

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НАГРУЗОК МАШИН ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ И ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Машины двойного питания (МДП) [1, 2] находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности и в энергетике. В режимах двигателя [3] они используются в регулируемых электроприводах, например воздуховодок доменных печей, преобразовательных агрегатов для прокатных станов, турбокомпрессоров и др.; максимальная мощность их достигла 50–60 МВт. В режимах генератора они применяются в энергетических установках, обеспечивающих постоянную частоту напряжения в сети при переменной скорости вращения приводного двигателя (дизель, турбина) [4–7]. В зависимости от типа такого двигателя максимальная мощность МДП различна: для ветроустановок и для малых ГЭС она составляет 5–8 МВт, для генераторов, работающих на электропередачу (ЛЭП), — 400 МВт. МДП используются также и как компенсаторы (максимальная мощность — 60 МВАр). В последние годы стала известна еще одна область применения МДП [8]: изготовлен преобразователь для связи двух энергосистем, в которых синхронные частоты несколько различаются; его максимальная мощность — 100 МВА.

Многочисленные исследования физических процессов в МДП, методов их расчета и проектирования, методов регулирования МДП с целью оптимизация мощности модели были начаты в 20-х годах XX века [1, 9–11]. Их результаты подтверждены экспериментами и практикой эксплуатации в ряде стран Европы и в США. Первоначально рассматривалась работа МДП в режиме двигателя в составе электро-

приводов (каскады); они различались по принципам регулирования скорости. Несколько позже исследованы квазиустановившиеся и переходные процессы МДП в режиме генератора [6, 7]. В настоящее время в связи с повышением уровня использования МДП и применением преобразователей частоты, которые позволяют регулировать напряжение обмотки ротора по амплитуде и фазе, возникла необходимость [12, 13] более строго учесть насыщение магнитной цепи МДП и влияние режимов МДП на это насыщение, на величину потоков рассеяния обмоток, учесть влияние высших временных гармоник ($Q > 1$) на потери в машине и на форму кривой напряжения.

Формулировка проблемы

Конструктивно эти МДП выполнены аналогично асинхронной машине с фазным ротором [1, 2, 9]: в пазы статора и ротора укладывается многофазная обмотка (обычно трехфазная с целым числом пазов q на полюс и фазу) [2]; активная сталь статора и ротора — шихтованные. На контактные кольца ротора от возбудителя (преобразователь частоты) подается напряжение с частотой скольжения; оно может изменяться по амплитуде и фазе [3, 6, 7]. Отметим, что для обмотки ротора с числом фаз $m_{\text{рот}} \geq 3$ синхронный режим МДП недопустим из-за перегрева стержней (катушек) в отдельных фазах обмотки ротора.

Режимы МДП, в отличие от режимов асинхронной машины с фазным ротором, имеют ряд особенностей:

напряжение первой гармоники на зажимах обмотки статора ($Q = 1$) остается неизменным по величине и частоте: $U_{ст1} \neq f(n_{вр}); f_{ст1} \neq f(n_{вр})$; оно может изменяться по фазе относительно тока: $\varphi_{ст1} = \text{var}$;

напряжение первой гармоники на зажимах обмотки ротора ($Q = 1$) изменяется по величине и частоте: $U_{рот1} = f(n_{вр}); f_{рот1} = f(n_{вр})$; оно может изменяться по фазе относительно тока: $\varphi_{рот1} = \text{var}$;

напряжение обмоток статора и ротора содержит ряд высших гармоник ($Q > 1$): $U_{стQ} = f(n_{вр}); U_{ротQ} = f(n_{вр}); f_{стQ} = f(n_{вр}); f_{ротQ} = f(n_{вр})$.

Из изложенного следует, что задачу определения электромагнитных нагрузок МДП в эксплуатационных режимах целесообразно подразделить на две. В первой из них учитывается первая гармоника поля в зазоре ($Q = 1$) и определяются электромагнитные нагрузки МДП, мощность (электромагнитный момент), соответствующие данной гармонике. Это позволяет рассчитать возбудитель и преобразователь частоты, которыми комплектуются МДП. Во второй задаче определяются нагрузки, соответствующие высшим гармоникам ($Q > 1$).

Частоты и амплитуды первых гармоник напряжения и тока в обмотках ротора и статора МДП

Соотношения между частотами $f_{рот1}$ и $f_{ст1}$ при $n_{вр} = \text{var}$. В режимах с изменением скорости вращения ротора ($n_{вр} = \text{var}$) система регулирования преобразователя частоты обеспечивает $f_{ст1} \neq f(n_{вр}); f_{рот1} = f(n_{вр})$. Закон регулирования частоты $f_{рот}$ следует из соотношения

$$f_{ст1} = |pn_{вр}/60 + f_{рот1}(-1)^{A+1}|. \quad (1)$$

Здесь A — признак, определяющий порядок следования фаз для первой временной гармоники напряжения обмотки ротора ($Q_{рот} = 1$), или же направление вращения роторного поля относительно ротора.

