Часть II
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Глава 4
Моделирование вращающихся машин

§ 4.1. Системы координат

При моделировании могут быть использованы различные системы координат. Фазные координаты *a, b, c* удобны для ввода исходных данных и анализа результатов расчета статики и динамики в трехфазных сетях. Однако системы уравнений, описывающие элементы электрических схем, т. е. математические модели элементов, в этой системе координат получаются весьма громоздкими, сложными, а при наличии в схеме вращающихся машин с коэффициентами, являющимися функциями времени. Поэтому при моделировании многомашинных схем вместо фазных используют другие системы координат [23], которые позволяют упростить запись уравнений вращающихся машин.

Переход от одних координатных осей к другим осуществляется при помощи линейных преобразований. Линейные преобразования уравнений состоят в том, что исходные переменные в уравнениях заменяются новыми переменными, линейно связанными с исходными. Число новых переменных равно числу заменяемых переменных, поэтому для трехфазных электрических схем число переменных в любых координатах должно равняться трем. Например, линейное преобразование фазных токов i_a, i_b, i_c при переходе от фазных координат к некоторым координатам *x, y, z* можно записать в виде

$$\left.\begin{aligned} i_x &= \varsigma_{xa} i_a + \varsigma_{xb} i_b + \varsigma_{xc} i_c, \\ i_y &= \varsigma_{ya} i_a + \varsigma_{yb} i_b + \varsigma_{ya} i_c, \\ i_z &= \varsigma_{za} i_a + \varsigma_{zb} i_b + \varsigma_{zc} i_c. \end{aligned}\right\} \qquad (4.1)$$

Коэффициенты ς называются коэффициентами линейного преобразования.

После введения новых переменных решению подлежат уже видоизмененные уравнения и искомыми становятся новые переменные. Удачный выбор коэффициентов линейного преобразования может существенно упростить решение и исследование новых уравнений. После того, как определены новые переменные, осуществляется обратный переход к исходным переменным и задача оказывается полностью решенной. Для обратного перехода к фазным координатам нужно решить систему уравнений (4.1). Следовательно, для того чтобы между исходными и новыми переменными было однозначное соответствие, определитель, составленный из коэффициентов линейного преобразования, не должен быть равен нулю

$$\begin{vmatrix} \varsigma_{xa} & \varsigma_{xb} & \varsigma_{xc} \\ \varsigma_{ya} & \varsigma_{yb} & \varsigma_{yc} \\ \varsigma_{za} & \varsigma_{zb} & \varsigma_{zc} \end{vmatrix} \neq 0 .$$

Следует заметить, что коэффициенты линейного преобразования могут быть функциями времени, лишь бы определитель системы в любой момент времени не равнялся нулю.

Системы фазных величин могут быть:

- симметричными,
- несимметричными уравновешенными,
- несимметричными неуравновешенными.

Сумма мгновенных значений уравновешенной системы фазных величин равна нулю, а неуравновешенной – не равна нулю. Симметричная система величин является одновременно уравновешенной.

На векторных диаграммах уравновешенная и неуравновешенная системы фазных величин могут быть изображены в виде тройки векторов (токов, напряжений потокосцеплений и др.), проецируемых на линию времени. Система фазных величин, как угодно изменяющаяся во времени, но уравновешенная, может быть представлена проекциями одного изображающего вектора на три фазные координатные оси, сдвинутые на 120 эл. град., поскольку алгебраическая сумма проекций вектора на такие оси всегда равна нулю. В общем случае в переходном режиме изображающий вектор может вращаться с переменной угловой скоростью и изменяться по модулю. Тогда конец вектора при вращении описывает сложную кривую. Для установившихся режимов модуль и скорость вращения изображающего вектора постоянны. Изображающие векторы широко применяются при математическом моделировании.

Неуравновешенную систему фазных величин можно привести к уравновешенной путем выделения нулевой составляющей. Нулевая составляющая является новой независимой переменной, при этом одна из фазных переменных должна быть исключена, поскольку является зависимой от двух других и нулевой составляющей. Например, нулевая составляющая неуравновешенной системы фазных токов равна

$$i_0 = \frac{1}{3}\left(i_a + i_b + i_c\right).$$

Если вычесть из фазных токов нулевую составляющую

$$i_{a'} = i_a - i_0, \quad i_{b'} = i_b - i_0, \quad i_{c'} = i_c - i_0,$$

получим уравновешенную систему токов $i_{a'}, i_{b'}, i_{c'}$, поскольку выполняется условие

$$i_{a'} + i_{b'} + i_{c'} = i_a + i_b + i_c - 3i_0 = 0,$$

причем одну из этих переменных, зависимую от двух других и нулевой составляющей в соответствии с условием уравновешенности системы, необходимо исключить, обычно исключают $i_{c'}$.

