \Psi_{s\alpha}) - r_s i_{s\beta};$$

$$\begin{aligned}
 p\Psi_{sy} &= U_{sy} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \omega_r (\Psi_{s\alpha} - \Psi_{s\beta}) - r_s i_{sy}; \\
 p\Psi_f &= U_f - r_f i_f; \\
 p\Psi_{r\alpha} &= 0 - r_r i_{r\alpha}; \\
 p\Psi_{r\beta} &= 0 - r_r i_{r\beta}; \\
 p\Psi_{r\gamma} &= 0 - r_r i_{r\gamma}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Система уравнений (2) описывает баланс напряжений в статорных и роторных контурах машины. При этом имеется в виду, что на статоре расположены три симметричные обмотки сдвинутые в пространстве на 120°, а на роторе — четыре обмотки: одна обмотка возбуждения и три демпферные (пусковые) обмотки, эквивалентирующие массивный ротор машины, при этом условимся считать, что ось обмотки возбуждения совпадает с осью демпферной обмотки, расположенной по оси α .

Тогда уравнения связи между потокосцеплениями и токами предстанут в виде:

$$\begin{aligned}
 \Psi_{s\alpha} &= x_s i_{s\alpha} - 0,5x_m i_{s\beta} - 0,5x_m i_{sy} + x_m i_f + \\
 &+ x_m i_{r\alpha} - 0,5x_m i_{r\beta} - 0,5x_m i_{r\gamma}; \\
 \Psi_{s\beta} &= -0,5x_m i_{s\alpha} + x_s i_{s\beta} - 0,5x_m i_{sy} - \\
 &- 0,5x_m i_f - 0,5x_m i_{r\alpha} + 0,5x_m i_{r\beta} - x_m i_{r\gamma}; \\
 \Psi_{sy} &= -0,5x_m i_{s\alpha} - 0,5x_m i_{s\beta} + x_s i_{sy} - \\
 &- 0,5x_m i_f - 0,5x_m i_{r\alpha} - 0,5x_m i_{r\beta} + x_m i_{r\gamma}; \\
 \Psi_f &= x_m i_{s\alpha} - 0,5x_m i_{s\beta} - 0,5x_m i_{sy} + x_f i_f + \\
 &+ x_m i_{r\alpha} - 0,5x_m i_{r\beta} - 0,5x_m i_{r\gamma}; \\
 \Psi_{r\alpha} &= x_m i_{s\alpha} - 0,5x_m i_{s\beta} - 0,5x_m i_{sy} + x_m i_f + \\
 &+ x_r i_{r\alpha} - 0,5x_m i_{r\beta} - 0,5x_m i_{r\gamma}; \\
 \Psi_{r\beta} &= -0,5x_m i_{s\alpha} + x_m i_{s\beta} - 0,5x_m i_{sy} - \\
 &- 0,5x_m i_f - 0,5x_m i_{r\alpha} + x_r i_{r\beta} - 0,5x_m i_{r\gamma}; \\
 \Psi_{r\gamma} &= -0,5x_m i_{s\alpha} - 0,5x_m i_{s\beta} + x_m i_{sy} - \\
 &- 0,5x_m i_f - 0,5x_m i_{r\alpha} - 0,5x_m i_{r\beta} + x_r i_{r\gamma}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

В (2) и (3): $\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}, \Psi_{sy}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{sy}$ — потокосцепления и токи статорных обмоток; $\Psi_f, \Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}, \Psi_{r\gamma}, i_f, i_{r\alpha}, i_{r\beta}, i_{r\gamma}$ — потокосцепления и токи роторных контуров, причем Ψ_f и $\Psi_{r\alpha}$ расположены по оси ротора α_r ; r_γ — активное сопротивление, эквивалентирующее роторные контуры; x_s, x_r, x_f — индуктивные сопротивления (в отн. ед. они рав-

ны индуктивностям) обмоток статора, демпферных и обмотки возбуждения ротора; x_m — сопротивления взаимной индукции между статорными и роторными контурами (т.е. в отн. ед. взаимной индуктивности).

Связь между токами и потокосцеплениями определяется с помощью обратной матрицы по соотношениям:

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{sy} \\ i_f \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \\ i_{r\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s - 0,5x_m - 0,5x_m + x_m + x_m - 0,5x_m - 0,5x_m \\ -0,5x_m + x_s - 0,5x_m - 0,5x_m - 0,5x_m + x_m - 0,5x_m \\ -0,5x_m - 0,5x_m + x_s - 0,5x_m - 0,5x_m + 0,5x_m + x_m \\ x_m - 0,5x_m - 0,5x_m + x_f + x_m - 0,5x_m - 0,5x_m \\ x_m - 0,5x_m - 0,5x_m + x_m + x_r - 0,5x_m - 0,5x_m \\ -0,5x_m + x_m - 0,5x_m - 0,5x_m - 0,5x_m + x_r - 0,5x_m \\ -0,5x_m - 0,5x_m + x_m - 0,5x_m - 0,5x_m - 0,5x_m + x_r \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Psi_{s\alpha} \\ \Psi_{s\beta} \\ \Psi_{sy} \\ \Psi_f \\ \Psi_{r\alpha} \\ \Psi_{r\beta} \\ \Psi_{r\gamma} \end{bmatrix}. \tag{4}$$