Из (1) следуют законы регулирования для преобразователя частоты: в режимах при скоростях вращения $n_{вр} < 60(f_{ст}/p)$ для первой гармоники напряжения обмотки ротора должно обеспечиваться прямое следование фаз ($A = 1$), причем направление вращения роторного поля первой гармоники ($Q_{рот} = 1$) и ротора совпадают. В режимах $n_{вр} > 60(f_{ст}/p)$ должно обеспечиваться обратное следование фаз ($A = 2$), причем на-

правление вращения роторного поля первой гармоники и ротора противоположны. При синхронной скорости ($n_{вр} = 60f_{ст}/p$) частота первой гармоники напряжения должна быть $f_{рот1} = 0$. При этом токи в трех фазах обмотки ротора и, соответственно, перегревы обмоток этих фаз неодинаковы.

Соотношения между напряжениями $U_{рот1}$, $U_{ст1}$ и токами $I_{рот1}$, $I_{ст1}$ при $n_{вр} = \text{var}$. Система уравнений магнитосвязанных контуров для первой временной и пространственной гармоник. Для первых гармоник напряжения обмоток ротора и статора имеем [14, 15] (здесь и далее величины с точкой сверху обозначают временные комплексные амплитуды):

$$\dot{I}_{рот1}[Z_{рот1} + Z_{F1(рот)}] + \dot{\Phi}_{0,1}(j2\pi f_{рот1}W_{рот}K_{Wрот}) - \dot{U}_{рот1} = 0. \quad (2)$$

$$\dot{I}_{ст1}[Z_{ст1} + Z_{F1(ст)}] + \dot{\Phi}_{0,1}(j2\pi f_{ст1}W_{ст}K_{Wст}) - \dot{U}_{ст1} = 0. \quad (3)$$

Здесь $Z_{рот1} = R_{рот1} + j2\pi f_{рот1}L_{рот1}$; $Z_{ст1} = R_{ст1} + j2\pi f_{ст1}L_{ст1}$.

В уравнениях (2), (3) значения полных сопротивлений фильтров $Z_{F1(рот)}$, $Z_{F1(ст)}$ вычислены соответственно при частотах $f_{ст1}$ и $f_{рот1}$. Эти уравнения записаны для МДП в режиме регулируемого двигателя при скоростях вращения согласно (1) при $A = 1$. Для иных возможных режимов МДП оба уравнения аналогичны; они отличаются лишь знаками при слагаемых.

Для магнитосвязанных контуров этих обмоток на основе закона полного тока [14] справедливо

$$\dot{F}_{рот1} + \dot{F}_{ст1} = \dot{F}_{0,1},$$

или

$$\dot{I}_{рот1}K_1 + \dot{I}_{ст1}K_2 + \dot{F}_{0,1}K_3 = 0, \quad (4)$$

где

$$K_1 = 2m_{рот}W_{рот}K_{Wрот}/(p\pi);$$

$$K_2 = 2m_{ст}W_{ст}K_{Wст}/(p\pi);$$

$$K_3 = -1; \dot{F}_{0,1} = \dot{F}_{мц1} + \dot{F}_{п1};$$

$F_{мц1}$ — МДС магнитной цепи; $F_{п1}$ — составляющая МДС, которая соответствует [15] сумме $P_{п1}$ потерь холостого хода и добавочных потерь в машине (с учетом потерь вентиляционных, механических, например трения в подшипниках и др.):

$$\dot{I}_{\text{П}1} = \dot{I}_{\text{П}1} K_2, \text{ где } I_{\text{П}1} \approx P_{\text{П}1} / (m_{\text{ст}} U_{\text{ст}1}). \quad (5).$$

Эти потери зависят частично от потока $\dot{\Phi}_{01}$, а также от частот $f_{\text{ст}1}, f_{\text{рот}1}$; величину $P_{\text{П}1}$ удобно определять методом итераций. В качестве начального приближения можно задать $I_{\text{П}1} \approx 0$; практика расчетов подтверждает, что тогда для определения значений $P_{\text{П}1}$ и $I_{\text{П}1}$ трех итераций обычно достаточно. Насыщение магнитной цепи машины учитывается характеристикой намагничивания, которая вычисляется согласно [1, 2, 9]:

$$\dot{\Phi}_{01} = \Phi(\dot{F}_{\text{мц}1}). \quad (6).$$

Уравнения (1)–(3), (4), (6) образуют систему для решения первой задачи; в результате этого решения определяются рабочие характеристики МДП в различных эксплуатационных режимах.