Выделение нулевой составляющей является линейным преобразование токов из фазной системы координат *a, b, c* в систему координат $a', b', 0$

$$\left.\begin{aligned} i_{a'} &= \frac{2}{3}i_a - \frac{1}{3}i_b - \frac{1}{3}i_c, \\ i_{b'} &= -\frac{1}{3}i_a + \frac{2}{3}i_b - \frac{1}{3}i_c, \\ i_0 &= \frac{1}{3}\left(i_a + i_b + i_c\right). \end{aligned}\right\} \qquad (4.2)$$

Исходные переменные i_a, i_b, i_c преобразованы в тройку токов $i_{a'}, i_{b'}, i_0$ в системе координат $a', b', 0$, исходное число независимых переменных при преобразовании не изменилось. Теперь можно рассматривать новые переменные $i_{a'}, i_{b'}$ как проекции изображающего вектора тока $\vec{I}$ на оси a', b', расположенные под углом 120 эл. град.

Выделение нулевой составляющей лежит в основе преобразования переменных из фазной системы координат в неподвижную или вращающуюся прямоугольную систему координат. Вместо косоугольных осей удобно ввести прямоугольную систему координат и новые переменные, которые являются проекциями изображающего вектора на ортогональные оси.

Линейное преобразование переменных с выделением нулевой составляющей имеет следующие свойства:

- нулевая составляющая равна нулю в случае, если рассматриваемая система фазных величин является уравновешенной, например, $i_0 = 0$ для трехфазных обмоток, соединенных в звезду с изолированной нейтралью. Следовательно, для уравновешенных систем число независимых переменных сокращается до двух, т. к. если сумма трех величин равна нулю, то, зная две переменные, всегда можно найти третью;

- нулевые составляющие токов и потокосцеплений не участвуют в формировании электромагнитного момента вращающихся машин, поэтому не влияют на их движение в переходном процессе [24]. В задачах, связанных с исследованием движения синхронных и асинхронных машин, при определении электромагнитного момента машины можно не рассматривать нулевые составляющие переменных. Однако для преобразования переменных к фазным координатам нулевую составляющую необходимо определить;
- для уравновешенной системы величин в качестве переменных можно рассматривать не только проекции изображающих векторов на координатные оси, а пойти дальше, и рассматривать в качестве переменных сами изображающие векторы. Очевидно, коль скоро будет определен изображающий вектор (положение его конца на векторной диаграмме) в функции времени, то тем самым определяются и переменные, которые представляются его проекциями на координатные оси. Если система переменных не уравновешена, можно рассматривать совместно векторное уравнение и уравнение для нулевых составляющих переменных.

Выбор координат при записи уравнений элементов энергосистем определяется удобством решения тех или иных задач. Если схема не содержит вращающихся машин, уравнения линий и трансформаторов наиболее просто записываются в прямоугольной неподвижной системе координат α, β, ось α совмещается с осью *a*. Для моделирования схем, содержащих вращающиеся машины, применяют вращающиеся прямоугольные системы координат [23]:

- оси *d, q*, жестко связанные с ротором машины (собственные оси),
- синхронные координатные оси d_s, q_s, вращающиеся с синхронной угловой скоростью $\omega_s = 2\pi f_н = 314{,}159$ эл. радиан/с,
- оси d_v, q_v, вращающиеся с произвольной угловой скоростью ω_v и имеющие относительно синхронных осей скольжение s_v.

В названии систем координат про нулевую составляющую обычно не упоминают, ее существование подразумевается.

Оси d, q, жестко связанные с ротором, используют при моделировании несимметричных в магнитном или электрическом отношении машин. Обычно эти оси называют собственными *d, q* осями. Преобразование фазных переменных к переменным в собственных *d, q* осях является единственным преобразованием, которое приводит дифференциальные уравнения синхронной машины с периодическими коэффициентами к уравнениям с постоянными коэффициентами. Это преобразование имеет фундаментальное значение в теории переходных процессов синхронной машины.