К уравнениям (2), (3) и (4) добавляются уравнения электромагнитного момента [8], движения и скольжения:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{ЭМ}} &= p_m \frac{\sqrt{3}}{2} x_m [(i_{s\alpha} i_{r\gamma} + i_{s\beta} i_{r\alpha} + i_{s\beta} i_f + i_{sy} i_{r\beta}) - \\
 &- (i_{s\alpha} i_{r\beta} + i_{s\beta} i_{r\gamma} + i_{sy} i_{r\alpha} + i_{sy} i_f)]; \\
 p\theta &= 1 - \omega_r = s;
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$p\omega_r = \frac{p_m}{J} (m_{\text{ЭМ}} - m_T),$$

где p_m — число пар полюсов; $s = p\theta$ — скольжение; J — момент инерции движущихся частей.

Уравнения (4) в развернутой форме предстанут в виде:

$$\begin{aligned}
 i_{s\alpha} &= k_{s\alpha 1} \Psi_{s\alpha} + k_{s\alpha 2} \Psi_{s\beta} + k_{s\alpha 3} \Psi_{s\gamma} + k_{s\alpha 4} \Psi_f + \\
 &+ k_{s\alpha 5} \Psi_{r\alpha} + k_{s\alpha 6} \Psi_{r\beta} + k_{s\alpha 7} \Psi_{r\gamma}; \\
 i_{s\beta} &= k_{s\beta 1} \Psi_{s\alpha} + k_{s\beta 2} \Psi_{s\beta} + k_{s\beta 3} \Psi_{s\gamma} + k_{s\beta 4} \Psi_f + \\
 &+ k_{s\beta 5} \Psi_{r\alpha} + k_{s\beta 6} \Psi_{r\beta} + k_{s\beta 7} \Psi_{r\gamma}; \\
 i_{s\gamma} &= k_{s\gamma 1} \Psi_{s\alpha} + k_{s\gamma 2} \Psi_{s\beta} + k_{s\gamma 3} \Psi_{s\gamma} + k_{s\gamma 4} \Psi_f + \\
 &+ k_{s\gamma 5} \Psi_{r\alpha} + k_{s\gamma 6} \Psi_{r\beta} + k_{s\gamma 7} \Psi_{r\gamma}; \\
 i_f &= k_{f 1} \Psi_{s\alpha} + k_{f 2} \Psi_{s\beta} + k_{f 3} \Psi_{s\gamma} + k_{f 4} \Psi_f + \\
 &+ k_{f 5} \Psi_{r\alpha} + k_{f 6} \Psi_{r\beta} + k_{f 7} \Psi_{r\gamma}; \\
 i_{r\alpha} &= k_{r\alpha 1} \Psi_{s\alpha} + k_{r\alpha 2} \Psi_{s\beta} + k_{r\alpha 3} \Psi_{s\gamma} + k_{r\alpha 4} \Psi_f + \\
 &+ k_{r\alpha 5} \Psi_{r\alpha} + k_{r\alpha 6} \Psi_{r\beta} + k_{r\alpha 7} \Psi_{r\gamma}; \\
 i_{r\beta} &= k_{r\beta 1} \Psi_{s\alpha} + k_{r\beta 2} \Psi_{s\beta} + k_{r\beta 3} \Psi_{s\gamma} + k_{r\beta 4} \Psi_f + \\
 &+ k_{r\beta 5} \Psi_{r\alpha} + k_{r\beta 6} \Psi_{r\beta} + k_{r\beta 7} \Psi_{r\gamma}; \\
 i_{r\gamma} &= k_{r\gamma 1} \Psi_{s\alpha} + k_{r\gamma 2} \Psi_{s\beta} + k_{r\gamma 3} \Psi_{s\gamma} + k_{r\gamma 4} \Psi_f + \\
 &+ k_{r\gamma 5} \Psi_{r\alpha} + k_{r\gamma 6} \Psi_{r\beta} + k_{r\gamma 7} \Psi_{r\gamma}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Коэффициенты $k_{s\alpha 1} \div k_{r\gamma 7}$ определяются из обратной матрицы параметров машины (4).

