ШКОЛА MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB+Simulink.

Урок 24. Мехатронная система с магнитоэлектрическим генератором и активным полупроводниковым выпрямителем

Данная статья продолжает цикл, посвященный исследованиям полупроводниковых преобразователей с регулируемым эффектом накопления энергии. Активный выпрямитель является одним из представителей таких преобразователей. Способность активного выпрямителя накапливать энергию в реактивных элементах за счет обмена ею на высокой частоте коммутации позволяет его использовать в генераторных установках с синхронной магнитоэлектрической машиной при изменении скорости вращения.
Свойства таких систем исследуются с использованием структурных моделей на основании математического описания электромагнитных процессов по «гладкой» составляющей и виртуальных моделей, в которых вся математика «спрятана» в библиотечных блоках пакета расширения SimPowerSystem среды MATLAB+Simulink. Адекватность разрабатываемых моделей оценивается по совпадению результатов моделирования.

Сергей Герман-Галкин, д. т. н., профессор

germangalkin@gmail.com

Введение

В настоящее время в генераторных установках наблюдается повсеместный переход к синхронным машинам с постоянными редкоземельными магнитами на роторе. Такие машины проектируются и изготавливаются уже на мощности до десятков мегаватт. В отечественной литературе синхронные машины с постоянными магнитами на роторе получили название синхронных магнитоэлектрических машин (СММ). В англоязычной версии они именуются Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM).

При построении генераторной установки на базе СММ основная трудность заключается в поддержании постоянного напряжения на нагрузке при изменении скорости вращения машины и при изменении нагрузки. Такую задачу возможно решить при построении мехатронной системы, состоящей из машины, активного выпрямителя (АВ) и замкнутой системы управления АВ. Эта система позволяет обеспечить стабилизацию напряжения на выходе АВ при изменении скорости и нагрузки.

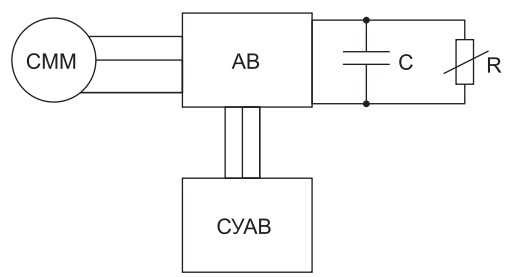

Рис. 1. Функциональная схема мехатронной системы с СММ и АВ

Функциональная схема мехатронной генераторной системы с СММ и АВ, которая рассматривается в статье, приведена на рис. 1, где блок СУАВ является системой управления АВ.

Математическое описание системы «СММ–АВ»

Основу активного трехфазного АВ составляет схема, представленная на рис. 2а. В этой схеме, так же как и в повышающем импульсном преобразователе [3, 4], на периоде коммутации имеют место лишь два состояния силовой цепи.

В первом состоянии (назовем его импульсом, рис. 2б) машина через соответствующие полупроводниковые ключи подсоединена к выходным зажимам АВ (к конденсатору с нагрузкой). Состояние импульса может быть реализовано при включении шести различных сочетаний силовых полупроводниковых ключей (1, 4, 6; 3, 2, 6; 5, 2, 4; 2, 3, 5; 4, 1, 5; 6, 1, 3).

Во втором состоянии (назовем его паузой) обмотки машины замкнуты накоротко. Состояние паузы реализуется при включении двух сочетаний силовых полупроводниковых ключей (1, 3, 5 или 2, 4, 6, рис. 2б). Если обозначить время существования первого коммутационного интервала через t_1, а время существования второго коммутационного интервала через t_2, то отношение $m = t_1/(t_1 + t_2)$ называется коэффициентом модуляции.

Базой аналитических методов рассматриваемого класса систем служит теоретическое положение, разработанное А. А. Булгаковым [1, 2] и заключающееся в том, что электромагнитные и энергетические характеристики АВ определяются передачей мощности в нагрузку на основной частоте, кратной скорости вращения вала СММ. Обмен энергией между реактивными элементами осуществляется на несущей частоте переключения транзисторов в АВ. Этот обмен сопровождается пульсациями токов в системе, вызывает незначительные искажения формы токов и дополнительные (обычно незначительные) потери. Основываясь на этом положении, удается аналитически описать и исследовать некоторые характерные режимы работы АВ на основной частоте.

В основе математического описания электромагнитных процессов в системе на основной частоте лежит метод пространственного (результирующего) вектора [6, 8], позволяющий все переменные состояния представить пространственными векторами в единой системе координат. Для исследования рассматриваемой системы эту систему координат удобно связать с продольной (d) и поперечной (q) координатами синхронной машины (рис. 3), вращающимися с синхронной скоростью ($\omega = p\omega_m$). В этом случае, как это показано на рис. 3, вектор потокосцепления возбуждения совпадает с осью d, а вектор ЭДС синхронной машины — с осью q.

Математическое преобразование мгновенных значений переменных состояния системы в значения переменных состояния в осях (d, q) представлено уравнением (1) для ЭДС машины (аналогичные уравнения преобразования осуществляются для напряжений и токов).

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\omega t & -\frac{1}{2}\sin\omega t & -\frac{\sqrt{3}}{2}\sin\omega t \\ -\sin\omega t & -\frac{1}{2}\cos\omega t & \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\omega t \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix}. \quad (1)$$

При описании электромагнитных процессов в системе с использованием метода основной («гладкой») составляющей и метода пространственного вектора эквивалентная схема замещения СММ с АВ преобразуется к виду, представленному на рис. 4.

В этой эквивалентной схеме замещения преобразователь с одной стороны подключен к статорным обмоткам СММ с ЭДС (E_1), с другой — к цепи постоянного тока с нагрузкой и емкостным фильтром. Индуктивное и активное сопротивления в схеме замещения являются внутренними параметрами машины и АВ.

