

УДК 621.313.323

Ларин А.М., Ламари Абдессалем

Донецкий государственный технический университет, кафедра ЭС

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

© Ларин А.М., Ламари Абдессалем, 2000

У статті описані математичні моделі електричних машин змінного струму, які побудовано на основі експериментальних частотних характеристик, для дослідження перехідних процесів із урахуванням зміни швидкості обертання роторів.

Распространение в инженерной практике исследования динамических режимов электрических машин переменного тока (ЭМ) получили частотные методы [1–3]. Они дают возможность непосредственно использовать для расчета экспериментальные данные в виде частотных характеристик отдельных элементов или всей системы в целом, не вникая в структуру внутренних взаимосвязей отдельных элементов между собою. В условиях, когда внутренняя структура не определена, такой подход к расчету переходных процессов может дать более точные результаты.

В [1] предложен метод расчета переходных процессов по частотным характеристикам проводимостей синхронной машины (СМ) $Y_d(j\omega)$ и $Y_q(j\omega)$ или круговых токовых диаграмм для асинхронных (АМ) машин. При этом разработаны графо-аналитические способы расчета токов статора и электромагнитного момента. Обладая большей простотой и наглядностью они позволяют проводить уточненные расчеты переходных процессов с учетом таких факторов, как электромагнитная несимметрия ротора, многоконтурность массивных роторов турбогенераторов, насыщение магнитных цепей, наличие дополнительных сопротивлений в обмотке статора. Однако указанные способы не получили в свое время широкого распространения.

Широкое внедрение ПЭВМ, накопление информации о синхронных и асинхронных машинах в форме частотных характеристик, а также развитие методов синтеза эквивалентных схем замещения, адекватно описывающих исходные частотные характеристики, создают предпосылки для усовершенствования и дальнейшего развития частотных методов исследования электромеханических переходных процессов в ЭМ.

Цель этой работы – разработка математических моделей (ЭМ), основанных на экспериментальных статических частотных характеристиках для исследования динамических переходных режимов с учетом изменения скорости вращения ротора.

В [4] получены математические соотношения, реализующие графо-аналитический подход [1] к определению составляющих фазных токов статора и электромагнитного момента вращения при коротких замыканиях или включениях синхронных генераторов в сеть, вращающихся с синхронной скоростью.

При наличии скольжения ротора в момент подключения СМ к сети расчет для отдельных составляющих изображающего вектора тока статора I_s ведется в такой последовательности:

Определяется среднее значение установившегося тока I_{s0cp} для скольжения s в момент включения генератора в сеть

$$I_{s0cp} = Y_{cp}(js)_s, \quad (1)$$

где $Y_{cp}(js) = \frac{Y_d(js) + Y_q(js)}{2}$.

Рассчитывается пульсирующая составляющая установившегося тока

$$\Delta I_{s0} = (\operatorname{Re}[\Delta Y(j\omega)_s] - j \cdot \operatorname{Im}[\Delta Y(j\omega)_s]) \cdot e^{-j2\delta_0}, \quad (2)$$

где $\Delta Y(j\omega) = \frac{Y_d(j\omega) - Y_q(j\omega)}{2}$; δ_0 – угол между поперечной осью ротора и вектором напряжения сети.

Изменение во времени полного установившегося тока статора с учетом различия параметров ротора по осям магнитной и электрической симметрии

$$I_{s0}(t) = (I_{s0cp} + \Delta I_{s0} e^{-j2st}) \cdot e^{j\omega_c t}, \quad (3)$$

Определяется аperiodическая составляющая

$$I_{s1cp} = Y_{cp}(js)_{s=-(1-s)} \quad (4)$$

и периодический ток частоты, близкой к двойной

$$\Delta I_{s1} = (\operatorname{Re}[\Delta Y(j\omega)_{s=-(1-s)}] - j \cdot \operatorname{Im}[\Delta Y(j\omega)_{s=-(1-s)}]) \cdot e^{-j2\delta_0}. \quad (5)$$