Таким образом, сопоставляя эти уравнения с уравнениями машины двойного питания, приведенными в [7], можно отметить, что структура их практически неизменна, но дополнительно учиты-

вается действие обмотки возбуждения, которую предлагается разместить на одной оси с демпферной (пусковой) обмоткой, на оси α . Естественно, она также учитывается в уравнениях роторных потокоцеплений и электромагнитного момента.

Еще раз необходимо подчеркнуть, как это было отмечено в [7, 8], что использовать трехфазную модель необходимо только в крайних случаях, когда необходимо внести дополнительную ясность в вопросы, которые невозможно (либо трудно) исследовать в двухкоординатных моделях. Например таких, как несимметричные режимы в роторных цепях и т.п.

В данном случае на предложенной модели проводится исследование пусковых режимов и режимов втягивания в синхронизм синхронных машин с массивным ротором — формирование асинхронных пусковых моментов с эквивалентированием массивного ротора этих машин, а также наброс нагрузки в синхронном режиме.

На рис. 1, а–в представлены соответственно флюктограммы изменения частоты вращения ω_r ротора, электромагнитного момента $m_{\text{ЭМ}}$ и тока возбуждения i_f модельного синхронного генератора, параметры которого приведены в Приложении а). На рис. 1, г изображена развернутая флюктограмма пускового момента $m_{\text{ЭМ}}$. Флюктограммы получены при сопротивлении ротора, эквивалентирующего массивный ротор, по [5]:

$$r_r = r_{r_s=0} + r_{r_s=1} - r_{r_s=0} \sqrt{s}. \quad (7)$$

Для исследуемого генератора $r_{r_s=0} = 0,01$ — активное сопротивление ротора при $s=0$;

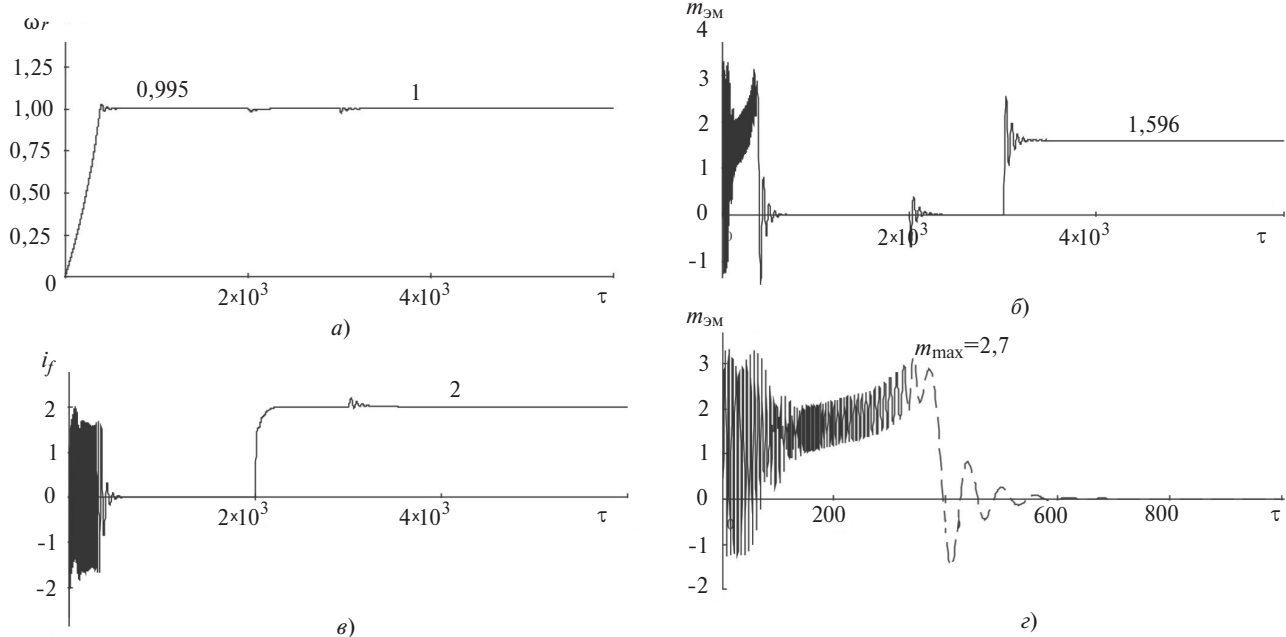


Рис. 1. Флюктограммы изменения режимных параметров эквивалентирующего массивный ротор сопротивления $r_r = 0,01 + 0,04 \sqrt{1 - \omega_r}$

$r_{r_{s=1}} = 0,05$ – активное сопротивление ротора при $s=1$; $s = (1 - \omega_r)$ – скольжение, т.е. $r_r = 0,01 + 0,04\sqrt{1 - \omega_r}$.

После асинхронного пуска при 2000 рад подается напряжение на обмотку возбуждения, машина втягивается в синхронизм, а при 3000 рад скачкообразно возникает момент сопротивления, равный номинальному моменту машины ($m_H = 1,596$).