При численной реализации этой системы зависимость (6) удобно представить кусочно-линейной функцией.

В системе содержатся шесть комплексных величин, определяющих электромагнитные нагрузки МДП: $\dot{U}_{\text{ст}1}, \dot{I}_{\text{ст}1}, \dot{U}_{\text{рот}1}, \dot{I}_{\text{рот}1}, \dot{\Phi}_{01}, \dot{F}_{\text{мц}1}$. Следовательно, две из них при расчете режима МДП должны быть заданы. Соответственно при решении системы эти величины необходимо перенести в правую часть уравнений (1)–(3), (4).

В практике перед использованием этой системы целесообразно провести решение контрольной задачи. Для нее следует задать $\dot{U}_{\text{рот}1} = \text{const} = 0$; $\dot{U}_{\text{ст}1} = \text{const} = \dot{U}_{\text{ст}1(\text{ном})}$. Задавая ряд значений скорости $n_{\text{вр}}$, из (1) определяют ряд значений частоты $f_{\text{рот}1}$, а из системы — ряд значений $\dot{I}_{\text{ст}1}, \dot{I}_{\text{рот}1}, \dot{\Phi}_{01}, \dot{F}_{\text{мц}1}$ и, следовательно, ряд значений электромагнитной мощности и моментов. Этот ряд величин следует также получить и из схемы замещения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором с помощью метода, изложенного, например, в [16], и сопоставить полученные результаты.

Рассмотрим особенности практических расчетов рабочих характеристик МДП в различных режимах:

в режиме регулируемого двигателя удобным может оказаться, например, задание по амплитуде и фазе значений $\dot{U}_{\text{ст}1}, \dot{I}_{\text{ст}1}$. Задавая ряд значений скорости $n_{\text{вр}}$, из (1) определяют ряд значений частоты $f_{\text{рот}1}$, а из системы — ряд зна-

чений $\dot{U}_{\text{рот}1}; \dot{I}_{\text{рот}1}; \dot{\Phi}_{01}; \dot{F}_{\text{мц}1}$ и, следовательно, ряд значений электромагнитной мощности и моментов. Возможно и решение обратной задачи, если есть ограничения по нагреву обмотки ротора, по мощности преобразователя частоты в цепи ротора. Отметим, что при $n_{\text{вр}} > 60(f_{\text{ст}}/p)$ обмотке ротора МДП может соответствовать режим генератора;

в режиме компенсатора или генератора удобным может оказаться, например, задание по амплитуде и фазе номинальных значений $\dot{U}_{\text{ст}1}, \dot{I}_{\text{ст}1}$ и решение аналогичной задачи, как для регулируемого двигателя;

в режиме преобразователя частоты достаточно задать напряжения $\dot{U}_{\text{ст}1}, \dot{U}_{\text{рот}1}$ обеих систем соответственно с частотами $f_{\text{ст}1}, f_{\text{рот}1}$. Из (1) для этих частот следует дополнительно определить скорость вращения ротора $n_{\text{вр}}$.

Отметим, что результаты решения системы уравнений (1)–(3), (4), (6) являются исходными для расчета возбудителя и преобразователя частоты в роторе.

Частоты и амплитуды высших гармоник напряжения и тока в обмотках ротора и статора МДП

Соотношения между частотами $f_{\text{рот}Q}$ и $f_{\text{ст}Q}$ при $n_{\text{вр}} = \text{var}$. Установим связь между частотами напряжений высших гармоник в обеих обмотках. Аналогично (1) получаем

$$f_{\text{ст}Q} = |pn_{\text{вр}}/60 + f_{\text{рот}Q}(-1)^{D+1}|, \quad (7)$$

где D — признак, определяющий порядок следования фаз напряжения для высших ($Q_{\text{рот}} > 1$) гармоник обмотки ротора, или же направление вращения роторного поля этой гармоники относительно ротора.

Рассмотрим режимы МДП, представляющие практический интерес [17]. В режимах при скоростях $n_{\text{вр}} < 60(f_{\text{ст}}/p)$ ($A = 1$) поля ротора временного порядка $Q_{\text{рот}} = 5, 11, 17, \dots, 6K - 1$ (здесь и далее $K = 1, 2, 3, \dots$) и ротор вращаются в противоположные стороны ($D = 2$), а поля ротора порядка $Q_{\text{рот}} = 7, 13, 19, \dots, 6K + 1$ и ротор — в одну сторону ($D = 1$). При скоростях $n_{\text{вр}} > 60(f_{\text{ст}}/p)$ ($A = 2$) поля ротора порядка $Q_{\text{рот}} = 5, 11, 17, \dots, 6K - 1$ и ротор вращаются в одну сторону ($D = 1$), а поля ротора порядка $Q_{\text{рот}} = 7, 13, 19, \dots, 6K + 1$ и ротор — в противоположные ($D = 2$).