Изменение во времени аperiodического тока и тока, обусловленного асимметрией ротора, подчинено закону

$$I_{s1}(t) = -[I_{s1cp} \cdot e^{j\omega_c \cdot \omega_c t} - \Delta I_{s1} \cdot e^{-j2(1-s)\omega_c \cdot \omega_c t}] \cdot e^{-t/T_a}, \quad (6)$$

Собственная частота вращения аperiodического тока ω_c и постоянная времени его затухания определяются по значению среднего комплекса проводимости $Y_{cp}(js)$ для скольжения $s = -(1-s)$.

$$\omega_c = \operatorname{Im}[Y_{cp}(js)_{s=-(1-s)}] \cdot R_{s0}. \quad (7)$$

$$T_a = \frac{1}{\operatorname{Re}[Y_{cp}(js)_{s=-(1-s)}] \cdot R_{s0} \cdot \omega}. \quad (8)$$

Начальное значение переходного периодического тока I_{s2} рассчитывается из условия

$$I_{s0}(t)_{t=0} + I_{s1}(t)_{t=0} + I_{s2}(t)_{t=0} = 0.$$

В общем случае начальное значение вектора тока $I_{s2}(t)_{t=0}$ не совпадает с продольной осью ротора (даже при включениях с углом $\delta_0 = 0$), что соответствует возникновению

апериодических токов в контурах ротора по обеим осям его магнитной симметрии. Следовательно, закон изменения периодического затухающего тока во времени будет таким:

$$I_{s2}(t) = \left(\sum_{k=1}^N I_{s2\ dk} \cdot e^{-t/T_{dk}} + j \sum_{l=1}^M I_{s2\ ql} \cdot e^{-t/T_{ql}} \right) \cdot e^{j \cdot (1-s)\omega \cdot t} e^{j\delta_0}, \quad (9)$$

где $I_{s2\ dk}$, T_{dk} , $I_{s2\ ql}$, T_{ql} – начальные значения и постоянные времени экспоненциальных составляющих, аппроксимирующих огибающие периодических токов соответственно по продольной и поперечной осям; N – количество контуров на роторе по продольной оси; M – то же по поперечной оси.

Значения параметров указанных периодических составляющих тока I_{s2} в условиях дискретного задания частотных характеристик целесообразно рассчитывать с использованием эквивалентных схем замещения, исследование которых приведено в [5]. При совпадении вектора тока $I_{s2}(t)_{t=0}$ с продольной или поперечной осью ротора его затухание будет определяться только параметрами соответствующей схемы замещения

$$\begin{aligned} T_{dk} &= \frac{x_{kD}}{\omega \cdot r_{kD}}, & I_{s2\ dk} &= \frac{1}{x_{kD}}, & k &= 1, 2, \dots, N, \\ T_{ql} &= \frac{x_{lQ}}{\omega \cdot r_{lQ}}, & I_{s2\ ql} &= \frac{1}{x_{lQ}}, & l &= 1, 2, \dots, M. \end{aligned} \quad (10)$$

В общем случае начальные значения продольных и поперечных составляющих тока I_{s2} должны пересчитываться пропорционально проекциям полного вектора указанного тока на продольную (I_{s2d}) и поперечную (I_{s2q}) оси ротора

$$\begin{aligned} I_{s2d} &= \text{mod}[I_{s2}(t)_{t=0}] \cdot \cos(\varphi - \delta_0), \\ I_{s2q} &= \text{mod}[I_{s2}(t)_{t=0}] \cdot \sin(\varphi - \delta_0), \end{aligned} \quad (11)$$

где φ – аргумент вектора тока $I_{s2}(t)_{t=0}$ (угол между вектором тока и осью действительных чисел комплексной плоскости). Тогда

$$\begin{aligned} I_{s2\ dk} &= \frac{1}{x_{kD}} \cdot \frac{I_{s2d}}{\sum \frac{1}{x_{kD}}}, \\ I_{s2\ ql} &= \frac{1}{x_{lQ}} \cdot \frac{I_{s2q}}{\sum \frac{1}{x_{lQ}}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Полный вектор изображающего тока статора представляет собой векторную сумму отдельных составляющих

$$I_s(t) = U \cdot [I_{s0}(t) + I_{s1}(t) + I_{s2}(t)], \quad (13)$$

где U – напряжение на выводах статора в опыте включения невозбужденного генератора в сеть.