На рис. 2,а–г в такой же последовательности представлены флюктограммы этих режимных параметров при эквивалентировании массивного рото-

ра активным сопротивлением, которое меняется в зависимости от скольжения по линейному закону:

$$r_r = 0,01 + 0,04(1 - \omega_r). \quad (8)$$

Наконец, на рис. 3,а–г и рис. 4,а–г представлены флюктограммы при неизменных значениях r_r , соответственно равных $r_{r_{s=1}} = 0,05$ и $r_{r_{s=0}} = 0,01$.

Прежде чем приступить к анализу флюктограмм, необходимо отметить следующее. Реализация на компьютере выражения (7) внесет значительную погрешность, так как из-за наличия даже малого

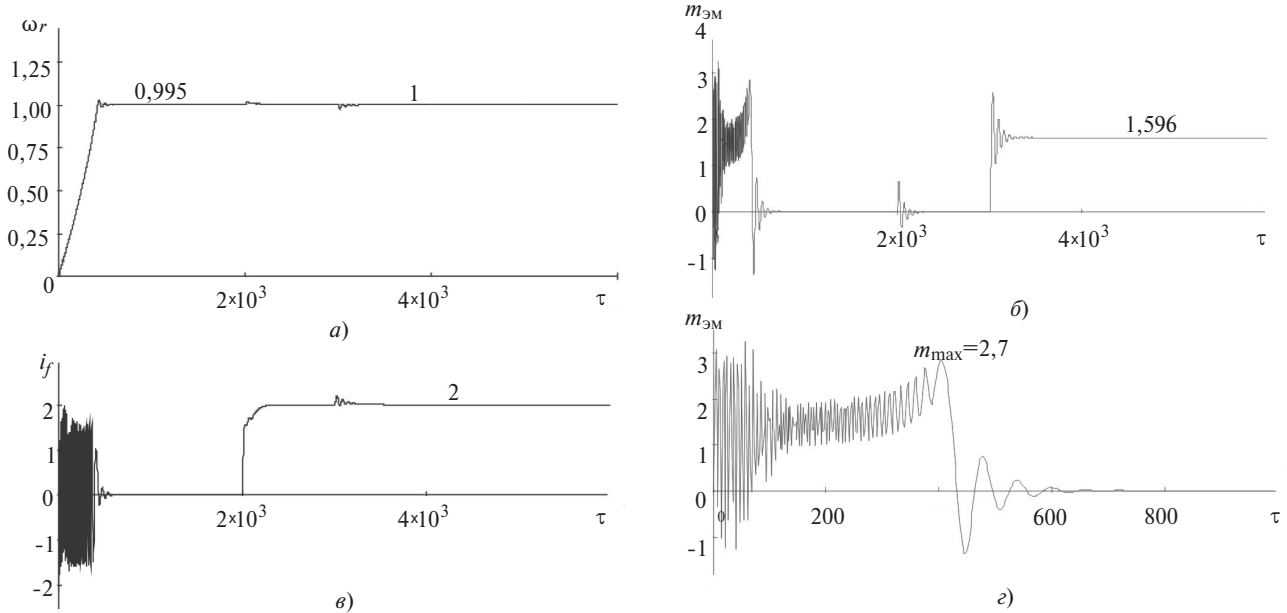


Рис. 2. Флюктограммы изменения режимных параметров при эквивалентировании массивного ротора активным сопротивлением, которое меняется в зависимости от скольжения по линейному закону