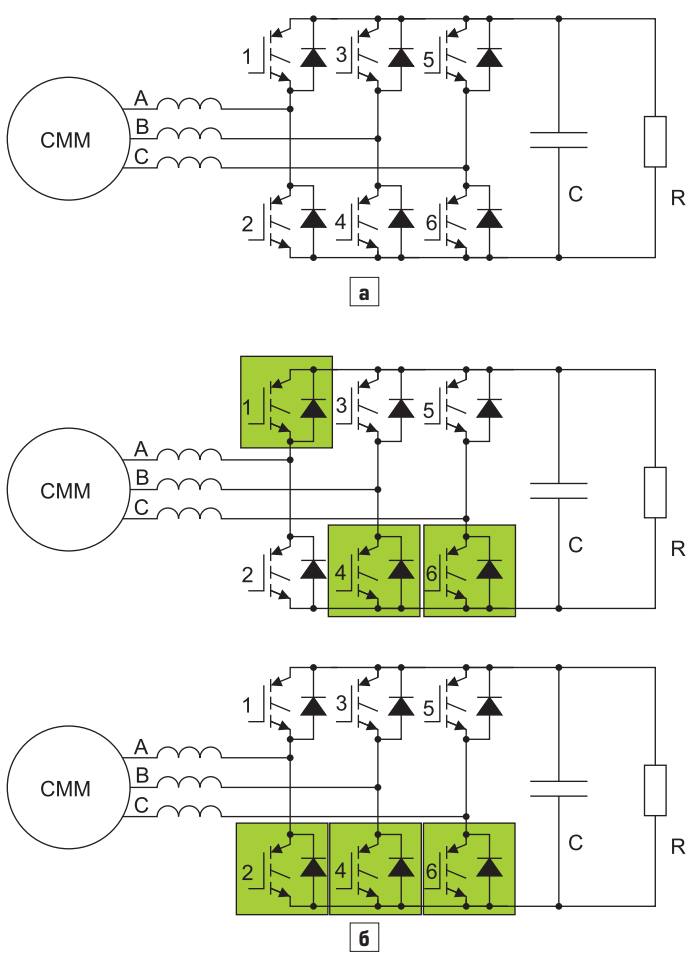

Рис. 2. Схема и структуры силовой цепи системы «СММ–АВ»

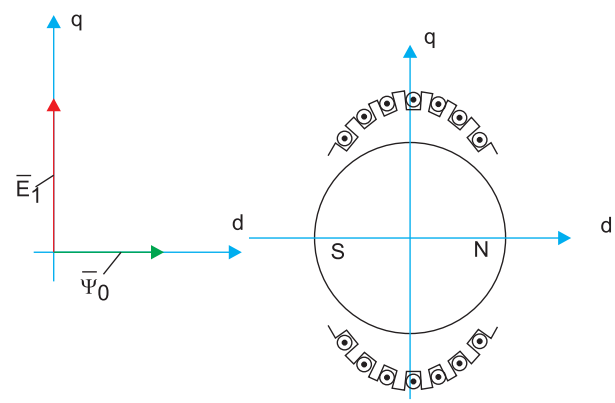

Рис. 3. Система координат СММ

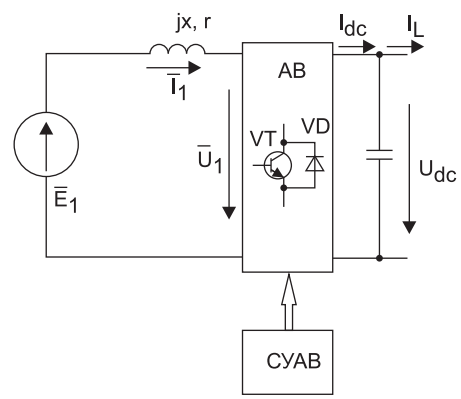

Рис. 4. Эквивалентная схема замещения системы «СММ–АВ»

Математическое описание системы «СММ–АВ» на стороне переменного тока во вращающейся синхронно с валом машины системе координат может быть представлено в виде:

$$\bar{E}_1(t) = \bar{U}_1(t) + L\frac{d\bar{I}_1(t)}{dt} + r\bar{I}_1(t) + jx\bar{I}_1(t), \quad (2)$$

где: $\bar{E}_1(t)$ — результирующий пространственный вектор ЭДС на статорных обмотках машины; $\bar{U}_1(t)$ — результирующий пространственный вектор напряжения АВ по основной гармонике; $\bar{I}_1(t)$ — результирующий пространственный вектор тока в якоре машины; r, x — активное и реактивное сопротивления СММ и проводящих полупроводниковых приборов АВ.

Значение ЭДС на выходе СММ определяется скоростью вращения ω_m вала машины и потокосцеплением возбуждения

$$\bar{E}_1(t) = p\omega_m(t)\bar{\Psi}_0 = \omega(t)\bar{\Psi}_0, \quad (3)$$

где p — число пар полюсов в машине.

По отношению к ЭДС переменного тока, на выходе СММ активный выпрямитель генерирует напряжение, основная гармоника которого равна [7]:

$$\bar{U}_1(t) = \frac{mU_{dc}(t)}{2}\exp(j\varphi_m), \quad (4)$$

где: $U_{dc}(t)$ — напряжение в звене постоянного тока АВ; m — коэффициент модуляции; φ_m — фаза напряжения $\bar{U}_1$ по отношению к ЭДС E_1 на выходе машины — фаза модуляции.

Во вращающейся системе координат (d — вещественная ось и q — мнимая ось) при совмещении вещественной оси с вектором потокосцепления возбуждения СММ $\bar{\Psi}_0$ уравнения (2, 3, 4) запишутся в виде:

$$\begin{aligned} 0 &= U_d(t) + L\frac{dI_d(t)}{dt} + rI_d(t) - xI_q(t), \\ E_1 = E_q &= U_q(t) + L\frac{dI_q(t)}{dt} + rI_q(t) + xI_d(t), \\ U_d(t) &= \frac{mU_{dc}(t)}{2}\sin\varphi_m, \\ U_q(t) &= \frac{mU_{dc}(t)}{2}\cos\varphi_m. \end{aligned} \quad (5)$$

Для полного описания «СММ–АВ» систему уравнений (5) следует дополнить уравнением энергетического баланса и уравнением Кирхгофа в цепи постоянного тока

$$\begin{aligned} \frac{3}{2}E_qI_q(t) &= U_{dc}(t)I_{dc}(t) + \frac{3}{2}r(I_d^2(t) + I_q^2(t)), \\ C\frac{dU_{dc}(t)}{dt} &= I_{dc}(t) - I_L(t) = I_{dc}(t) - \frac{U_{dc}(t)}{R}, \end{aligned} \quad (6)$$

где C, R — емкость конденсатора фильтра и сопротивление нагрузки.

Заметим, что запись $I_d(t)$, $I_q(t)$, $E_d(t)$, $E_q(t)$, $U_{dc}(t)$, $I_{dc}(t)$ в уравнениях (5, 6) подчеркивает то обстоятельство, что эти величины являются постоянными с изменяющимися во времени значениями. Изменение значений токов, напряжения и ЭДС наблюдается во время переходных процессов.