Мгновенные значения фазных токов определяются как проекции изображающего вектора на неподвижные оси времени соответствующих фаз

$$i_A(t) = \text{mod}[I_s(t)] \cdot \cos(\alpha(t) + \gamma_0),$$

$$\begin{aligned}
 i_B(t) &= \text{mod}[I_s(t)] \cdot \cos(\alpha(t) + \gamma_o - \frac{2}{3}\pi), \\
 i_C(t) &= \text{mod}[I_s(t)] \cdot \cos(\alpha(t) + \gamma_o + \frac{2}{3}\pi),
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

где $\alpha(t)$ – аргумент полного изображающего вектора тока статора, зависящий от времени.

Для описания динамических свойств асинхронной машины достаточно иметь одну частотную характеристику $Y(j\omega)$. В этом случае в полученных соотношениях будут отсутствовать составляющие токов ΔI_{s0} и ΔI_{s1} . Отпадает также необходимость в разложении на составляющие по осям магнитной симметрии тока I_{s2} .

Электромагнитный момент в соответствии с общим подходом к его определению по значениям комплексов токов и потокосцеплений будет определяться для ЭМ с симметричным или асимметричным ротором выражением

$$M = \text{Re}[j\Psi_s^* \cdot I_s] = \text{Re}[j(\Psi_{s0}^* + \Psi_{s1}^*)(I_{s0}^* + I_{s1}^* + I_{s2}^*)] \tag{15}$$

Потокосцепления в (15) имеют значения

$$\Psi_s = \Psi_{s0} - \Psi_{s1} = e^{j\omega t} - e^{j\omega_c t} e^{-t/T_a} \tag{16}$$

Рассматривая комплексы как векторы, электромагнитный вращающий момент можно представить как сумму векторных произведений составляющих тока на составляющие потокосцеплений. Произведение, например, I_{s0} на Ψ_{s0} даст установившийся вращающий момент, численно равный значению вертикальной проекции вектора тока I_{s0} при номинальном напряжении на выводах статора. Проанализировав влияние отдельных составляющих токов и моментов на характер протекания переходного процесса, можно осуществить упрощение математической модели с заданной точностью.

При исследовании электромеханических переходных процессов, связанных с изменением скорости вращения машины совместно с полученными выше уравнениями, описывающими изменение электрических величин, необходимо рассматривать уравнение движения ротора. Последнее можно записать в таком виде:

$$T_j \frac{ds}{dt} = M - M_{\text{мех}}, \tag{17}$$

где $M_{\text{мех}}$ – внешний механический момент, приложенный к ротору; T_j – механическая постоянная инерции.

При неучете влияния ускорения можно предложить алгоритм расчета переходных процессов с учетом изменения скорости вращения ротора.

- Весь процесс разделяют на ряд равномерных интервалов по времени.
- На каждом интервале в соответствии с (17) находят изменение скольжения

$$\Delta s = \frac{M - M_{\text{мех}}}{T_j} \Delta t.$$

– Установившуюся составляющую тока I_{s0} рассчитывают как при постоянной скорости, подставляя для каждого момента времени действительную скорость вращения ротора в качестве переменного параметра.

