

Анализ и синтез мехатронной системы

С МАГНИТОКОММУТАЦИОННОЙ МАШИНОЙ в пакетах Matlab-Simulink

В данной статье реализуется описание магнитокоммутационной электрической машины в терминах теории цепей с учетом силового полупроводникового преобразователя, питающего машину, и алгоритма его управления. В совокупности такое устройство является мехатронным устройством (МУ). В статье осуществлен анализ переходных и установившихся процессов в данном МУ, а также синтезированы регуляторы, придающие данному устройству заданные динамические характеристики. Все исследования проведены на базе пакета Matlab-Simulink и его расширений.

**Сергей Герман-Галкин,
Д. Т. Н.**

gsgs@yandex.ru

Введение

Идея создания магнитокоммутационной электрической машины (МКМ) принадлежит проф. А. А. Афонину. В его работах [1–6] изложены вопросы конструкции МКМ, проведен исчерпывающий анализ электромагнитных процессов, показаны многочисленные преимущества таких машин и определены области их применения. Теоретические исследования электромагнитных процессов в МКМ в указанной литературе базируются на решении полевых задач с использованием дифференциальных уравнений в частных производных. Результаты этих исследований могут служить основой для проектирования и расчета машины.

Для построения системы управления с МКМ требуется иной подход при ее анализе. Этот подход базируется на описании МКМ в понятиях (терминах) теории цепей.

Конструкция и принцип действия магнитокоммутационной машины

Элемент конструкции МКМ (элементарный модуль — ЭМ) показан на рис. 1. На неподвижной части (статор) расположены два П-образных сердечника (1) (на рис. 1 сердечники повернуты торцами наружу). На подвижной части расположена продольная (замыкающая магнитный поток) часть сердечника (полюс ротора) (2). На неподвижной части располагаются две обмотки возбуждения (3), отдельные для каждого сердечника. Постоянные токи в обмотках возбуждения (I₁, I₂) протекают в противоположных направлениях. Обмотка якоря (4) расположена также на неподвижной части и проходит через оба сердечника. При перемещении части 2 в направлении x первоначально замыкается поток в левом сердечнике, а затем в правом. Поскольку токи возбуждения

текут в противоположных направлениях, то магнитный поток, охватывающий обмотку якоря, меняет знак. Если обмотку якоря запитать переменным током, то на подвижную часть машины будет действовать электромагнитный момент. Если частота тока в обмотке якоря будет равна $f = pn/60$ (p — число пар полюсов), то момент на подвижной части будет иметь постоянное среднее значение. По принципу действия МКМ является синхронной электрической машиной.

Далее описывается МКМ, показанная на рис. 2. Представленная машина является упрощенным вариантом конструкции, которая подробно описана в литературе [6].

Магнитокоммутационная машина содержит набор элементарных модулей (ЭМ), образующих несколько отдельных МКМ, в частном случае, показанном на рис. 2, — две, ЭМ которых смещены в радиальном направлении. Каждая МКМ имеет две неподвижные электромагнитные системы (α и β), смещенные на половину полюсного деления (полюсное деление определяется смещением сердечников статора). Вся конструкция содержит П-образные сердечники ($1_{\alpha}, 1_{\beta}, 1_{\alpha}^1, 1_{\beta}^1$), обмотки возбуждения ($3_{\alpha}, 3_{\beta}, 3_{\alpha}^1, 3_{\beta}^1$) и обмотки якоря ($3_{\omega}, 3_{\beta}, 3_{\alpha}^1, 3_{\beta}^1$).

На вращающемся диске ротора расположены части магнитопровода ($2, 2^1$), замыкающие магнитный поток (полюса ротора). При сохранении одинаковых конструктивных размеров ЭМ, внутренняя МКМ содержит меньшее количество полюсов. Эта особенность МКМ вызывает необходимость управления каждой машиной от отдельного преобразователя при построении мехатронной системы.

Характер распределения магнитных полей, индуктивности и ЭДС в статоре МКМ показан на рис. 3 [6].