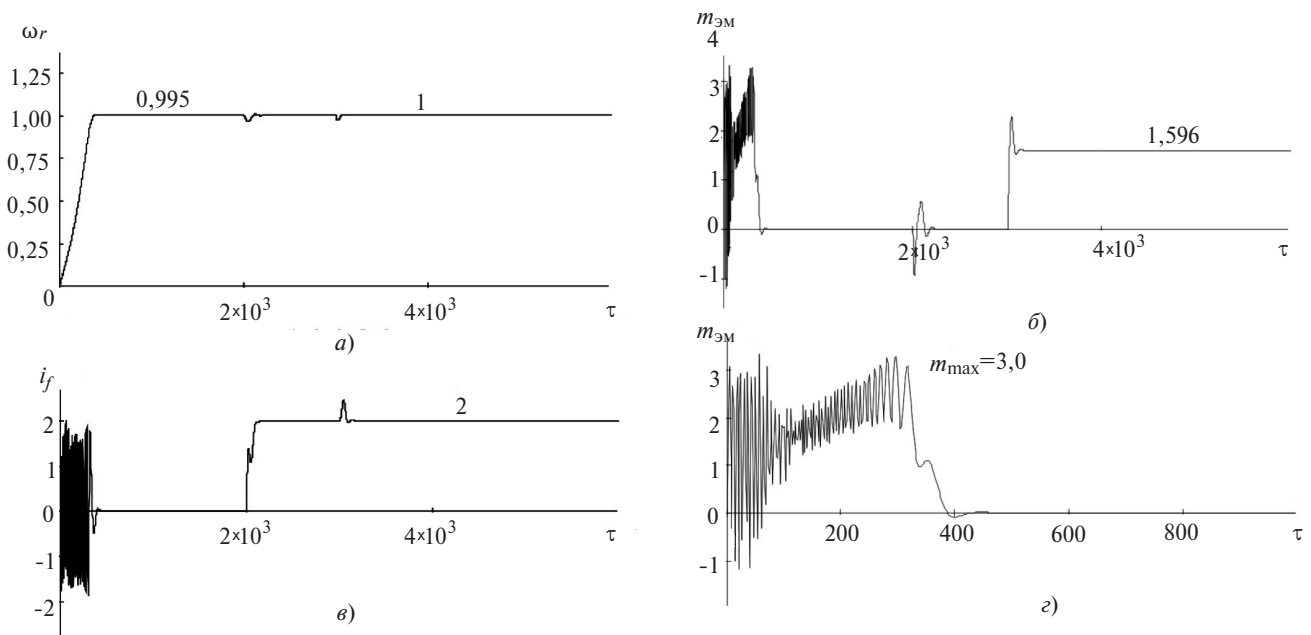


Рис. 3. Флюктограммы изменения режимных параметров при эквивалентировании массивного ротора активным сопротивлением, равным $r_{r_{s=1}} = 0,05$

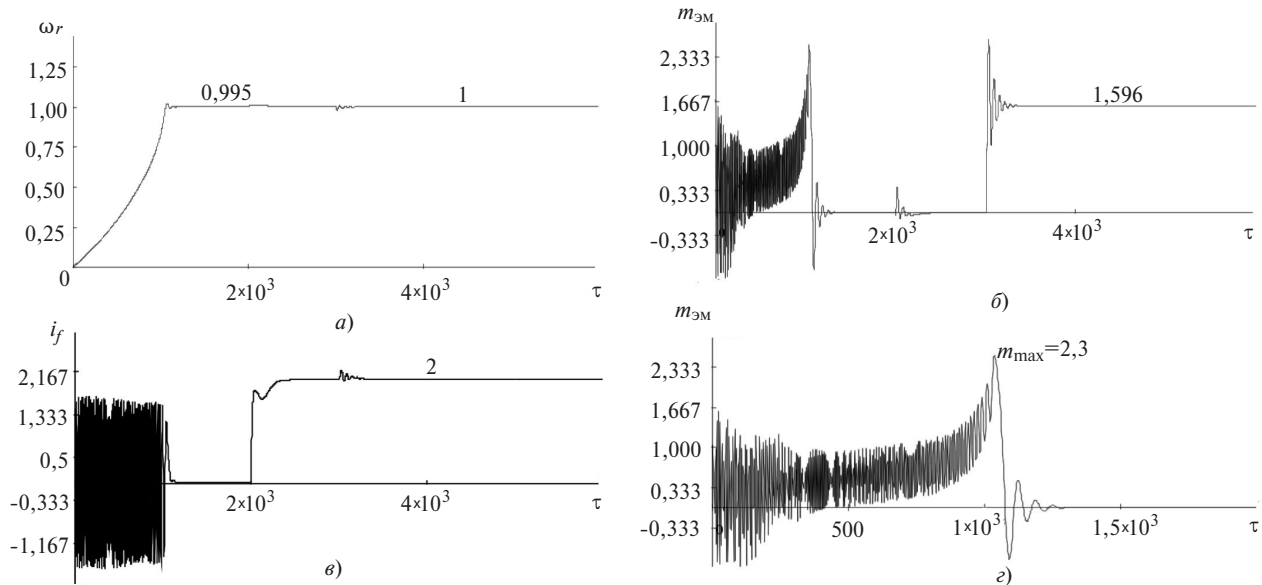


Рис. 4. Флуктограммы изменения режимных параметров при эквивалентировании массивного ротора активным сопротивлением, равным $r_{r_s=0}=0,01$

скольжения после завершения асинхронного пуска (в приведенном примере $s_{уст} = 0,005$ подкоренное выражение будет равно $\sqrt{s} = 0,071$, т.е. выражение (7) после пуска будет равно не $r_{r_s=0} = 0,01$, а $r_{r_s=0} = 0,0128$ (т.е. погрешность составит 28%). При использовании выражения (8) также будет погрешность, но она не превысит 2%, что вполне допустимо. Поэтому предлагается моделировать выражение (7) кусочно-линейной аппроксимацией, т.е. в диапазоне изменения ω_r от 0 до 0,8, представлять r_r линейной зависимостью вида $r_r = 0,05 - 0,0275\omega_r$, а в диапазоне изменения ω_r от 0,8 до 1 — $r_r = 0,1 - 0,09\omega_r$. При этом максимальная погрешность не превысит 12%. Таким образом, флуктограммы рис. 1 получены именно на базе кусочно-линейной аппроксимации (см. (7)).