- Амплитуду составляющей I_{s1} , затухающей с постоянной времени T_a , рассчитывают для значения скорости в начальный момент времени.
- Собственную частоту вращения ω_c и постоянную T_a пересчитывают по выражениям (7) и (8) в зависимости от изменения скольжения.
- Амплитуду составляющей тока I_{s2} , обусловленной переходными токами в роторных контурах, определяют для значения скольжения в начальный момент времени.
- Скорость вращения тока I_{s2} , учитываемая в (9), изменяется при изменении скольжения.
- Учитывается зависимость от скольжения собственной частоты вращения и постоянной времени затухания потокосцепления Ψ_{s1} в (16).

Необходимым условием для реализации предложенного способа является аналитическое описание исходных частотных характеристик и закона изменения во времени переходной периодической составляющей тока статора. В [5] предложена методика использования для этих целей эквивалентных схем замещения.

Эффективность применения частотных характеристик к анализу динамических режимов исследовалась на примере расчетов переходных процессов

1. Включение в сеть невозбужденного модельного турбогенератора типа МТ-30. Указанный СГ обладает существенно различными динамическими свойствами по осям магнитной симметрии ротора и имеет параметры

$$S_{\text{ном}} = 30 \text{ кВА}; U_{\text{ном}} = 414 \text{ В}; I_{\text{ном}} = 41,8 \text{ А}; x_d = 1,453; x_q = 1,394; R_{s0} = 0.00624.$$

При этом анализировалось влияние значения знака скольжения в момент подключения СМ к сети, а также влияние изменения скорости вращения ротора в переходном режиме.

2. Для турбогенератора типа ТГВ-200 оценивалась погрешность, вносимая в расчет электромеханических переходных процессов упрощением эквивалентных схем замещения, отображающих электромагнитную асимметрию ротора.

3. Для асинхронного электродвигателя типа ДАЗО-1914-10/12А ($P_{\text{ном}} = 1500$ кВт; $I_{\text{ном}} = 204$ А; $U_{\text{ном}} = 6000$ В) были выполнены расчеты электромеханических переходных процессов при пуске из ненагруженного состояния.

Оценка степени достоверности результатов расчетов по предлагаемой в работе методике осуществлялась путем сравнения с соответствующими результатами расчетов, выполненных по алгоритмам, реализующим численное интегрирование полных дифференциальных уравнений Парка-Горева. Частотные характеристики для исследуемых ЭМ определяли по методу затухания постоянного тока в обмотке статора.

Программы, реализующие алгоритмы расчета электромеханических переходных процессов, была разработаны в среде математической системы MathCAD 7.0.

Расчеты зависимости изменения изображающего тока статора и электромагнитного момента вращения при включении невозбужденного модельного генератора МТ-30 в сеть для различных начальных скольжений ротора выполнялись без учета и с учетом изменения скорости вращения ротора после подключения СГ к сети. Постоянство скорости вращения моделировалось путем задания механической постоянной инерции T_j большего значения.

Как следует из сопоставления результатов расчета, выполненных для скольжений 0; 0,01; 0,03; 0,05 и 0,1 о.е., изменение зависимостей изображающего тока статора и электро-

магнитного момента практически совпали с соответствующими расчетами, выполненными по уравнениям Парка-Горева при постоянном скольжении. При этом отличия в максимальных значениях сопоставляемых параметров не превышает 10,4 %. Характер процессов оказался абсолютно идентичным. Это даст возможность утверждать, что электромагнитные процессы отображаются при использовании статических частотных характеристик достаточно точно.

Анализ результатов расчета с учетом изменения скорости вращения ротора после включения СГ в сеть указывает на некоторые отличия в зависимостях изменения параметров динамического режима. На рис.1 для примера показаны результаты расчета переходных процессов при включении в сеть невозбужденного модельного синхронного генератора типа МТ-30 при короткозамкнутом состоянии обмотки возбуждения.