Для моделирования симметричных машин, таких как асинхронные двигатели, машины двойного питания, собственные оси обычно не используются. Более удобным и экономичным оказывается применение ортогональных осей, не связанных жестко с ротором. Это могут быть координатные оси d_s, q_s или оси d_v, q_v, например, оси, связанные с ротором какой-либо другой машины, принимаемые за оси, общие для всех элементов рассматриваемой схемы.

Можно использовать различные координатные оси при записи уравнений обмотки якоря машины и остальных обмоток, причем эти оси могут взаимно перемещаться. Например, для якоря использовать оси d_v, q_v, а для обмотки возбуждения и демпферных контуров – оси d, q, связанные с ротором. В практическом моделировании такая запись уравнений применяется редко, поскольку не дает ощутимых преимуществ.

При моделировании многомашинных схем возникает необходимость преобразования переменных из одной системы координат в другую при помощи линейных преобразований. Например, при расчете электрического режима в схеме осуществляется переход к осям, общим для всех элементов рассматриваемой схемы, с возвратом к собственным осям при расчете режима самой машины. В качестве общих осей можно выбрать синхронные оси d_s, q_s или оси d_v, q_v. Чтобы осуществить преобразование переменных к общим осям и обратно, необходимо знать угол между координатными осями, поэтому математическая модель машины должна иметь уравнение для определения углов между осями, в которых записаны уравнения машины, и общими координатными осями. Если уравнения машины записаны в общих осях, необходимость в таких преобразованиях отпадает.

Вращающиеся оси можно совместить с осями комплексной плоскости, причем ось q совмещается с осью вещественных, а ось d – с осью мнимых [2]. При этом изображающие векторы являются также комплексами, что позволяет проводить вычисления в комплексном виде. Совмещение осей позволяет связать переменные, используемые в алгоритмах расчета установившихся режимов с переменными, фигурирующими в расчетах переходных процессов, при помощи векторных диаграмм.

§ 4.2. Соглашения, принимаемые при записи уравнений

Существует большое количество вариантов записи алгебраических и дифференциальных уравнений элементов электрических систем, различающихся выбором основных и вспомогательных переменных, выбором знаков перед переменными, чередованием вращающихся координатных осей *d* и *q*, выбором базисных значений величин, выбором единиц для времени и инерционных постоянных [26]. Кроме того, для генераторов и двигателей может быть использована различная форма записи уравнений якоря в соответствии с основным режимом работы машины, как источника или приемника энергии, § 1.1. Поэтому возникает необходимость принятия целого ряда соглашений, которые используются при записи уравнений вращающихся машин.

При записи уравнений принимаем, что [27]:

- положительным направлением вращения изображающих векторов и координатных осей является направление вращения против часовой стрелки;
- положительным направлением отсчета углов является направление против часовой стрелки;
- ось *d* упреждает ось *q* при вращении осей против часовой стрелки [2];
- знак плюс имеют переменные, являющиеся проекциями изображающего вектора на положительное направление осей *d* или *q*, знак минус имеют переменные при проецировании вектора на отрицательное направление осей;
- углы между вращающимися *d, q* осями определяются между одноименными осями;
- знак скольжения имеет знак первой производной угла по времени;
- время и инерционные постоянные выражаются в секундах;
- используется система относительных единиц А.А. Горева.

На рис. 4.1 показано мгновенное взаимное расположение вращающихся осей, положительное направление вращения осей и отсчета углов между ними.

Угол между осями q и q_s, отсчитываемый от синхронной оси q_s к оси q, при известных угловых скоростях вращения осей ω и ω_s вычисляется по формуле

$$\delta = \delta_0 + \int_0^t (\omega - \omega_s)dt = \delta_0 + \omega_s \int_0^t s dt\,, \tag{4.3}$$

где δ_0 – начальное значение угла, $s = \dfrac{\omega - \omega_s}{\omega_s} = \dfrac{1}{\omega_s}\dfrac{d\delta}{dt}$ – скольжение осей *d, q* относительно синхронных осей.

Если $\omega > \omega_s$, скольжение $s > 0$, угол $\delta + 2n\pi > 0$. Знак скольжения совпадает со знаком первой производной угла по времени.