Соотношения между напряжениями $\dot{U}_{\text{рот } Q}$, $\dot{U}_{\text{ст } Q}$ и токами $\dot{I}_{\text{рот } Q}$, $\dot{I}_{\text{ст } Q}$ при $n_{\text{вр}} = \text{var}$. Система уравнений магнитосвязанных контуров для высших гармоник. Система уравнений для учета высших гармоник аналогична (1)–(3), (4), (6). Однако коэффициенты в этой системе (полные сопротивления обмоток ротора, статора и фильтров) вычисляются соответственно при частотах $f_{\text{ст } Q}$ и $f_{\text{рот } Q}$. Кроме того, для напряжения обмотки статора справедливо соотношение: $\dot{U}_{\text{ст } Q} = \dot{I}_{\text{ст } Q} Z_{\text{вн ст } Q}$; здесь $Z_{\text{вн ст } Q}$ — полное сопротивление нагрузки, которое по отношению к зажимам обмотки статора — внешнее; оно вычисляется при частоте $f_{\text{ст } Q}$. Значения $\dot{U}_{\text{рот } Q}$, $\dot{I}_{\text{рот } Q}$ при ее решении обычно заданы: они определяются предварительно из гармонического анализа напряжений и токов ротора, первая гармоника которых уже определена.

При решении второй системы следует учитывать, что степень насыщения магнитной цепи машины установлена в результате решения первой задачи. Приблизительно зависимость между пото-

ком взаимоиנדукции $\Phi_{0 Q}$ и МДС $F_{\text{мц } Q}$ в расчетной области можно представить в виде [15]

$$\dot{\Phi}_{0 Q} \approx E_N \dot{F}_{\text{мц } Q}$$

Здесь $E_N = (\partial \Phi_{01} / \partial F_{\text{мц } 1})^{**}$. Знак ** показывает, что производная взята в точке на характеристике намагничивания машины (6), которая соответствует потоку Φ_{01} ; он определен при решении первой задачи.

Экспериментальная проверка методов [12]

Изложенные методы расчета режимов МДП были проверены экспериментально на стенде завода. В качестве МДП был использован асинхронный двигатель с фазным ротором (630 кВт, 6 кВ, $2p = 12$). Возбуждение осуществлялось от преобразовательного агрегата, состоящего из двигателя постоянного тока и синхронного генератора. Для напряжений высших гармоник $Q_{\text{рот}} = 5, 11, 17$ был выбран обратный порядок следования фаз (*A, C, B*), а для гармоник $Q_{\text{рот}} = 7, 13, 19$ — прямой (*A, B, C*). Расхождение между расчетными и опытными значениями токов в обмотках не превышало 6 %.

Приложение 1

Общий метод расчета рабочих характеристик МДП, изложенный выше в разделах 1–4, позволяет рассчитать эти характеристики в режимах регулируемого двигателя, компенсатора, генератора, а также преобразователя частоты. Он сводится к решению системы уравнений четвертого порядка в комплексной плоскости. Однако практически целесообразно на основе этой системы уравнений дополнительно создать методику расчета МДП, аналогичную заводским методикам [9] расчета неявнополюсных машин (турбогенераторы, турбодвигатели и асинхронные машины). В производственных условиях она позволяет инженеру учесть опыт разработки традиционных конструкций неявнополюсных машин указанных типов. Основные элементы такой методики применительно к работе с «перевозбуждением» МДП в режимах двигателя, компенсатора, генератора приведены ниже в разделах П.1.1 — П.1.5.