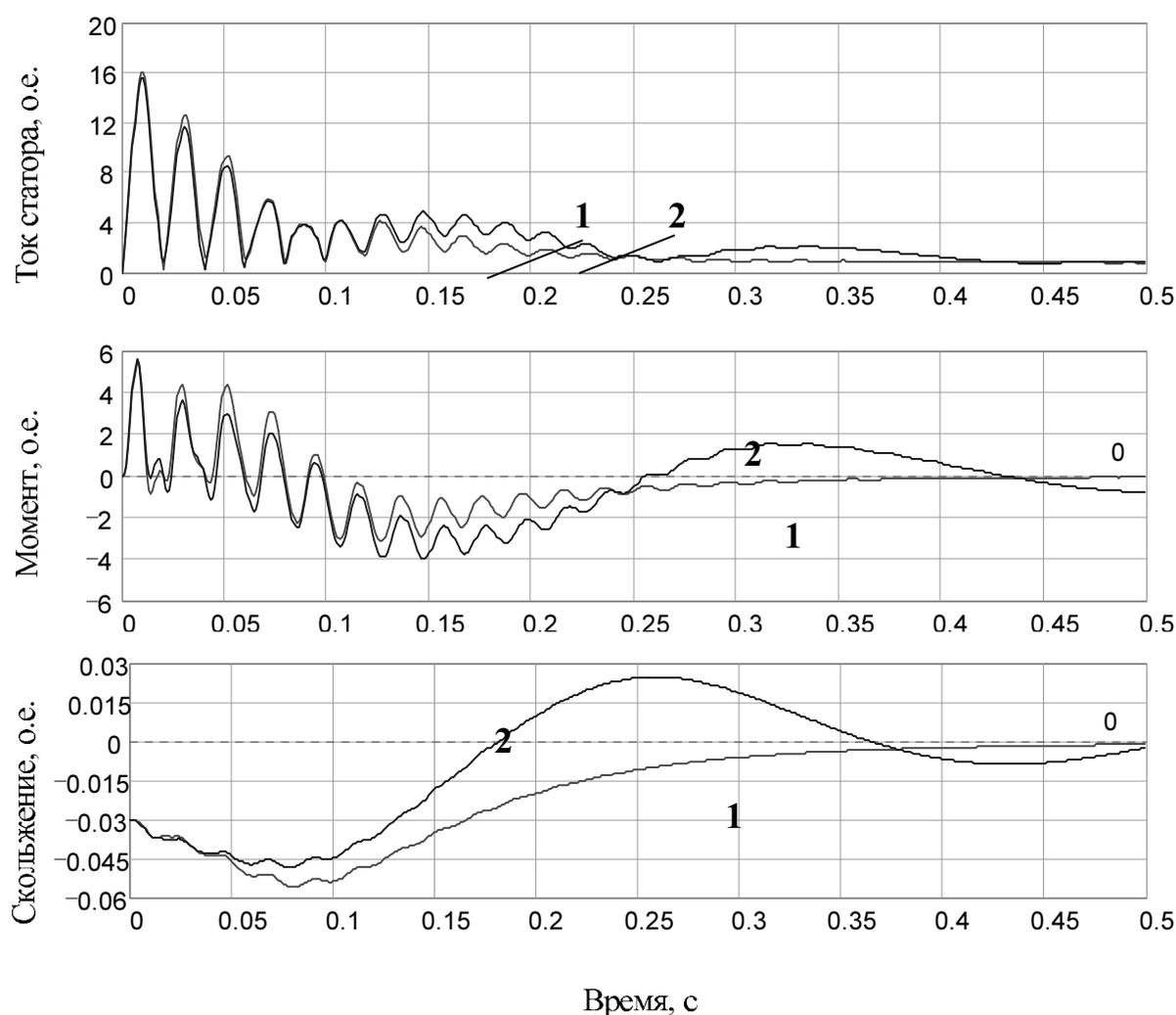


Рис.1. Переходные процессы при включении в сеть невозбужденного модельного синхронного генератора типа МТ-30.

В расчетах, выполненных по уравнениям Парка-Горева (кривые 2), отражается динамика процесса, связанная с изменением токов и электромагнитных моментов при изменении скорости вращения. Изменение скольжения при этом имеет колебательный характер.