Когда ферромагнитные части (полюса) ротора замыкают магнитные потоки в одной группе сердечников статора, суммарный магнитный поток

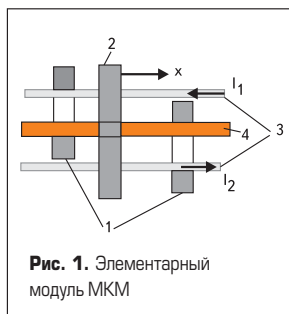
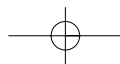


Рис. 1. Элементарный модуль МКМ



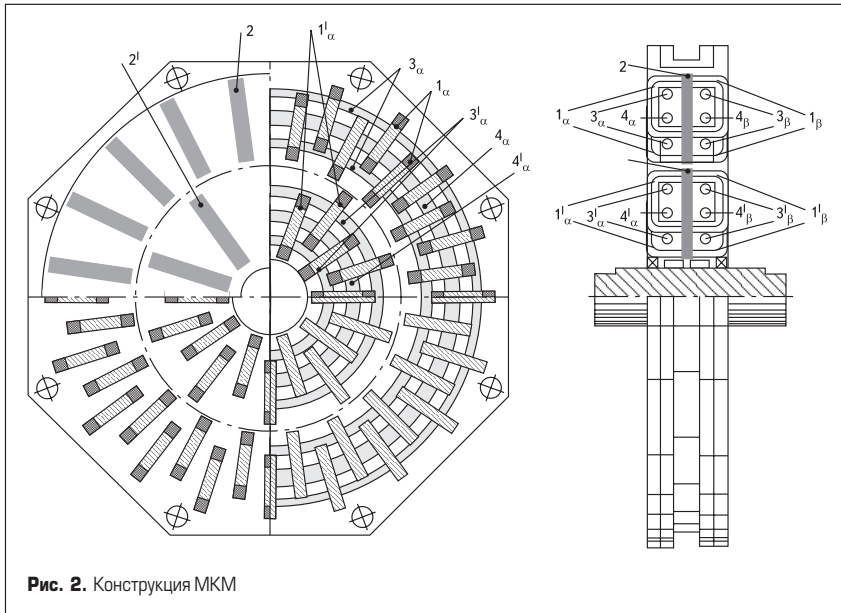


Рис. 2. Конструкция МКМ

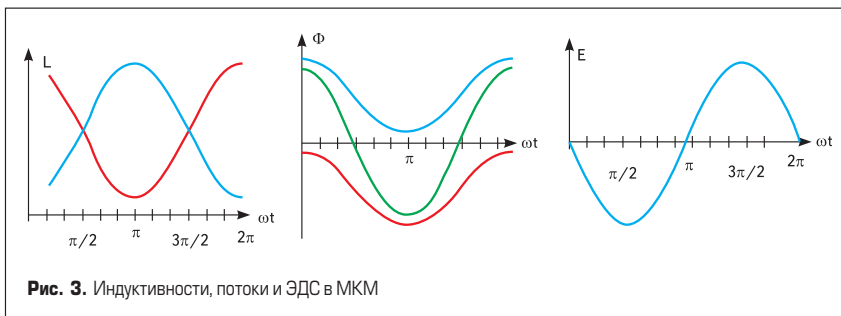


Рис. 3. Индуктивности, потоки и ЭДС в МКМ

и индуктивность якорной обмотки приобретают максимальное значение.

В это время в другой группе магнитопроводов того же статора, смещенной относительно первой на полюсное деление, магнитные потоки имеют минимальные значения. При этом магнитный поток во второй группе, сцепленный с обмотками якоря ЭГ, имеет противоположное по отношению к первой группе магнитопроводов направление. При повороте ротора на полюсное деление наступает максимум магнитных потоков во второй группе, как показано соответственно на рис. 3. В отдельной группе магнитопроводов при перемещении ротора магнитный поток, направленный по оси машины, периодически изменяется от максимального до минимального значения, не изменяя при этом своего знака в пределах рассматриваемой группы. В то же время в другой группе магнитопроводов магнитный поток также не изменяет своего направления, но сдвинут по фазе во времени на 180 эл. градусов относительно магнитного потока первой группы.

Таким образом, в общей магнитной системе статора, состоящей из двух групп, при перемещении ротора возникает циркуляция двух переменных во времени магнитных потоков, максимальные значения которых сдвинуты по фазе на период, и, поскольку каждый из этих периодически переключаемых магнитных потоков пронизывает обмотку якоря, в последней индуцируется переменная во времени ЭДС.

Так как максимальный магнитный поток замыкается через магнитопровод статора, ферромагнитные элементы ротора и немагнитный рабочий зазор, то зависимость Φ_{\max} от тока возбуждения аналогична кривой намагничивания обычных синхронных машин (СМ).

Результаты исследований [6] показывают, что многослойные структуры МКМ с коммутацией магнитного потока за счет наиболее полного использования всего объема машины и устранения при этом из системы пассивных электрических и магнитных контуров, не участвующих в процессе электрохимического преобразования энергии, позволяют обеспечить достижение высоких удельных массогабаритных и энергетических показателей.