П.1.1. МДС и ток ротора МДП при нагрузке. Воспользуемся законом полного тока согласно уравнению (4). Пренебрежем в выражении для $\dot{F}_{01} = \dot{F}_{\text{мц } 1} + \dot{F}_{\text{п } 1}$ вторым слагаемым. Амплитуда МДС $\dot{F}_{\text{мц } 1}$ магнитной цепи содержит два слагаемых [1, 2, 9]:

$$\dot{F}_{\text{мц } 1} = \dot{F}_{\text{мц ст } 1} + \dot{F}_{\text{мц рот } 1}. \quad (8)$$

Первое из них — $\dot{F}_{\text{мц ст } 1} = \dot{F}_{\text{мц заз } 1} + \dot{F}'_{\text{мц зуб } 1} + \dot{F}'_{\text{мц яр } 1}$ — содержит три составляющие: МДС зазора, зубцов и ярма статора. Эти составляющие в (8) определяются зазором, геометрией магнитной цепи статора и потоком взаимоиנדукции $\Phi_{\text{вз}}$ в зазоре [9, 14, 18]:

$$\dot{\Phi}_{\text{вз } 1} = |j[1/(\omega W_{\text{ст}} K_{W_{\text{ст}}}) E_V \dot{U}_{01}]|;$$

$$E_V = [(\cos \varphi)^2 + (X_{\text{ст } 1} + \sin \varphi)^2]^{0,5}, \quad (9)$$

где ω_{01} — круговая частота сети; E_V — внутренняя ЭДС [9]; $X_{\text{ст } 1}$ — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в относительных единицах (принимается, что оно значительно больше активного сопротивления $R_{\text{ст } 1}$); $\cos \varphi$ — коэффициент мощности на выводах статора МДП.

Второе слагаемое в (8) $\dot{F}_{\text{мц рот } 1} = \dot{F}''_{\text{мц зуб } 1} + \dot{F}''_{\text{мц яр } 1}$ содержит две составляющие: МДС зубцов и ярма ротора [9]. Обе составляющие определяются суммой $\Phi'_{\text{вз } 1}$ [9, 18] потока взаимоиנדукции $\Phi_{\text{вз } 1}$ в (9) и потоков пазового рассеяния ротора $\Phi_{\text{мц рас } 1}$:

$$\Phi'_{вз1} = \Phi_{вз1} + \Phi_{мц\text{ расс}1}. \quad (10)$$

Здесь $\Phi_{мц\text{ расс}1} = |\dot{F}_{ген\ экв1}| \Lambda_{паз\text{ расс}}$, где $\Lambda_{паз\text{ расс}}$ — проводимость пазового рассеяния ротора [9, 18]; $\dot{F}_{ген\ экв1}$ — эквивалентная МДС генератора; следуя методике расчета турбогенераторов и турбодвигателей, определим ее в виде суммы двух комплексных амплитуд [18]:

$$\dot{F}_{ген\ экв1} = \dot{F}_{ст1} + \dot{F}_{мц\text{ ст}} \quad (11)$$

В практических расчетах модуль комплексной амплитуды в (11) $\dot{F}_{ген\ экв1}$ для проверки удобно вычислить в виде [18]

$$(F_{ген\ экв1})^2 = (F_{ст1})^2 + (F_{мц\text{ ст}1})^2 + 2F_{ст1}F_{мц\text{ ст}1}\{1 + [(\cos\varphi)/(X_{ст1} + \sin\varphi)]\}^{(-0,5)}. \quad (12)$$

После определения $F_{ген\ экв1}$ по (11) или (12), $\Phi'_{вз1}$ по (10) последовательно определяются МДС $F'_{мц\text{ зуб}1}$, $F'_{мц\text{ яр}1}$ и $F_{мц\text{ рот}1}$; в результате получаем составляющую в МДС $F_{мц1}$ магнитной цепи МДП.

Искомую комплексную амплитуду МДС ротора при нагрузке $\dot{F}_{рот1}$ вычисляем согласно (4).

Найдем сначала составляющие этой комплексной амплитуды в координатах статора (вещественная ось совмещена с комплексом фазного напряжения, мнимая — составляет с ней угол $+ \pi/2$):

$$\begin{aligned} \text{Re } \dot{F}_{рот1} &= -F_{мц1}\sin\psi - F_{ря1}\cos\varphi; \\ \text{Im } \dot{F}_{рот1} &= F_{мц1}\cos\psi + F_{ря1}\sin\varphi. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь фазовый угол МДС $F_{мц1}$ равен $\psi = \arccos [(X_{ст1}\sin\varphi + 1)/E_{\text{л}}] + \pi/2$; угол φ — соответствует коэффициенту мощности МДП. Отметим, что согласно (13) в принятой системе координат комплекс МДС $\dot{F}_{мц1}$ расположен так, что угол ψ находится в пределах $\pi/2 \leq \psi < \pi$. В практических расчетах модуль комплекса $\dot{F}_{рот1}$ для проверки вычисляется аналогично (12):

$$\begin{aligned} (F_{рот1})^2 &= (\text{Re } \dot{F}_{рот1})^2 + (\text{Im } \dot{F}_{рот1})^2 = \\ &= (F_{ст1})^2 + (F_{мц1})^2 + \\ &+ 2F_{ст1}F_{мц1}\{1 + [(\cos\varphi)/(X_{ст1} + \sin\varphi)]\}^{(-0,5)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Из соотношения (14) следует, что для МДП будет $F_{рот1} > F_{ст1}$.