Моделирование, использующее статические характеристики (кривые 1), приводит к монотонному изменению скольжения ротора в переходном режиме. Однако общее время приближения скорости к синхронной, оцениваемое по времени второго прохождения скольжения через ноль, практически совпало со временем достижения ротором синхронной скорости, полученное при моделировании по предложенной методике. В целом характер изменения исследуемых параметров режима совпал. Максимальные их значения, возникающие в начальной стадии переходного процесса, практически не отличаются от данных, полученных без учета изменения скорости.

На рис.2 показаны кривые изменения параметров режима при пуске асинхронного двигателя типа ДАЗО–1914–10/12А.

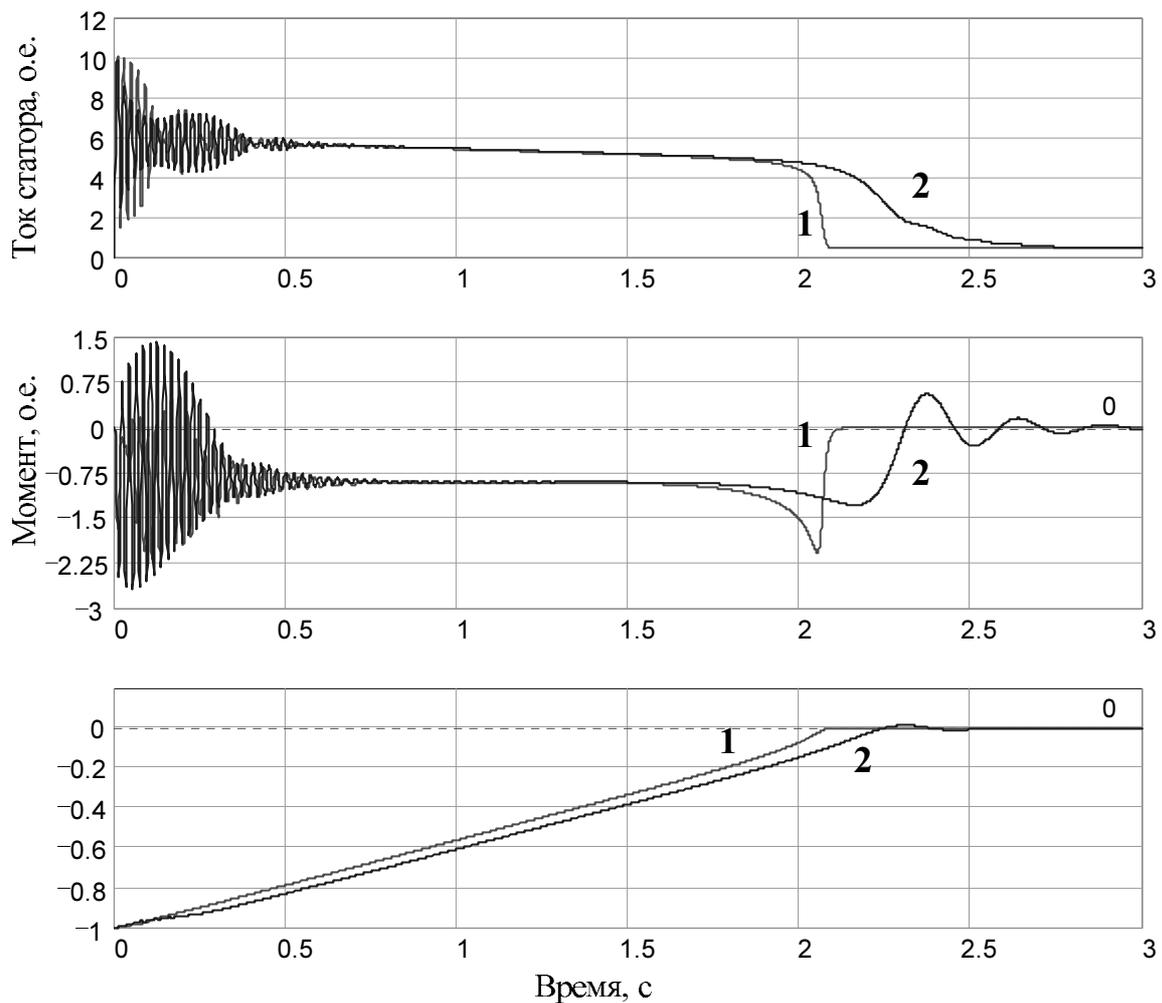


Рис.2. Переходные процессы при пуске ненагруженного асинхронного двигателя типа ДАЗО–1914-10/12А.

Параметры трехконтурной схемы замещения с вынесенной ветвью намагничивания, синтезированные по [6], имеют такие значения (о.е.):

$$X_{\sigma} + X_{\mu} = 2,19; \quad X_1 = 0,271; \quad X_2 = 1,179; \quad X_3 = 0,717;$$

$$R_1 = 0,0055; \quad R_2 = 0,1139; \quad R_3 = 0,624.$$

Сопоставительный анализ результатов расчета, выполненных различными методами, свидетельствует об их удовлетворительном совпадении (с точки зрения длительности процесса пуска). Время пуска, определенное по предложенной методике (кривые 1), отличается от рассчитанного по полным уравнениям Парка-Горева, на 9,2%.

Переходные процессы в течение времени, определяемым протеканием электромагнитных явлений, оказались близкими по характеру и значениям. В интервале времени от 0,5 до 1,8 с параметры исследуемого режима практически совпадают. Это, очевидно, объясняется тем, что изменение скорости вращения ротора происходит с малым ускорением и использование статических характеристик практически не вносит погрешность в динамический процесс. В интервале времени, когда скорость вращения ротора близка к номинальной, в характере изменения тока статора и электромагнитного момента имеются существенные отличия. Исследования показали, что эти отличия уменьшаются при увеличении T_j и коэффициента загрузки двигателя, поскольку в этом случае процессы сопровождаются меньшими ускорениями ротора.