Сопоставительный анализ флуктограмм показывает следующее. Процесс пуска является динамическим процессом, т.е. время разгона не может определяться только статической характеристикой асинхронного момента синхронной машины, так как при пуске активное участие принимает кинетическая энергия вращающихся масс агрегата совместно с ротором синхронной машины. Однако эта характеристика необходима, так как с ее помощью уточняются два важных параметра пусковой характеристики — эквивалентные активные сопротивления ротора при скольжениях $s=0$ и 1.

Развернутые флуктограммы электромагнитного момента $m_{эм}$ на рис. 1 и 2 по средним значениям пусковых $m_{п1}$ и максимальных m_{max} моментов практически совпадают $m_{п1} = m_{п2} \approx 1,1$ ($\sim 0,7m_H$) $\times m_{max1} = m_{max2} = 2,7$ ($\sim 1,7m_H$), время пуска при изменении r_r по выражениям (7) и (8) также одина-

ково и равно $\tau_{п} \sim 600$ рад. На флуктограммах рис. 3 и 4 при постоянных значениях $r_r = r_{r_s=1} = 0,05$ и $r_r = r_{r_s=0} = 0,01$ средние значения пускового момента соответственно равны $m_{п3} \approx 1,25$ и $m_{п4} \approx 0,4$, а максимальных моментов $m_{max3} = 3$ и $m_{max4} = 2,3$, время пуска соответственно равно $\tau_{п3} = 400$ рад и $\tau_{п4} = 1250$ рад. Варианты рис. 3 и 4 не могут отражать реальную динамику пускового режима синхронной машины.

Таким образом, сопоставительный анализ флуктограмм показывает: так как варианты рис. 1 и 2 по динамическому пусковому моменту практически совпадают, то с учетом простоты реализации необходимо остановиться на 2-м варианте, когда сопротивление r_r меняется линейно в функции скольжения (8).

Анализ синхронного режима флуктограмм (напомним, что при 2000 рад обмотка возбуждения размыкается и подключается к источнику питания, машина входит в синхронизм $\omega_r = 1$, а при 3000 рад возникает скачкообразно момент сопротивления, равный номинальному моменту машины $m_H = 1,596$) показывает, что при набросе на синхронный двигатель номинальной нагрузки (рис. 1, 2 и 4) процессе установления момента после переходного режима на всех вышеуказанных флуктограммах практически одинаков (т.е. максимальный вылет и число качаний одинаково). Это, естественно, подтверждает адекватность модели, так как в этом режиме синхронная машина «работает» с установленным значением эквивалентного активного сопротивления ротора, равного $r_r = r_{r_s=0}$ (для исследуемого модельного двигателя $r_{r_s=0} = 0,01$).

На рис. 3 процесс наброса нагрузки носит почти апериодический характер. Это несуществующий в действительности режим, так как эквивалентное сопротивление ротора принято равным $r_r = r_{r_s} = 1$ (что в расчетах приводит к неправильным результатам как в асинхронном, так и в синхронном режимах синхронной машины).

Приложение

а) Параметры модельного генератора:

| | | |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $x_s = x_d = x_q = 2,78$ отн. ед. | $U_{\text{баз}} = 310$ В | $r_f = 0,03$ отн. ед. |
| $x_m = 2,69$ отн. ед. | $I_{\text{баз}} = 30,44$ А | $r_s = 0,045$ отн. ед. |
| $x_r = x_{dr} = x_{qr} = 2,82$ отн. ед. | $R_{\text{баз}} = 10,2$ Ом | $r_{r_s} = 0 = 0,01$ отн. ед. |
| $x_f = 3$ отн. ед. | $\Psi_{\text{баз}} = 0,987$ Ве | $r_{r_1} = 0,05$ отн. ед. |
| | | $r_r = 0,01 + 0,04 \times$ $\times \sqrt{1 - \omega_r}$ отн. ед. |
| $J_{\text{об}} = 0,3$ кгм ² | $p_{\text{баз}} = 14,15$ кВт | $r_{r2} = 0,01 + (0,05 -$ $- 0,01)(1 - \omega)$ отн. ед. |
| $J_{\text{баз}} = \frac{M_{\text{баз}}}{\omega_{\text{баз}}^2} = 0,00046$ | $\omega_{\text{баз}} = 314$ | $r_{r3} = r_{r_1} = 0,0545$ отн. ед. |
| $LJ^* = \frac{J}{J_{\text{баз}}} = \frac{0,3}{0,0006} = 656,5$ | $M_{\text{баз}} = 45,1$ Н·м | $r_{r4} = r_{r_s} = 0 = 0,01$ отн. ед. |
| $U_{\text{фи}} = 0,06$ отн. ед. | $p_m = 1$ | |