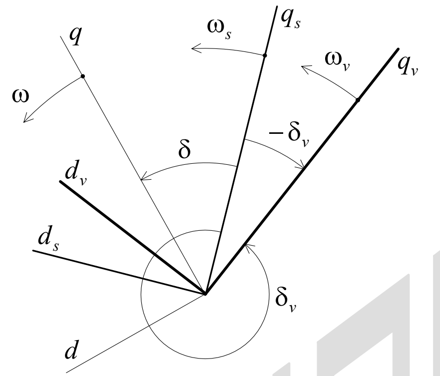

Рис. 4.1. Вращающиеся прямоугольные системы координат

Для осей d_v, q_v аналогичные выражения имеют вид

$$\delta_v = \delta_{v0} + \int_0^t (\omega_v - \omega_s)dt = \delta_{v0} + \omega_s \int_0^t s_v dt\,, \tag{4.4}$$

где $s_v = \dfrac{\omega_v - \omega_s}{\omega_s} = \dfrac{1}{\omega_s}\dfrac{d\delta_v}{dt}$ – скольжение осей d_v, q_v относительно синхронных координатных осей, угол δ_v отсчитывается относительно синхронных осей.

В соответствии с принятым правилом знаков отсчета углов, угловая скорость осей, относительно которых отсчитывается угол, входит в формулы для расчета угла и скольжения со знаком минус. Если в действительности, например, $\omega_v < \omega_s$, то угол δ_v будет отрицательным, рис. 4.1.

При моделировании многомашинной схемы необходимо преобразовывать переменные из собственной системы координат в общую систему координат, например d_v, q_v, или обратно. Прямой и обратный переходы выполняются по соответствующим формулам преобразования координат. Переменные в данной системе координат являются проекциями на оси изображающего вектора или суммой проекций на рассматриваемые оси составляющих вектора в другой системе координат, рис.4.2.

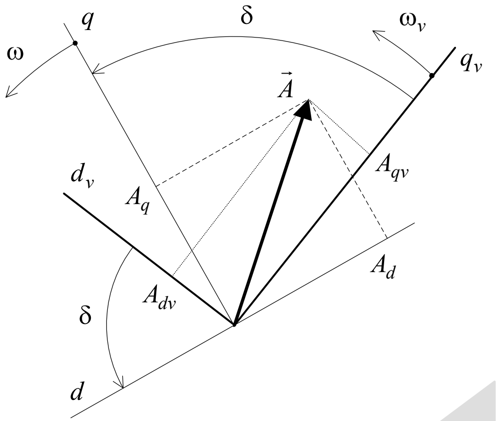

Рис. 4.2. Линейное преобразование переменных

При записи формул преобразования нужно учитывать знаки проекций изображающего вектора и на исходные координатные оси, и на новые оси, а также знак угла. Угол δ между одноименными координатными осями отсчитывается от общих к собственным осям и определяется через угловые скорости осей или через известные величины скольжения осей d, q и d_v, q_v относительно синхронных координатных осей d_s, q_s

$$\delta = \delta_0 + \int_0^t (\omega - \omega_v)dt = \delta_0 + \omega_s \int_0^t (s - s_v)dt \,. \tag{4.5}$$

Если в качестве общих осей выбраны синхронные оси, то в формуле (4.5) $\omega_v = \omega_s$, скольжение $s_v = 0$.

Для преобразования переменных в общую систему координат d_v, q_v из собственной системы d, q координат служат формулы, записанные ниже для некоторого вектора $\vec{A}\left(\vec{A} \in \vec{\Psi}, \vec{E}, \vec{U}, \vec{I}, \vec{J}\right)$,

$$\begin{aligned} A_{dv} &= A_d \cos\delta + A_q \sin\delta, \\ A_{qv} &= A_q \cos\delta - A_d \sin\delta. \end{aligned} \tag{4.6}$$

Для преобразования переменных из системы координат d_v, q_v в собственную систему d, q координат справедливы формулы

$$A_d = A_{dv}\cos\delta - A_{qv}\sin\delta,$$
$$A_q = A_{qv}\cos\delta + A_{dv}\sin\delta. \qquad (4.7)$$

Следует подчеркнуть, что принятые соглашения, формулы для определения скольжений и преобразования координат соответствуют генераторной форме записи уравнений якоря машины, § 1.1. Уравнение движения ротора машины должно быть согласовано с генераторной формой записи уравнений якоря [24, 25].