Исследования, выполненные при анализе переходных процессов, вызванных включением невозбужденного турбогенератора типа ТГВ-200 в сеть, для пятиконтурных и трехконтурных эквивалентных схем замещения [5], показали, что погрешности, вносимые сокращением количества контуров в изменения параметров режима в интервале времени области, не превышают погрешностей, в частотной области, и составляют 7...11 %.

Выводы

1. Предложенные математические модели ЭМ, основанные на экспериментальных статических частотных характеристиках, позволяют без решения дифференциальных уравнений исследовать динамические переходные режимы с учетом изменения скорости вращения.

2. Дальнейшее развитие разработанных моделей связано с учетом влияния ускорения ротора и насыщения магнитных цепей.

1. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М., 1962. 2. Применение частотных методов в электроэнергетическом исследовании / Под ред Э.С.Лукашова // Тр. СибНИИЭ. Новосибирск, 1972. Вып. 21. 294 с. 3. Rogozin G.G. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. К., 1992. 4. Ларин А.М., Ларина И.И., Гуедили Фаузи. Упрощенная модель синхронной машины для расчета трехфазных коротких замыканий с учетом многоконтурности и несимметрии ротора // Науч. тр. ДонГТУ. Сер. Электротехника и энергетика. 1999. Вып.4. С.60–64. 5. Ларин А.М., Ламари Абдессалем. Определение параметров схем замещения турбогенераторов, отображающих электромагнитную несимметрию их массивных роторов // Науч. тр. ДонГТУ. Сер. Электротехника и энергетика. 1999. Вып.4. С.65–68. 6. Rogozin G.G., Ларин А.М. Расчет параметров эквивалентных роторных контуров синхронных машин по их экспериментальным частотным характеристикам // Электричество. 1974. № 6. С.10–13.