В МКМ рационально используются электрические и магнитные материалы, отсутствует перемагничивание и связанные с ним потери в магнитных контурах вследствие однопольных магнитных потоков возбуждения. Сокращение длины силовых линий магнитного поля улучшает использование объема электромагнитного ядра и уменьшает массу расходуемой электротехнической стали, что также ведет к снижению дополнительных потерь на вихревые токи и гистерезис и таким образом способствует увеличению КПД машины.

Глубина модуляции индуктивности (аналог отношения χ_d/χ_q синхронной машины) возрастает при периодическом чередовании в структуре подвижного рабочего тела (ротора) ферромагнитных и немагнитных элементов.

Обмотки технологичны и не имеют лобовых частей. При этом концентрическая форма их обеспечивает высокий коэффициент заполнения площади пазов. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований [1, 3, 6] показывают, что многослойные структуры МКМ позволяют обеспечить достижение высоких удельных массогабаритных и энергетических показателей. Выполненные оценки показывают, что в предложенных конструкциях можно добиться снижения удельной массы до 0,1 кг/кВ·А при скорости вращения $n = 3000$ об/мин, что существенно превышает возможности других типов электрических машин.

Особенности конструкций МКМ открывают широкие возможности для оптимального проектирования и синтеза требуемых параметров и заданных разработчиком характеристик мехатронного устройства.

Анализ мехатронного устройства на базе магнитокоммутационной машины

На рис. 4 приведена схема половины элементарного модуля двухфазной МКМ. На статоре машины размещены две якорные обмотки (4_α и 4_β), расположенные на неподвижных осях α , β и смещенные на половину полюсного деления. Так же, как это принято при анализе синхронной машины, ось, совпадающая с продольной осью сердечника ротора, обозначена буквой d , а перпендикулярная ось — буквой q . За начальное положение осей принято положение, при котором ось d совпадает с осью α .

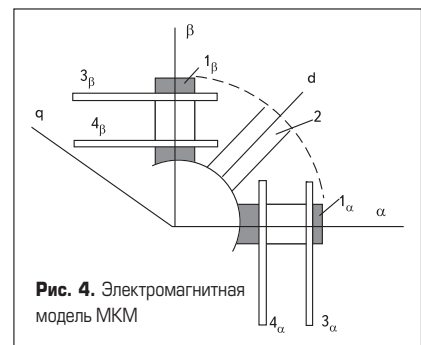


Рис. 4. Электромагнитная модель МКМ

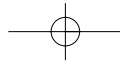
Для рассматриваемой конструкции (рис. 2) электромагнитные моменты двух МКМ складываются на одном валу.

Математическое описание каждой МКМ аналогично и может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_\alpha &= R_1 i_\alpha + \frac{d\psi_\alpha}{dt}, \\ u_\beta &= R_1 i_\beta + \frac{d\psi_\beta}{dt}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H.$$

В уравнениях (1) потокосцепление по каждой из неподвижных осей α , β и электромагнитный момент на валу каждой МКМ находятся из выражений (2).



$$\begin{aligned} \psi_\alpha &= L_\alpha i_\alpha + L_{\alpha\beta} i_\beta + \psi_{0\alpha} = L_\alpha i_\alpha + L_{\alpha\beta} i_\beta + \psi_0 \cos\theta, \\ \psi_\beta &= L_{\alpha\beta} i_\alpha + L_\beta i_\beta + \psi_{0\beta} = L_{\alpha\beta} i_\alpha + L_\beta i_\beta + \psi_0 \sin\theta, \\ M &= L_{\alpha\beta} (i_\beta^2 - i_\alpha^2) + (L_\alpha - L_\beta) i_\alpha i_\beta + \psi_{0\alpha} i_\beta - \psi_{0\beta} i_\alpha. \end{aligned} \quad (2)$$