Система уравнений (5, 6) является существенно нелинейной и не имеет аналитического решения. Исследование такой системы может быть осуществлено только при использовании современных прикладных компьютерных программ, одной из лучших среди которых является пакет MATLAB + Simulink [5]. Однако построение модели для системы уравнений (5, 6) требует некоторого предварительного качественного и количественного исследования, в котором определяется ряд физических свойств системы, ограничения на изменение ее переменных состояния, выявление областей устойчивой и неустойчивой работы (если таковые имеют место), влияние параметров на вышеперечисленные свойства и. т. д. Это, в свою очередь, требует проведения ряда частных исследований с использованием обобщенного математического описания (уравнения 5, 6). Такие исследования с последующим моделированием далее осуществляются для электрической машины PM_ZG_1322M-4A, параметры которой приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры электрической машины PM_ZG_1322M-4A

P, кВт	f, Гц	Ef m, В	r, Ом	L, мГн	J, кгм²	p
7,5	50	310	0,6	5,9	10,8	2

Исследование системы «СММ–АВ» в установившемся режиме при независимом управлении

Основные физические свойства рассматриваемой системы можно выяснить, не прибегая к решению дифференциальных уравнений (5, 6) и рассматривая только установившиеся режимы работы.

В установившемся режиме работы системы уравнений (5, 6) преобразуются к виду:

$$\begin{aligned} 0 &= U_d + rI_d - xI_q, \\ E_q &= U_q + rI_q + xI_d, \\ U_d &= \frac{mU_{dc}}{2}\sin\varphi_m, \\ U_q &= \frac{mU_{dc}}{2}\cos\varphi_m, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{3}{2}E_qI_q &= U_{dc}I_L + \frac{3}{2}r(I_d^2 + I_q^2), \\ I_L &= \frac{U_{dc}}{R}. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнения (7, 8) позволяют рассчитать и построить напряжение на выходе АВ при независимом управлении полупроводниковым преобразователем, когда управляющими величинами являются коэффициент модуляции m и фаза модуляции φ_m.

Основная статическая характеристика, представляющая собой зависимость выходного напряжения в звене постоянного тока АВ, определяется на основании совместного решения уравнений (7, 8).

$$U_{dc} = \frac{\frac{3}{4}mE_1\frac{R}{z^2}(r\cos\varphi_m + x\sin\varphi_m)}{1 + \frac{3}{8}m^2\frac{rR}{z^2}} = \frac{\frac{3}{4}p\omega_m\Psi_0\frac{R}{z^2}(r\cos\varphi_m + x\sin\varphi_m)}{1 + \frac{3}{8}m^2\frac{rR}{z^2}}, \quad (9)$$

где R — сопротивление нагрузки, $z = \sqrt{r^2 + x^2}$ — полное сопротивление СММ и АВ на стороне переменного тока.

Из уравнений (7, 8, 9) рассчитываются электромагнитные и энергетические характеристики системы «СММ–АВ» в установившемся режиме работы:

$$\begin{aligned} I_q &= \frac{r}{z^2}E_q - \frac{mU_{dc}}{z^2}(r\cos\varphi_m - x\sin\varphi_m) \\ I_d &= \frac{x}{z^2}E_q - \frac{mU_{dc}}{z^2}(x\cos\varphi_m + r\sin\varphi_m), \\ I_1 &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$P_{dc} = \frac{U_{dc}^2}{R}, \quad P_1 = \frac{3}{2}E_qI_q. \quad (11)$$

Диапазон допустимых изменений управляющих воздействий на систему при независимом алгоритме управления АВ следует исследовать в трехмерном пространстве. Программа для построения этих характеристик представлена в листинге 1.

Листинг 1

```
r=0.6;
R=35;
p=2;
wm=150;
[m,fi1]=meshgrid([0:0.01:1.0]);
fi=fi1.*2;
Eq=p*wm.*310./314;
x=p*wm.*0.0059;
z=sqrt(r.^2+x.^2);
a=(3/4)*m.*(Eq.*R./z^2).*(r*cos(fi)+x.*sin(fi));
b=1+(3/8).*(m.^2).*(r*R)./z^2;
Udc=a./b;
Ud=(m.*Udc).*sin(fi)/2;
Uq=(m.*Udc).*cos(fi)/2;
Id=((r.*Ud)+x.*(Eq-Uq))./z^2;
Iq=(Eq-Uq).*r./z^2+(Ud.*x)./z^2;
P1=(1.5*Eq).*Iq;
Pdc=(Udc.^2)./R;
n=Pdc./P1;
meshc(m,fi,Udc);
grid on;
xlabel('m');
ylabel('fi (rad)');
zlabel('Udc (V)');
```

На рис. 5, 6, 7 показаны поверхности выходного напряжения при изменении коэффициента модуляции и фазы модуляции для трех скоростей вращения вала машины. Проекции этих поверхностей на основную плоскость представляют собой линии постоянного напряжения на выходе АВ. По этим линиям можно судить о зависимостях между коэффициентом и фазой модуляции при $U_{dc} = const$. Области допустимых значений коэффициента модуляции и фазы модуляции лежат на линиях постоянного напряжения. Для выбранной (табл. 1) машины значение напряжения в звене постоянного тока при номинальной скорости вращения ее вала следует принять равным U_{dc}=600 В. На рис. 5, 6, 7 этому напряжению соответствуют зависимости между m и φ_m, выделенные жирными кривыми. Эти зависимости показывают:

- поддержание U_{dc}=600(В) = *const* осуществляется, в основном, за счет изменения фазы модуляции, и только при незначительных значениях φ_m — за счет увеличения коэффициента модуляции;
- диапазон изменения коэффициента модуляции при U_{dc}=600(В) = *const* значительно ограничен.

Аналогичные зависимости наблюдаются и при изменении нагрузки. На рис. 8 эти зависимости построены для сопротивлений нагрузки R = 35 Ом, что, по сравнению с характеристикой (рис. 6), соответствует удвоенной мощности. Здесь также по проекциям напряжения на основную плоскость определяются ограничения на диапазон изменения сигналов управления.

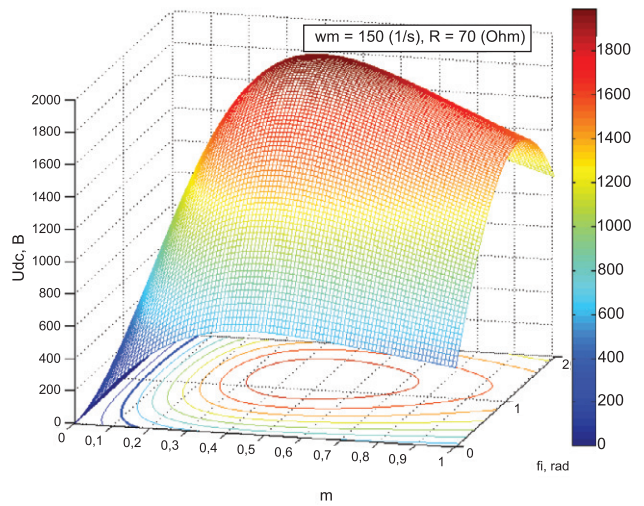

Рис. 6. Выходное напряжение при изменении коэффициента и фазы модуляции для ω_m = 150 рад/с