В механике уравнение движения вращающегося твердого тела определяется следующим образом: сумма моментов внешних сил, приложенных к телу, равна произведению его момента инерции на угловое ускорение

$$\sum_{(i)} m\left(\vec{F}_i\right) = J\frac{d\Omega}{dt}, \qquad (4.8)$$

где J – момент инерции ротора, $m\left(\vec{F}_i\right)$ – момент внешней силы $\vec{F}_i$, Ω – абсолютная угловая скорость.

Внешними силами, действующими на ротор, являются электромагнитная сила, механическая сила и силы трения (трение в подшипниках и о среду, в которой вращается ротор). При работе машины в режиме генератора момент механической силы $M_т$ создается первичным двигателем (паровой, гидравлической, газовой турбиной, дизелем и др.), он действует в положительном направлении вращения ротора и является движущим. Электромагнитный момент M_e и момент сил трения M_0 действуют в противоположном направлении и являются тормозящими моментами. Поэтому для генераторного режима уравнение движения ротора машины (4.8) принимает вид

$$M_т - M_e - M_0 = J\frac{d\Omega}{dt}, \qquad (4.9)$$

где $M_т > 0$, $M_e > 0$, $M_0 > 0$.

Если момент, создаваемый первичным двигателем, больше электромагнитного момента генератора, угловое ускорение и скольжение ротора положительны, внутренний угол машины $\delta = \left(\dot{E}_Q \wedge \dot{U}\right)$ растет, увеличивается мощность генератора, выдаваемая в сеть, и наоборот.

При записи уравнений синхронных и асинхронных двигателей можно выбрать один из двух вариантов.

1. Нормальным режимом работы синхронных и асинхронных двигателей является режим потребления активной мощности из сети, поэтому обычно двигатели рассматривают как приемники электрической

энергии, § 1.1, положительными становятся активная мощность, потребляемая из сети, и момент. При этом необходимо также изменить формулу расчета скольжения двигателя, чтобы скольжение было положительным при угловой скорости ротора меньше синхронной,

$$s = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \tag{4.10}$$

и при сохранении положительного направления отсчета углов отсчитывать углы между координатными осями от собственных осей к общим осям, а внутренний угол синхронного двигателя $\delta = \left(\dot{U} \wedge \dot{E}_Q\right)$ отсчитывать против часовой стрелки от вектора ЭДС к вектору напряжения, чтобы активная мощность, потребляемая из сети, была положительной. Кроме того, изменяется уравнение движения таким образом, чтобы знак электромагнитного момента соответствовал знаку активной мощности,

$$M_e - M_{\text{мх}} - M_0 = J\frac{d\Omega}{dt}, \tag{4.11}$$

где $M_e > 0$ – электромагнитный момент на валу, создаваемый двигателем, $M_{\text{мх}} > 0$ – механический момент на валу, создаваемый механизмом, $M_0 > 0$. Движущим моментом является электромагнитный момент, тормозящими – момент, создаваемый механизмом, и момент сил трения. Если момент двигателя станет меньше момента механизма, появится отрицательное угловое ускорение, увеличится положительное значение скольжения и угла, возрастет положительная активная мощность, потребляемая из сети, и наоборот. Следует отметить недостаток этой формы записи уравнений двигателя. Знак углового ускорения не соответствует знаку второй производной угла по времени, поскольку в двигательном режиме внутренний угол принят положительным. Указанную противоречивость знаков нужно учитывать при обработке модели двигателя в алгоритмах и программах расчета переходных процессов.

2. Можно применить генераторную форму записи уравнений статора двигателей. Тогда в основном двигательном режиме активная мощность, электромагнитный момент на валу, угол и скольжение будут отрицательными величинами. Чтобы получить правильный знак углового ускорения, соответствующий второму закону динамики для вращательного движения, скольжения и угла, в уравнении движения (4.9.) необходимо механический момент на валу, создаваемый механизмом, тоже считать отрицательным. Форма записи уравнения движения двигателя по сравнению с генератором не изменяется

$$M_{\text{мх}} - M_e - M_0 = J\frac{d\Omega}{dt}, \tag{4.11}$$

где в двигательном режиме $M_e < 0$, $M_{\text{мх}} < 0$, знак момента сил трения не изменяется $M_0 > 0$. Модификация формул расчета скольжения и изменение правила отсчета углов не требуются. Если по абсолютной величине момент двигателя станет меньше момента механизма, появится отрицательное угловое ускорение, увеличится отрицательное значение скольжения и угла, возрастет мощность, потребляемая из сети (увеличится абсолютное значение отрицательного значения мощности), и наоборот. Этот способ записи уравнений является нетрадиционным, но не имеет внутренней противоречивости.