Ток ротора при нагрузке $\dot{I}_{рот1}$ определяется согласно (14) из известных соотношений [9], используемых для МДС многофазной обмотки.

П.1.2. Фазовый угол, определяющий положение комплексных амплитуд МДС $\dot{F}_{рот1}$ и тока $\dot{I}_{рот1}$ (в координатах статора). Используя выражение (13), получаем

$$\beta = \arctg [(\text{Im } \dot{F}_{рот1})/(\text{Re } \dot{F}_{рот1})]. \quad (15)$$

Отметим, что согласно (13) в принятой системе координат комплекс МДС $\dot{F}_{рот1}$ расположен так, что угол β находится в пределах $\pi/2 < \psi < \pi$.

П.1.3. Напряжение обмотки ротора, его составляющие.

Преобразуем уравнение (2) для комплекса $\dot{U}_{рот1}$ для того, чтобы найти его вещественную и мнимую составляющие. Они определяют фазовый угол γ этого комплекса. Для этого предварительно вычислим отношение

$$\begin{aligned} Z_{эkv1} &= \dot{\Phi}_{0,1}(j2\pi f_{рот1}W_{рот}K_{W\text{ рот}})/\dot{I}_{рот1} = \\ &= |Z_{эkv1}| \exp j\delta = R_{эkv1} + jX_{эkv1}, \end{aligned}$$

где

$$R_{эkv1} = |Z_{эkv1}| \cos\delta; \quad X_{эkv1} = |Z_{эkv1}| \sin\delta \quad (16)$$

и согласно (13) и (15)

$$\begin{aligned} \delta &= |\arccos [(X_{ст1}\sin\varphi + 1)/E_{\text{л}}]| + \\ &+ |\arctg [(\text{Im } \dot{F}_{рот1})/(\text{Re } \dot{F}_{рот1})]|. \end{aligned}$$

С учетом выражений (2), (16) получаем

$$\begin{aligned} \text{Re } \dot{U}_{рот1} &= (\text{Re } \dot{I}_{рот1})(R_{рот1} + R_{эkv1}) - \\ &- (\text{Im } \dot{I}_{рот1})(X_{рот1} + X_{эkv1}), \\ \text{Im } \dot{U}_{рот1} &= (\text{Re } \dot{I}_{рот1})(X_{рот1} + X_{эkv1}) + \\ &+ (\text{Im } \dot{I}_{рот1})(R_{рот1} + R_{эkv1}), \end{aligned} \quad (17)$$

где $X_{рот1} = j2\pi f_{рот1}L_{рот1}$; $X_{ст1} = j2\pi f_{ст1}L_{ст1}$. Согласно (17) модуль амплитуды комплекса этого фазного напряжения равен

$$\dot{U}_{рот1} = [(\text{Re } \dot{U}_{рот1})^2 + (\text{Im } \dot{U}_{рот1})^2]^{0,5}. \quad (18)$$

В практических расчетах модуль комплексной амплитуды $\dot{U}_{рот1}$ для проверки вычисляется из (2) в виде

$$\begin{aligned} \dot{U}_{рот1} &= |\dot{I}_{рот1}R_{рот1} + j\dot{I}_{рот1}X_{рот1} + \\ &+ j\omega S\Phi_{вз1}W_{рот}K_{W\text{ рот}}2^{(-0,5)}|. \end{aligned} \quad (19)$$

П.1.4. Фазовый угол, определяющий положение комплексной амплитуды $\dot{U}_{рот1}$. В координатах статора угол, определяющий положение комплекса фазного напряжения ротора $\dot{U}_{рот1}$ равен

$$\gamma = \arctg [(\text{Im } \dot{U}_{рот1})/(\text{Re } \dot{U}_{рот1})]. \quad (20)$$

П.1.5. Коэффициент мощности обмотки ротора; активная и реактивная мощность этой обмотки; потери

в обмотке ротора. В системе регулирования МДП необходимо поддерживать с помощью возбудителя (преобразователь частоты) коэффициент мощности обмотки ротора $\cos\varphi_{\text{рот}}$ для того, чтобы обеспечить эксплуатационные характеристики МДП при работе в сети (в том числе заданные значения его активной и реактивной мощностей и др.). Он определяется значениями фазовых углов β (15) и γ (20):

$$\varphi_{\text{рот}} = \gamma - \beta. \quad (21)$$

Поддержание угла $\varphi_{\text{рот}}$ должно осуществляться системой управления МДП в реальном масштабе времени [6, 7].