б) Уравнения трехфазной модели модельного синхронного генератора:

$$p\Psi_{s\alpha} = 1 \sin\theta + 0,577\omega_r (\Psi_{s\beta} - \Psi_{s\gamma}) - 0,045i_{s\alpha};$$

$$p\Psi_{s\beta} = 1 \sin(\theta - 2,09) + 0,577\omega_r (\Psi_{s\gamma} - \Psi_{s\alpha}) - 0,045i_{s\beta};$$

$$p\Psi_{s\gamma} = 1 \sin(\theta + 2,09) + 0,577\omega_r (\Psi_{s\alpha} - \Psi_{s\beta}) - 0,045i_{s\gamma};$$

$$p\Psi_f = U_f - 0,03i_f;$$

$$p\Psi_{r\alpha} = 0 - r_m i_{r\alpha};$$

$$p\Psi_{r\beta} = 0 - r_m i_{r\beta};$$

$$p\Psi_{r\gamma} = 0 - r_m i_{r\gamma};$$

$$p\omega_r = \frac{1}{656,46} (m_{\text{эм}} - m_{\text{в}}) = 0,0015(m_{\text{эм}} - m_{\text{в}});$$

$$p\theta = s = 1 - \omega_r;$$

$$i_{s\alpha} = 7,689\Psi_{s\alpha} + 2,108\Psi_{s\beta} + 2,108\Psi_{s\gamma} - 1,165\Psi_f -$$

$$- 2,856\Psi_{r\alpha} + 1,428\Psi_{r\beta} + 1,428\Psi_{r\gamma};$$

$$i_{s\beta} = 2,108\Psi_{s\alpha} + 7,346\Psi_{s\beta} + 2,451\Psi_{s\gamma} + 0,582\Psi_f +$$

$$+ 1,428\Psi_{r\alpha} - 3,088\Psi_{r\beta} + 1,66\Psi_{r\gamma};$$

$$i_{s\gamma} = 2,108\Psi_{s\alpha} + 2,451\Psi_{s\beta} + 7,346\Psi_{s\gamma} + 0,582\Psi_f +$$

$$+ 1,428\Psi_{r\alpha} + 1,66\Psi_{r\beta} - 3,088\Psi_{r\gamma};$$

$$i_f = -1,165\Psi_{s\alpha} + 0,582\Psi_{s\beta} + 0,582\Psi_{s\gamma} + 2,968\Psi_f -$$

$$- 0,789\Psi_{r\alpha} + 0,395\Psi_{r\beta} + 0,395\Psi_{r\gamma};$$

$$i_{r\alpha} = -2,856\Psi_{s\alpha} + 1,428\Psi_{s\beta} + 1,428\Psi_{s\gamma} - 0,789\Psi_f +$$

$$+ 6,13\Psi_{r\alpha} + 0,967\Psi_{r\beta} + 0,967\Psi_{r\gamma};$$

$$i_{r\beta} = 1,428\Psi_{s\alpha} - 3,088\Psi_{s\beta} + 1,66\Psi_{s\gamma} + 0,395\Psi_f +$$

$$+ 0,967\Psi_{r\alpha} + 5,972\Psi_{r\beta} + 1,125\Psi_{r\gamma};$$

$$i_{r\gamma} = 1,428\Psi_{s\alpha} + 1,66\Psi_{s\beta} - 3,088\Psi_{s\gamma} + 0,395\Psi_f +$$

$$+ 0,967\Psi_{r\alpha} + 1,125\Psi_{r\beta} + 5,972\Psi_{r\gamma};$$

$$m_{\text{эм}} = 2,3[(i_{s\alpha}i_{r\gamma} + i_{s\beta}i_{r\alpha} + i_{s\gamma}i_f + i_{s\gamma}i_{r\beta}) -$$

$$- (i_{s\alpha}i_{r\beta} + i_{s\beta}i_{r\gamma} + i_{s\gamma}i_{r\alpha} + i_{s\gamma}i_f)],$$

где r_m – эквивалентирующее сопротивление роторных контуров, принимающее значение r_{r1} (рис. 1), r_{r2} (рис. 2), r_{r3} (рис. 3) и r_{r4} (рис. 4).

Выводы. 1. Предложена трехкоординатная (трехфазная) цифровая модель синхронных машин с массивным ротором, позволяющая в одной структуре исследовать асинхронные и синхронные режимы работы этих машин.

2. В пусковом и синхронном режимах работы практически без погрешности можно представить формулу для эквивалентного активного сопротивления ротора, изменяющегося в функции от скольжения линейным выражением (8).