Принимаем второй способ записи уравнений статора и уравнения движения двигателя. Это соглашение унифицирует модели вращающихся машин и алгоритмы их обработки. Коррекцию знаков моментов, углов, скольжений на традиционные знаки, если это необходимо, можно сделать при визуализации результатов расчета.

Векторные диаграммы синхронного и асинхронного двигателя при использовании генераторной формы записи уравнений статора и уравнения движения (4.11) приведены на рис. 4.3.

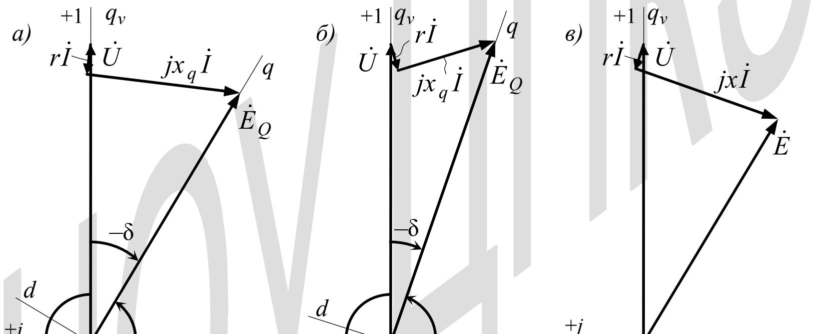

Рис. 4.3. Векторные диаграммы синхронного и асинхронного двигателей в установившемся режиме:
а – синхронный двигатель в режиме недовозбуждения;
б – синхронный двигатель в режиме перевозбуждения;
в – асинхронный двигатель

В двигательном режиме реальное направление тока на векторной диаграмме противоположно условному положительному направлению тока источника ЭДС на рис. 1.1, при этом изменяются знаки и активной, и реактивной составляющих тока. Вектор напряжения и ось q_v совмещены с осью вещественных комплексной плоскости. Направление остальных векторов соответствует записи уравнений источника ЭДС в форме (1.1).

При записи уравнения движения генераторов момент сил трения M_0 можно считать постоянным [24], обычно им пренебрегают ввиду малости и иногда учитывают только в режиме холостого хода. При записи уравнения движения двигателей момент сил трения M_0 тоже исключают из уравнения движения, учитывая механические потери другим способом, § 7.4.

§ 4.3. Уравнения Парка-Горева и их использование

Уравнения Парка-Горева описывают идеализированную машину во вращающихся собственных *d, q* осях и базируются на следующих основных допущениях [24, 28].

1. Магнитная проницаемость стали машины принимается равной бесконечности. Это позволяет однозначно определить картину магнитного поля от какой-либо обмотки машины и использовать принцип наложения при определении магнитного поля в зазоре машины.
2. Распределение магнитных полей самоиндукции трехфазных обмоток и взаимоиндукции обмоток статора и ротора вдоль окружности машины считается синусоидальным с пространственным полупериодом, равным полюсному делению. Таким образом, принимается в расчет лишь первая (основная) гармоника указанных полей и не учитывается влияние зубцовых полей в зазоре, обусловленных зубчатостью статора и ротора, а также высших и субгармоник поля, вызванных соответствующими гармониками магнитодвижущих сил обмоток статора и ротора. Основанием для подобного упрощения является способность трехфазной обмотки «фильтровать» высшие гармоники поля в зазоре. В нормально спроектированной машине удается получить высшие гармоники ЭДС, обусловленные рядом высших гармоник поля, весьма малой амплитуды. Рассматриваемое допущение означает также пренебрежение участием высших гармоник в образовании электромагнитного момента.
3. Принятая идеализация картины магнитного поля предполагает, что магнитопровод и обмотки машины симметричны. Это значит,

что магнитопровод имеет одинаковые очертания на всех полюсных делениях, а в пределах полюсного деления симметричен относительно осей d и q. Это также значит, что в трехфазной обмотке все фазные обмотки имеют одинаковое число витков, активные сопротивления и взаимный сдвиг магнитных осей, стержни демпферной системы симметричны относительно осей d и q, а обмотка возбуждения идентична на всех полюсах ротора.