Из полученных выражений для $\dot{U}_{\text{рот } 1}$, $\dot{I}_{\text{рот } 1}$, $\varphi_{\text{рот}}$ обмотки ротора вычисляются [9, 14] полная, активная и реактивная мощности возбудителя (преобразователя частоты), а также потери в обмотке ротора.

Приложение 2

Особенности конструкций обмотки ротора МДП

П.2.1. Особенности конструкции стержневой обмотки [1, 2, 9]. Оценим величину коэффициента Филда для обмотки МДП большой мощности. Предположим, что высота паза ротора МДП $H = 200$ мм, высота меди в нем — $H_{\text{Cu}} = 150$ мм, а коэффициент Филда для транспонированных стержней при частоте $f_{50} = 50$ Гц равен $K_{F,50} \approx 1,25$. При частоте $f_{\text{рот } 1} = 2,5$ Гц получаем $K_{F,S} \approx 1,0$. Определим теперь этот коэффициент [9, 14] сначала для того же эквивалентного стержня при $f_{\text{рот } 1} = 2,5$ Гц, но при отсутствии транспозиции. Найдем для такого стержня «приведенную высоту» [14] $H_{\text{прив}} = K H_{\text{Cu}}$ при промышленной частоте (50 Гц):

$$H_{\text{прив } 50} = [\omega_{50} \mu_0 \Delta / (2 \rho_{\text{Cu}})]^{(0,5)} H_{\text{Cu}} = 0,085 H_{\text{Cu}} = 12,5.$$

Здесь μ_0 — магнитная проницаемость воздуха; $\Delta \approx 0,8$ — отношение ширины меди в пазу к ширине паза; ρ_{Cu} — удельное сопротивление меди при 75 °С. Соответственно, при $f_{\text{рот } 1} = 2,5$ Гц получаем $H_{\text{приврот } 1} = 2,8$. Примем, что отношение пазовой части стержня к его длине равно $\lambda \approx 0,75$. Тогда коэффициент Филда нетранспонированного стержня при $f_{\text{рот } 1} = 2,5$ Гц равен $K_{F,S} \approx 2,1$. Это практически исключает

возможность применения в конструкции МДП стержней без транспозиции.

П.2.2. Особенности конструкции катушечной обмотки [9, 15]. Для такой обмотки при $H = 200$ мм и $f_{\text{рот } 1} = 2,5$ Гц: $K_{F,S} \approx 1,0$. Следовательно, для МДП при скольжениях $S \leq 0,05$ катушечная обмотка не выдвигает проблем по добавочным потерям в ней и ее перегревам.

Выводы

Методы расчета рабочих характеристик МДП позволяют найти с учетом насыщения магнитной цепи машины напряжения и токи в обмотках, вызванные первой временной гармоникой ($Q = 1$), а также напряжения и токи высших временных гармоник ($Q > 1$), вызванные работой преобразователя частоты в цепи ротора.

Результаты расчета эксплуатационных режимов МДП являются исходными для расчета возбудителя и преобразователя в цепи ротора, а также сопротивления фильтров в обмотках статора и ротора.

Многофазная обмотка ротора МДП может выполняться как стержневой, так и катушечной [2]. В стержневой обмотке возможно применение «неполной транспозиции».

Приложение 3

Список обозначений: $f_{\text{рот } 1}, f_{\text{ст } 1}$ — частоты первой гармоники напряжения обмоток ротора и статора; $f_{\text{рот } Q}, f_{\text{ст } Q}$ — частоты высших гармоник напряжения обмоток ротора и статора; $F_{\text{рот } 1}, F_{\text{рот } Q}, F_{\text{ст } 1}, F_{\text{ст } Q}, F_{\text{мц } 1}, F_{\text{мц } Q}$ — временные комплексы амплитуд МДС обмоток ротора, статора и магнитной цепи машины; $I_{\text{рот } 1}, I_{\text{рот } Q}, I_{\text{ст } 1}, I_{\text{ст } Q}, I_{\text{мц } 1}, I_{\text{мц } Q}$ — временные комплексы амплитуд токов обмоток ротора и статора; $K_{W_{\text{рот}}}, K_{W_{\text{ст}}}$ — обмоточные коэффициенты для обмоток ротора и статора; $L_{\text{рот } 1}, L_{\text{ст } 1}$ — индуктивности рассеяния обмоток ротора и статора; $m_{\text{рот}}, m_{\text{ст}}$ — число фаз обмоток ротора и статора; $n_{\text{вр}}$ — скорость вра-