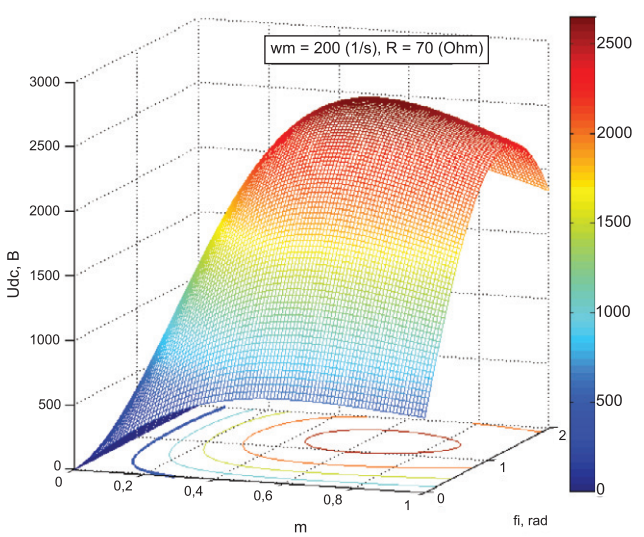

Рис. 7. Выходное напряжение при изменении коэффициента и фазы модуляции для ω_m = 200 рад/с

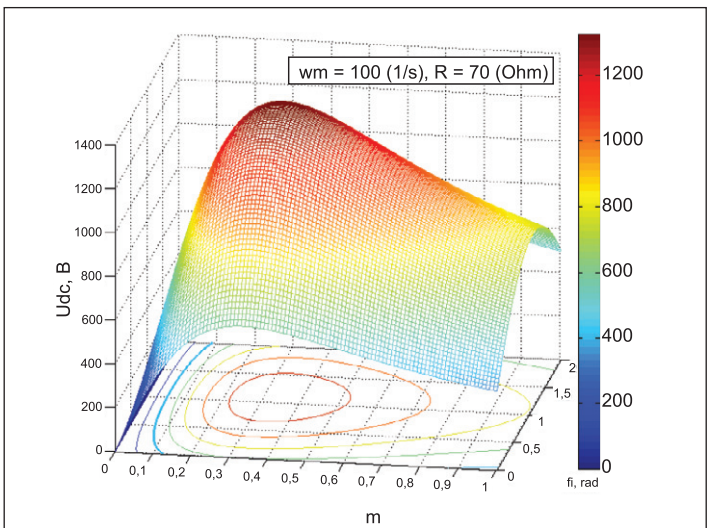

Рис. 5. Выходное напряжение при изменении коэффициента и фазы модуляции для ω_m = 100 рад/с

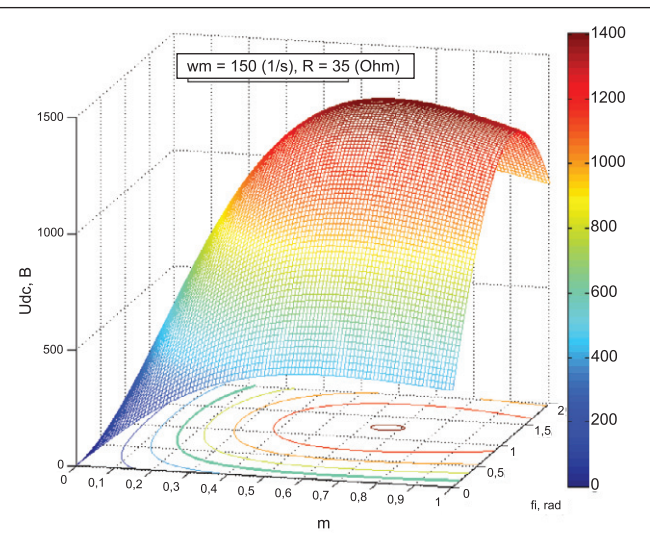

Рис. 8. Выходное напряжение при изменении коэффициента и фазы модуляции

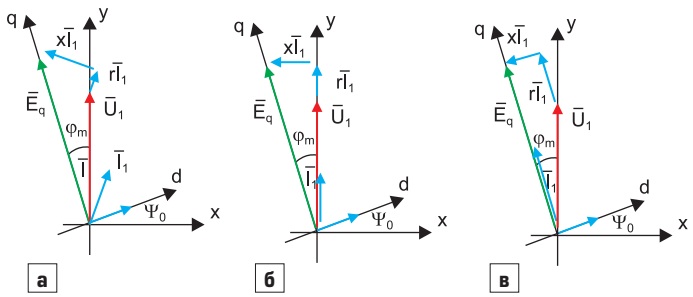

Рис. 9. Векторные диаграммы системы «СММ–АВ»

Исследование системы «СММ–АВ» в установившемся режиме при токовом управлении

При независимом алгоритме управления АВ может обеспечить заданные требования к системе «СММ–АВ» с изменяющейся скоростью и сопротивлением нагрузки при реализации нелинейной зависимости $m = f(\varphi_m)$. Причем требуемая зависимость $m = f(\varphi_m)$ изменяется при изменении скорости и нагрузки, что делает невозможной (или очень сложной) практическую реализацию такого управления.

Поэтому при построении схемы управления АВ, рассчитываемого на работу с изменяющимися скоростью и сопротивлением нагрузки, приходится отказываться от независимого алгоритма управления и использовать управление током АВ. В этом случае управление организуется в синхронно вращающейся системе координат (d, q), с релейной отрицательной обратной связью по составляющим I_d, I_q. Такое управление получило название «токового коридора».

Решающе важными для построения модели с токовым управлением являются вопросы, связанные с ограничениями. Эти ограничения определяются физическими процессами в схеме, они позволяют определить диапазон изменения задающих токовых сигналов, при которых система остается работоспособной. При токовом управлении коэффициент модуляции и фаза модуляции генерируются самой системой, однако ограничения на их значения остаются такими же, которые получены при исследовании АВ с независимым алгоритмом управления. Это ограничивает величину и диапазон изменения задающих токовых сигналов.

Дальнейшее исследование установившихся процессов осуществим, опираясь на векторные диаграммы. При построении векторных диаграмм следует учитывать, что АВ описывается в системе координат x, y (уравнение 4), связанных с напряжением U_{dc} коэффициентом и фазой модуляции m, φ_m, а СММ — в системе координат d, q, связанных с потокосцеплением возбуждения и, соответственно, с ЭДС. В установившемся режиме эти системы координат вращаются синхронно, но сдвинуто на угол, равный фазе модуляции. Векторные диаграммы в синхронно вращающихся системах координат для трех выбранных режимов работы системы, построенные по уравнениям (5), показаны на рис. 9.