3. При исследовании только синхронных режимов работы этих машин достаточно активное сопротивление массивного ротора эквивалентировать постоянным значением, равным $r_r = r_{r_s} = 0$, т.е. колебания скольжения в этом режиме не влияют на среднее значение этого сопротивления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И. Электрические машины. 2-е изд. Л.: Энергия, 1974, 830 с.
2. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. 4-е изд. М.: Академия, 2013, 320 с.
3. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. Л.; М.: Госэнергоиздат, 1950, 550 с.
4. Raul Garduno-Ramirez., Ricardo Guevera-Gordillo. Modeling and Simulation of a Combustion Turbogenerator for Control Analysis and Design. — IFAC Proceedings, vol. 42, iss. 9, 2009, pp. 320–326.
5. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей, 4-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1984, с. 239.
6. Сивкобыленко В.Ф., Павлюков В.А. Расчёт параметров схем замещения и пусковых характеристик глубоководных асинхронных машин. — Электричество, 1979, № 10, с. 35–39.
7. Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г. Математические модели управляемых трехфазных асинхронных машин. — Электричество, 2016, № 5, с. 59–66.

8. **КОПЫЛОВ И.Г.** Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1987, 248 с.

[15.01.2020]

А в т о р ы: **Мустафаев Рауф Исмаил оглы** — доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник отдела «Перспективное развитие электро-

энергетики» Азербайджанского НИПИИ энергетики, Баку.

Гасанова Ляман Гасан гызы, кандидат техн. наук, доцент, старший научный сотрудник отдела «Перспективное развитие электроэнергетики» Азербайджанского НИПИИ энергетики, Баку.

Electrichestvo, 2020, No. 8, pp. 44–50

DOI:10.24160/0013-5380-2020-8-44-50

Modeling and Research of Start-UP and Operation of Synchronous Machines with a Massive Rotor

MUSTAFAEV Rauf Ismail ogly (Azerbaijan Scientific-Research Design Institute of Power Engineering (ASRDIPE), Baku, Azerbaijan) — Professor, Chief Scientist, Dr. Sci. (Eng.)

GASANOVA Lyaman Gasan gyzy (ASRDIPE, Baku, Azerbaijan) — Associate Professor, Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

The article presents a procedure for analyzing the performance of a frequency controlled induction machine in the case of using a scalar control algorithm with keeping the power losses in the machine itself to a minimum and maintaining constant overload capacity and magnetic flux. The essence of the proposed procedure consists in combining the calculated values of machine parameter obtained from its mathematical model in the case of using frequency control with the analytical expressions characterizing the power loss components. As a result, it becomes possible to determine not only the total power losses in a frequency controlled induction machine, but also shanges in its other operating parameters, the reactive power absorbed from the being the most important one of them. It has been found that with these parameters, i.e., the total power losses in the machine and the absorbed reactive power duly taken into account, in is most expedient to use a control algorithm maintaining constant overloading capacity and magnetic flux at a constant torque on the machine shaft. With the machine shaft torque being of a windage type as determined from the power losses taken in combination with the absorbed reactive power, the best performance is achieved in using the machine control law maintaining its constant averloading capacity: $kus=kn kfs wr$.

К e y w o r d s: induction machine with a squirrel-cage rotorm, mathematical model, driving torque, scalar frequency control, minimum power losses, constant overloading capacity, constant magnetic flux

REFERENCES

1. **Vol'dek A.I.** *Elektricheskiye mashiny. 2-ye izd.* (Electric cars. 2nd ed.). L.: Energiya, 1974, 830 p.
2. **Bespalov V.Ya., Kotelenets N.F.** *Elektricheskiye mashiny. 4-ye izd.* (Electrical cars. 4th ed). M.: Akademiya, 2013, 320 p.
3. **Gorev A.A.** *Perekhodnyye protsessy sinkhronnoy mashiny* (Transients of a synchronous machine). L.; M.: Gosenergoizdat, 1950, 550 p.
4. **Raul Garduno-Ramirez., Ricardo Guevera-Gordillo.** Modeling and Simulation of a Combustion Turbogenerator for Control Analysis and Design. — IFAC Proccedings, vol. 42, iss. 9, 2009, pp. 320–326.

5. **Syromyatnikov I.A.** *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigateley. 4-ye izd.* (Transients of a synchronous machine). M.: Energoatomizdat, 1984, p. 239.
6. **Sivokobylenko V.F., Pavlyukov V.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1979, No. 10, pp. 35–39.
7. **Mustafaev R.I., Gasanova L.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 5, pp. 59–66.
8. **Kopylov I.G.** *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin* (Mathematical modeling of electrical machines). M.: Vysshaya shkola, 1987, 248 p.

[15.01.2020]