щения ротора; P — мощность; p — число пар полюсов; $Q_{\text{рот}}, Q_{\text{ст}}$ — порядки временных гармоник напряжения обмоток ротора и статора; $R_{\text{рот } 1}, R_{\text{рот } Q}, R_{\text{ст } 1}, R_{\text{ст } Q}$ — активные сопротивления обмоток ротора и статора; $U_{\text{рот } 1}, U_{\text{рот } Q}, U_{\text{ст } 1}, U_{\text{ст } Q}$ — комплексные амплитуды фазных напряжений обмоток ротора и статора; $U_{\text{ст } 1(\text{ном})}$ — то же для номинального фазного напряжения обмотки статора; $W_{\text{рот}}, W_{\text{ст}}$ — число витков в фазе обмоток ротора и статора; Φ_{10}, Φ_{Q0} — комплексные амплитуды результирующих потоков взаимной индукции; $\varphi_{\text{рот } 1}, \varphi_{\text{рот } Q}, \varphi_{\text{ст } 1}, \varphi_{\text{ст } Q}$ — фазовые углы между напряжением и током.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Костенко, М.П.** Электрические машины. Т. 2 [Текст] / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский.— М.— Л.: ГЭИ, 1973.— 655 с.
2. **Вольдек, А.И.** Электрические машины [Текст] / А.И. Вольдек.— Л.: Энергия, 1974.— 840 с. 1968.— 730 с.
3. **Онищенко, Г.Б.** Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного притания [Текст] / Г.Б. Онищенко, И.Л. Локтева.— М.: Энергия. 1979.— 200 с.
4. **Шефтер, Я.И.** Ветроэнергетические агрегаты [Текст] / Я.И. Шефтер.— М.: Машиностроение, 1972.— 288 с.
5. **Boguslavsky, I.Z.** Wind— Power and small Hydro-generators Designing Problems [Текст] / I.Z. Boguslavsky, Ja.B. Danilevich // Proceedings of the IEEE Russia (Northwest Section). International Symposium «Distributed Generation Technology».— October 2003.
6. **Блоцкий, Н.Н.** Машины двойного питания [Текст] / Н.Н. Блоцкий, И.А. Лабунец, Ю.Г. Шакарян.— М.: ВНИТИ, 1979.— 123 с.
7. **Ботвинник, М.М.** Управляемые электрические машины переменного тока [Текст] / М.М. Ботвинник, Ю.Г. Шакарян.— М.: Наука, 1969.— 140 с.
8. Modern Systems.— 2002. № 4.— С. 23.
9. Проектирование электрических машин [Текст] / Под ред. И.П. Копылова.— М.: Энергия. 1980.— 495 с.
10. **Walker Miles.** The Control of the Speed and PF of Induction Motors [Текст] / Walker Miles // London: Pittman. 1924.— 153 p.
11. **Дрейфус, Л.** Коллекторные каскады [Текст] / Л. Дрейфус.— М.: ОНТИ, 1934.— 259 с.
12. **Антонов, В.В.** Методы расчета установившихся режимов АСГ [Текст] / В.В. Антонов, И.З. Богуславский, Е.Ю. Кочеткова, В.С. Рогачевский // Электротехника.— 1992. № 2.
13. **Богуславский, И.З.** Методы исследования режимов машины двойного питания с учетом насыщения и высших гармоник [Текст] / И.З. Богуславский // Известия АН СССР. Сер.: Энергетика транспорт.— 1992. № 1.
14. **Демирчян, К.С.** Теоретические основы электротехники (в трех томах) [Текст] / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин.— М.-СПб.: Питер, 2004.
15. **Богуславский, И.З.** Двигатели и генераторы переменного тока: теория и методы исследования при работе в сетях с нелинейными элементами [Текст] / И.З. Богуславский.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006.— Т. 1.— 390 с. Т. 2 — 130 с.
16. **Антонов, В.В.** Расчет мощного асинхронного двигателя с нелинейными параметрами [Текст] / В.В. Антонов, И.З. Богуславский, М.Г. Савельева // Электросила.— 1984. № 35.
17. **Богуславский, И.З.** Методы исследования зубцовых ЭДС мощных машин двойного питания [Текст] / И.З. Богуславский, С.Д. Дубицкий, Н.В. Коровкин // Известия РАН. Сер.: Энергетика.— 2011. № 1.
18. **Титов, В.В.** Турбогенераторы. Расчет и конструкция [Текст] / В.В. Титов, Г.М. Хуторецкий [и др.]. / Под редакцией Н.П. Иванова и Р.А. Лютера.— Л.: Энергия, 1967.— 895 с.