Векторные диаграммы позволяют оценить свойства всей системы и на этом основании выбрать оптимальный способ управления АВ. На рис. 9а показана векторная диаграмма для общего случая, когда задающие сигналы могут формироваться как в осях (x, y), так и в осях (d, q). На рис. 9б показана векторная диаграмма, когда задающие токи формируются в осях (x, y) так, чтобы реактивная составляющая была бы равна нулю ($I_x = 0$). В этом случае АВ вместе с нагрузкой потребляет от генератора только активную мощность. На рис. 9в показана векторная диаграмма, когда задающие токи формируются в осях (d, q) так, чтобы реактивная составляющая тока в машине была бы равна нулю $I_d = 0$. В этом случае от машины потребляется только активная мощность, а АВ генерирует отрицательную (емкостную) реактивную мощность, которая компенсирует реактивную мощность, обусловленную реакцией якоря машины.

Далее рассматриваются свойства системы при последнем способе управления.

В диапазоне допустимых изменений задающего сигнала I_q^* напряжение на выходе АВ при токовом управлении определяется из уравнения (6):

$$U_{dc} = \sqrt{R\left[1,5(E_q I_q - rI_q^2)\right]}. \qquad (12)$$

Расчет напряжения на выходе АВ осуществляется программой, приведенной в листинге 2.

Листинг 2

```
r=0.6;
R=70;
p=2;
[wm,Iq]=meshgrid([10:1:300]);
Eq=(310/314)*p*wm;
Iq1=Iq./10;
Udc=sqrt((1.5*Eq.*Iq1-1.5*r*(Iq1.^2)).*R);
P1=(1.5*Eq).*Iq1;
Pdc=(Udc.^2)./R;
n=Pdc./P1;
meshc(Iq1,wm,Udc);
grid on;
xlabel('Iq (A)');
ylabel('wm (1/s)');
zlabel('Udc (V)');
```

При найденных значениях U_{dc} энергетические характеристики рассчитываются по уравнениям (11).

Результаты моделирования представлены на рис. 10 и 11. Кривые постоянного напряжения на выходе АВ находятся как проекции по-

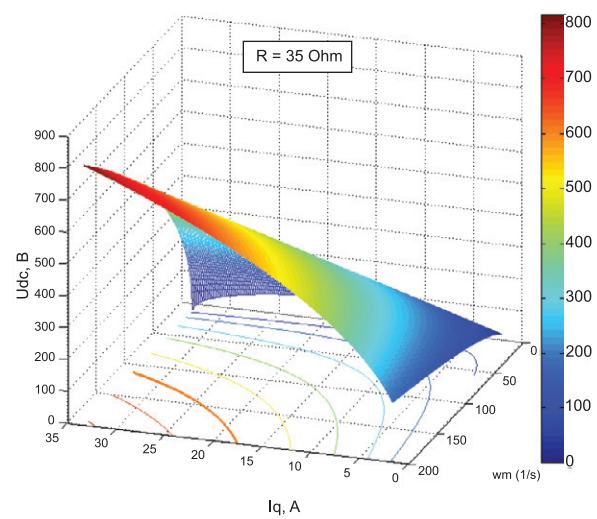

Рис. 10. Выходное напряжение при изменении заданного тока и скорости (R = 35 Ом)

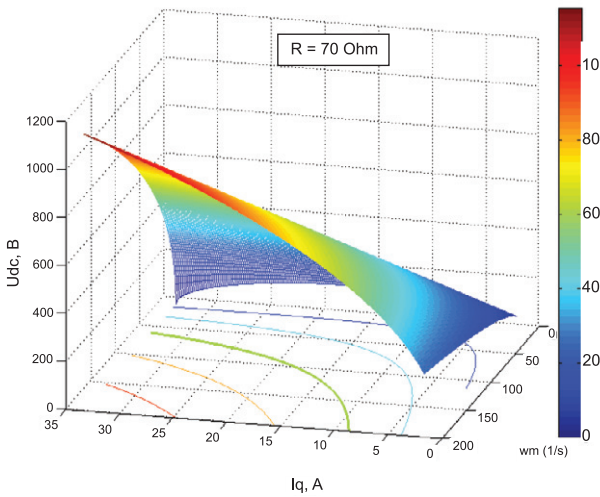

Рис. 11. Выходное напряжение при изменении заданного тока и скорости (R = 70 Ом)

верхности на основную плоскость. Жирными линиями отмечены зависимости при U_{dc} = 600 В.

По этим зависимостям определяются ограничения на диапазон изменения скорости вращения вала машины и задающего тока, которые должны быть предусмотрены при проектировании системы управления.

Для системы с выбранными параметрами при мощности на выходе, равной 10 кВт (R = 35 Ом), эти ограничения соответствуют току 17,5 А и скорости 110 рад/с (рис. 10). Для мощности на выходе, равной 5 кВт (R = 70 Ом), эти ограничения соответствуют току 8 А и скорости 60 рад/с (рис. 11).

Модельное исследование замкнутой по напряжению системы

Блок-схема системы «СММ–АВ» при токовом управлении приведена на рис. 12. В ней на входе регулятора тока предусматривается ограничение тока, найденное из предварительного анализа (рис. 10 и 11).

Динамические свойства системы «СММ–АВ» при токовом управлении определяются на основании второго уравнения системы (6), в котором необходимо установить связь между значением тока в цепи машины и током $I_{dc}(t)$, заряжающим конденсатор. Заряд конденсатора постоянным напряжением связан с потреблением активной мощности из сети в течение переходного процесса. При совмещении оси q с вектором ЭДС машины активная мощность определяется током $I_q(t)$, откуда следует, что в переходном режиме, при заряде конденсатора, имеет место равенство $I_{dc}(t) = I^*_q(t)$, этот ток и заряжает конденсатор. С учетом сказанного динамические свойства системы с токовым управлением при заряде конденсатора описываются уравнением

$$RC\frac{dU_{dc}(t)}{dt} + U_{dc}(t) = RI^*_q(t), \qquad (13)$$

где $I^*_q(t)$ — заданный активный ток.

Для стабилизации выходного напряжения активного выпрямителя канал управления активным током I_q включается в контур стабилизации напряжения в звене постоянного тока АВ. При этом контур напряжения строится как внешний по отношению к контуру активного тока. Во внешнем контуре стабилизации напряжения использован ПИ-регулятор, параметры которого для звена, описываемого уравнением (13), определяются по стандартной процедуре.