4. Демпферная система явнополюсных машин или бочка ротора неявнополюсных машин замещается двумя эквивалентными контурами, по одному в оси d и в оси q, с постоянными параметрами.
5. Предполагают, что в продольной и поперечной осях машины кроме потоков рассеяния существуют единые потоки взаимной индукции, пронизывающие все контуры, расположенные по соответствующим осям машины.

Второе, третье и пятое допущения для энергетических машин являются общепринятыми и практически не влияют на точность модели. Пятое допущение заметно упрощает запись уравнений и лежит в основе методов определения параметров модели по каталожным данным генераторов.

Первое и четвертое допущения налагают ограничения на использование классических уравнений Парка-Горева для математического моделирования многомашинных электрических схем, поскольку модель вращающихся машин не полностью отображает свойства самих объектов, что может приводить к заметным и недопустимым погрешностям.

При решении ряда практических задач необходимо учитывать насыщение стали машины. Например, первое допущение приводит к значительным погрешностям в результатах расчета пуска асинхронных двигателей от генератора соизмеримой мощности. При пуске двигателя происходит форсировка возбуждения генератора, поэтому после прохождения двигателем критического скольжения и быстрой разгрузки генератора от реактивного размагничивающего тока происходит нереальный заброс напряжения, если не учитывать насыщение стали по пути магнитного потока взаимной индукции. При исследовании динамической устойчивости мощных высокоиспользованных турбогенераторов учет насыщения стали позволяет получить более точные и надежные результаты, поскольку насыщенные и ненасыщенные значения реактивностей взаимной индукции таких генераторов заметно различаются. Поэтому разработаны методы учета насыщения стали машины. В практическом моделировании наибольший интерес представляют те, которые позволяют записать уравнения переходных процессов синхронной машины в форме, близкой к исходным уравнениям Парка-Горева [28, 29], не требуют специфической информации о конструкции статора и ротора машины и при этом обладают приемлемой точностью при решении практических задач.

Четвертое допущение идеализирует демпферную систему машины. Демпферная система замещается двумя эквивалентными контурами, которые реально не существуют, но дают такой же переходный процесс, как и реально существующая система роторных контуров. Практика моделирования показала, что это допущение является приемлемым для явнополюсных генераторов и более грубым для неявнополюсных турбогенераторов, сверхпереходные параметры которых не поддаются точному расчету и оцениваются по приближенным полуэмпирическим формулам [25, 30]. Неточная модель демпферной системы искажает индивидуальное и групповое движение турбогенераторов при сильных возмущениях. Поэтому ротор турбогенераторов рекомендуется моделировать с использованием многоконтурных схем замещения бочки ротора, постоянные параметры которых синтезируются на основе экспериментальных частотных характеристик [31]. По вопросу синтеза параметров многоконтурных схем замещения ротора синхронных машин опубликовано большое количество работ, предложены типовые характеристики и параметры демпферных контуров турбогенераторов [32], которые можно использовать при отсутствии более точной исходной информации.

Зависимости тока и электромагнитного момента асинхронных и синхронных двигателей от скольжения ротора формируются за счет изменения параметров обмотки ротора при изменении частоты тока в обмотке. Следовательно, четвертое допущение неприемлемо в задачах расчета переходных процессов в узлах нагрузки, когда скольжение двигателей изменяется в полном диапазоне от пускового до рабочего или входного. Поэтому для двигателей классические уравнения Парка-Горева тоже необходимо модифицировать. По аналогии с турбогенераторами роторную обмотку двигателей можно эквивалентировать многоконтурной схемой с постоянными параметрами контуров, синтезированными на основе экспериментальных частотных характеристик, что заметно увеличивает порядок системы дифференциальных уравнений, либо необходимо учесть зависимость параметров двух эквивалентных роторных контуров от режима машины. Выбор способа описания ротора двигателя определяется наличием необходимой исходной информации о машине.