Структурная модель, которая позволяет исследовать электромагнитные и динамические характеристики системы «СММ–АВ» при задании напряжения в звене постоянного тока и раздельном управлении по проекциям тока в сети I_d и I_q, представлена на рис. 13. Электромагнитная часть модели на стороне переменного тока описывается двумя первыми

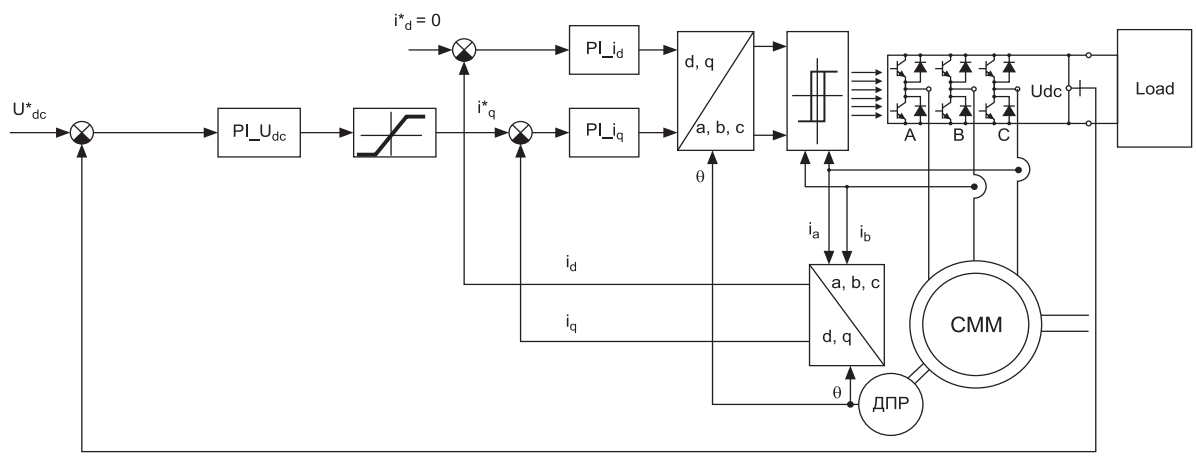

Рис. 12. Блок-схема системы «СММ–АВ»

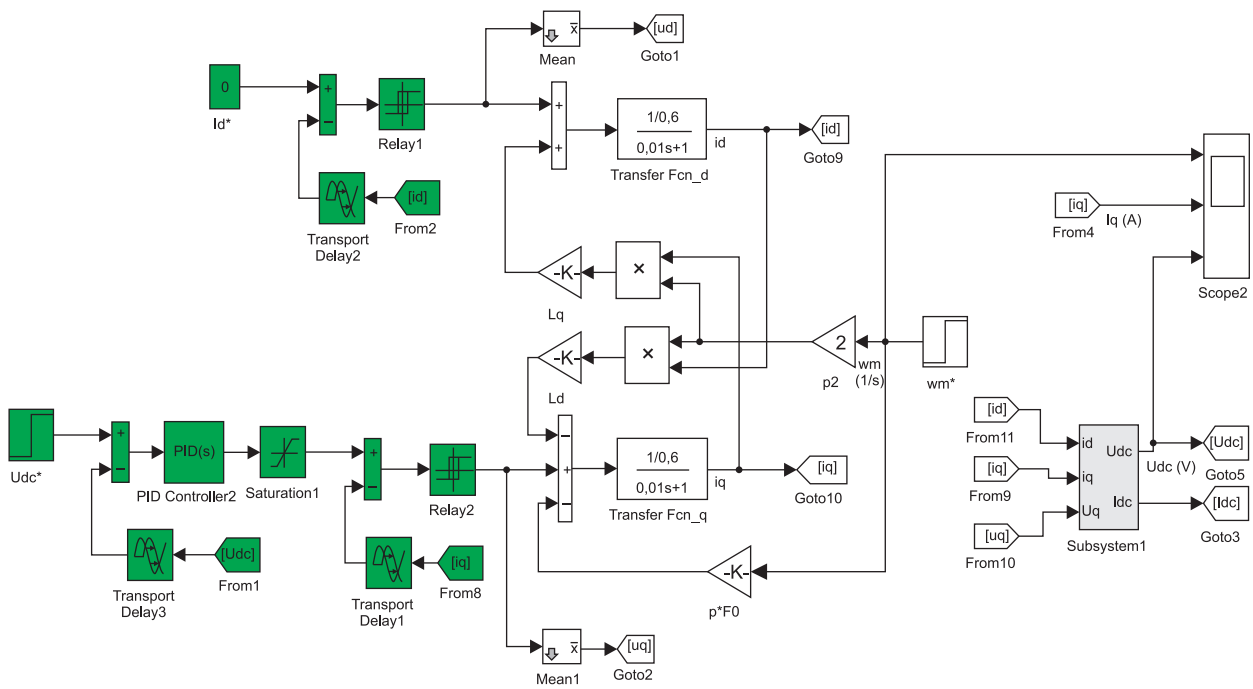

Рис. 13. Структурная модель системы «СММ–АВ»

уравнениями системы (5). В блоке Subsystem1 (рис. 13) модели реализованы уравнениями (6), описывающими АВ вместе с цепью постоянного тока. Релейные регуляторы тока I_d и I_q по осям d и q обеспечивают токовое управление АВ.

Переходные процессы по активному току и напряжению на выходе АВ при изменении нагрузки в момент $t = 0{,}3$ с и изменении скорости в момент $t = 0{,}4$ с приведены на рис. 15.

Виртуальная модель системы представлена на рис. 16.

Эта модель позволяет исследовать не только динамические характеристики системы «СММ–АВ», но и электромагнитные, и энергетические характеристики при задании напряжения на выходе АВ (в звене постоянного тока) и раздельном управлении по проекциям токов I_d и I_q.

Переходные процессы при скачкообразном изменении скорости от 100 до 150 1/с при неизменном сопротивлении нагрузки R = 70 Ом показаны на рис. 17, где представлены мгновенные токи в фазах машины, активный ток в машине I_q во вращающейся системе координат и напряжение на выходе АВ.

Аналогичные переходные процессы при скачкообразном изменении нагрузки R = (70–35) Ом и постоянной скорости 150 1/с показаны на рис. 18. Обратившись к рис. 10 и 11, нетрудно заметить, что значения тока и скорости лежат на соответствующих кривых и не выходят за ограничивающие пределы, что свидетельствует о совпадении результатов моделирования с результатами аналитических расчетов характеристик.

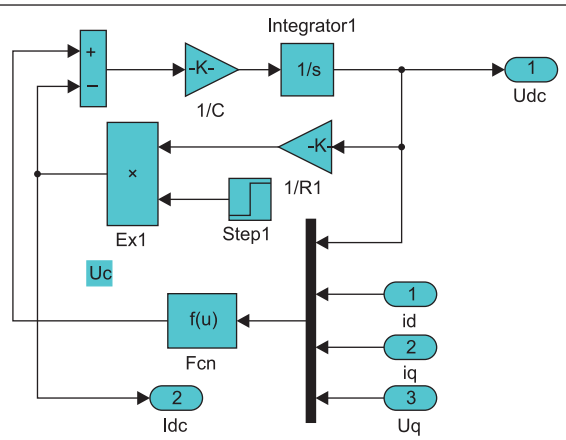

Рис. 14. Структурная модель блока Subsystem1

Иная картина переходных и установившихся процессов наблюдается при превышении ограничений, рассчитанных по статическим характеристикам. Такой пример работы системы показан на рис. 19. Здесь при нагрузке в 35 Ом ($P_1 \approx 10$ кВт) в системе наблюдаются нелинейные колебательные процессы при уменьшении скорости от 150 до 100 рад/с. Обратившись к характеристикам (рис. 10), можно заметить, что при скорости $\omega_m \approx 110$ рад/с система утрачивает свои управляющие свойства.

Заключение

Система «СММ–АВ» («синхронная магнитоэлектрическая машина — активный выпрямитель») является нелинейной динамической системой

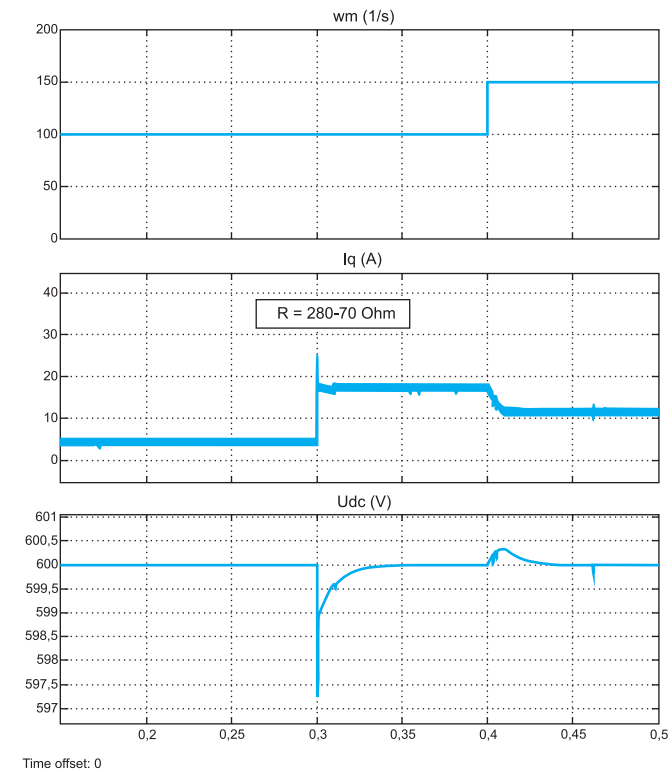

Рис. 15. Результаты моделирования структурной модели

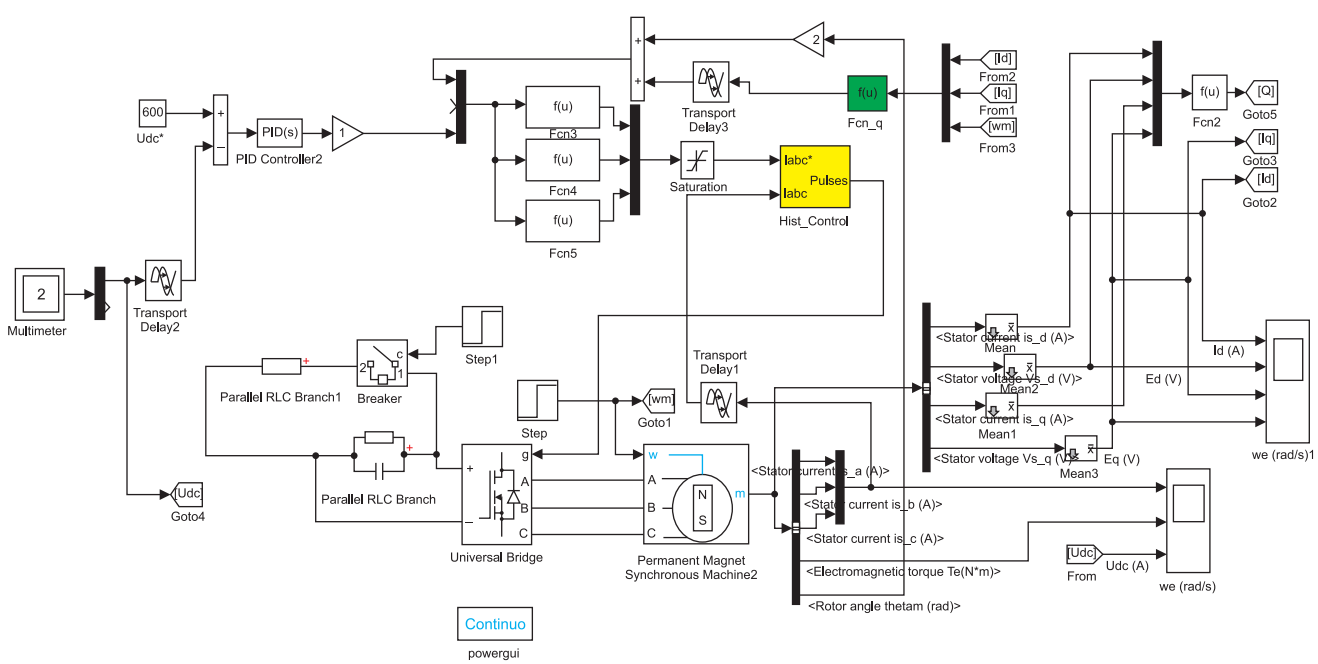

Рис. 16. Виртуальная модель системы «СММ–АВ»

с дискретно изменяющимися параметрами и регулируемым эффектом накопления энергии. Всестороннее исследование ее электромагнитных и электромеханических свойств в установившемся режиме позволяет оценить энергетические возможности системы и ограничения на диапазон изменения управляющих воздействий.

Задача исследования динамических свойств системы в обобщенном теоретическом плане при независимом управлении остается открытой. При токовом управлении эти исследования для конкретных применений, как это продемонстрировано в статье, могут быть осуществлены с использованием структурных и виртуальных моделей, в которых учтены как линейные, так и нелинейные свойства системы.

Литература

1. Булгаков А. А. Основы динамики управляемых вентильных систем. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
2. Булгаков А. А. Новая теория управляемых выпрямителей. М.: Наука, 1970.
3. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB + Simulink. Урок 12. Исследование импульсного повышающего регулятора постоянного напряжения // Силовая электроника. 2010. № 1.
4. Герман-Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде MATLAB + Simulink. Урок 17. Динамические режимы работы импульсного повышающего преобразователя // Силовая электроника. 2013. № 4.
5. Дьяконов В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя. М.: СОЛОН-Пресс, 2002.
6. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Пер. с нем. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
7. Розанов Ю. К. Силовая электроника. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
8. Park R.H. Two-reaction theory of synchronous machines: Generalized method of analysis – part 1. Trans. of AIEE. July, 1929.

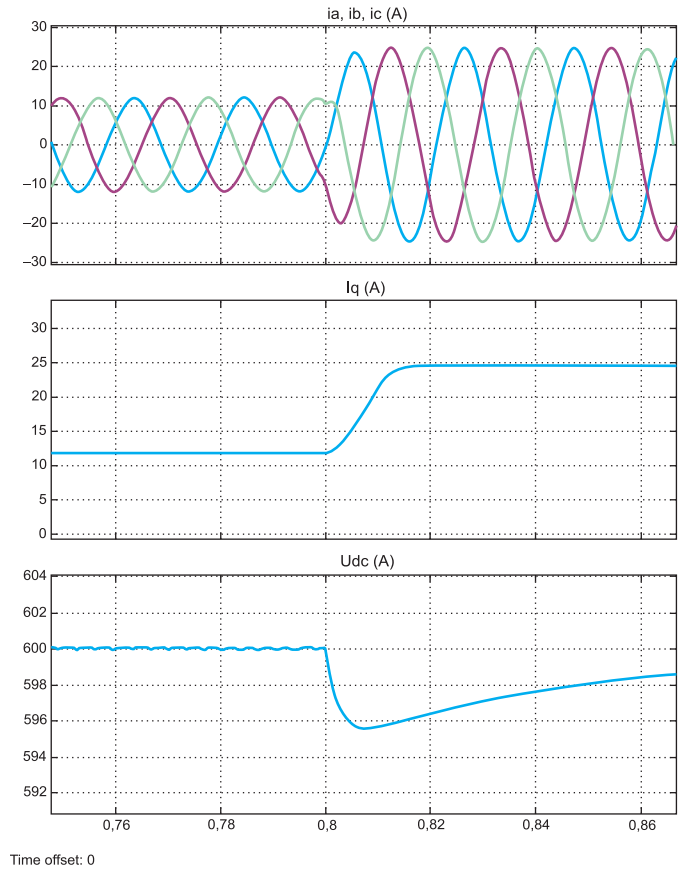

Рис. 18. Переходные процессы при скачкообразном изменении нагрузки R = (70–35) Ом и постоянной скорости 150 1/с

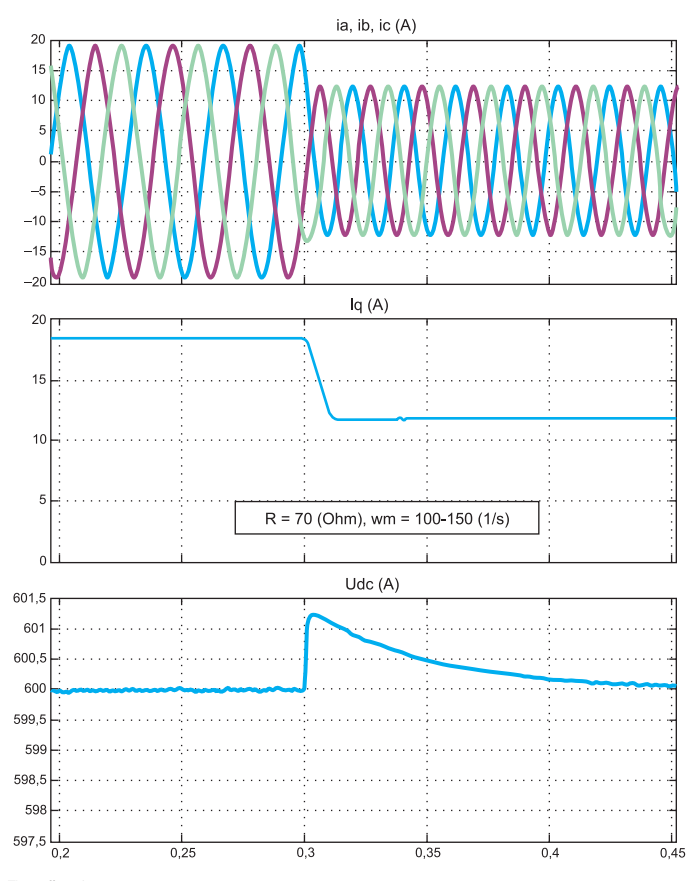

Рис. 17. Переходные процессы при скачкообразном изменении скорости от 100 до 150 1/с при неизменном сопротивлении нагрузки R = 70 Ом

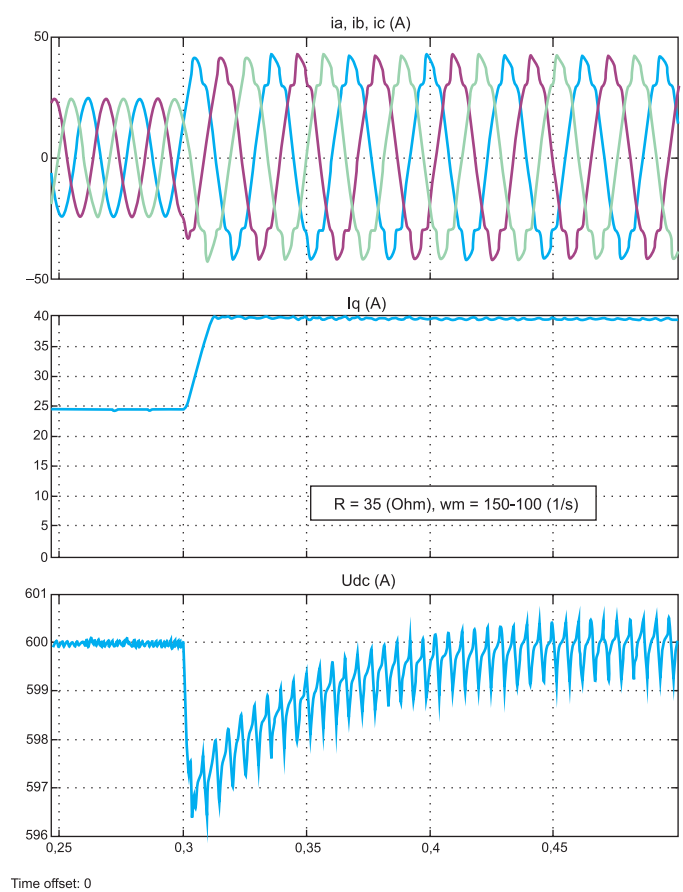

Рис. 19. Переходные процессы при выходе системы из области ограничения