Если пренебречь насыщением стали, то выражения для собственных индуктивностей и взаимной индуктивности имеют вид:

$$\begin{aligned} L_\alpha &= \frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta, \\ L_\beta &= \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta, \\ L_{\alpha\beta} &= \frac{L_d - L_q}{2} \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u_\alpha &= R_1 i_\alpha - (L_d - L_q) \omega \times \sin 2\theta \times i_\alpha + \left(\frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta \right) \frac{di_\alpha}{dt} + \\ &+ (L_d - L_q) \omega \times \cos 2\theta \times i_\beta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \sin 2\theta \times \frac{di_\beta}{dt} - \psi_0 \omega \sin \theta, \\ u_\beta &= R_1 i_\beta + (L_d - L_q) \omega \times \cos 2\theta \times i_\alpha + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \sin 2\theta \times \frac{di_\alpha}{dt} + \\ &+ (L_d - L_q) \omega \times \sin 2\theta \times i_\beta + \left(\frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta \right) \frac{di_\beta}{dt} + \psi_0 \omega \cos \theta, \\ M &= p \left[\frac{L_d - L_q}{2} \sin 2\theta \times (i_\beta^2 - i_\alpha^2) + (L_d - L_q) \cos 2\theta \times i_\alpha i_\beta + \psi_0 \cos \theta i_\beta - \psi_0 \sin \theta i_\alpha \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом уравнений (1-3) полное описание МКМ в неподвижной системе координат запишется в виде (4), где p — число пар полюсов.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = \sum M - M_H, \quad (5)$$

где $\sum M$ — суммарный момент от двух МКМ. Функциональная схема мехатронного устройства каждой МКМ показана на рис. 5.

Рассматриваемая МКМ управляется от силового полупроводникового преобразователя (СПП), который, в свою очередь, управляется от датчика положения ротора (ДПР) и преобразователя координат (ПК). При таком построении напряжения питания обмоток u_α и u_β зависят как от положения ротора машины, так и от алгоритма работы СПП. Эти два обстоятельства необходимо учитывать при построении модели мехатронного устройства.

Силовой преобразователь выполняется по схеме двухплечевой (мостовой) однофазного инвертора, который управляется от широтно-импульсного модулятора. Таким образом, на выходе СПП реализована синусоидальная широтно-импульсная модуляция с амплитудой U , равной напряжению питания СПП.

Модель СПП с блоком управления показана на рис. 6. В этой модели все блоки являются библиотечными. Установку параметров блоков подробно описана в других работах автора [7, 8].

Датчик положения ротора и преобразователь координат реализованы на вращающемся трансформаторе (ВТ), балансном модуляторе (М), двух фазочувствительных выпрямителях (ФЧВ), генераторе несущей частоты (Г) и двух фильтрах низкой частоты (Ф). Функциональная схема этих блоков показана

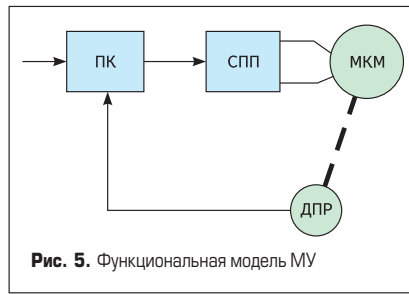


Рис. 5. Функциональная модель МУ

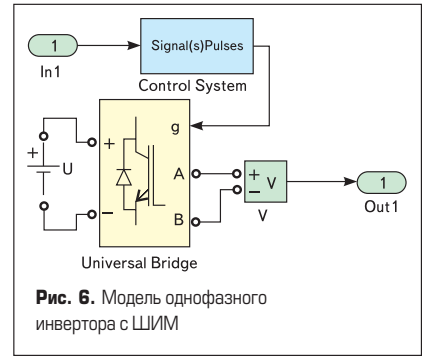


Рис. 6. Модель однофазного инвертора с ШИМ

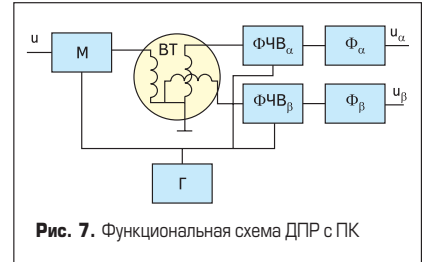


Рис. 7. Функциональная схема ДПР с ПК

на рис. 7. На вход схемы подается сигнал управления u , а с выхода схемы снимаются два сигнала u_α, u_β , поступающие на входы соответствующих ШИМ.

Мехатронному устройству (рис. 5) требует, как это было отмечено выше, датчик положения ротора (ДПР). Известно много конструктивных вариантов ДПР [6]. Новые технологии в конструировании МКМ могут быть с успехом использованы для реализации ДПР. Самым простым решением представляется использование на статоре еще одной МКМ, рас-

положенной вблизи оси с малыми конструктивными размерами сердечников. На якорные обмотки такой МКМ подается сигнал с выхода модулятора, а сигналы на ФЧВ снимаются с обмоток возбуждения.

Модель, выполненная в соответствии с функциональной схемой (рис. 7), представлена на рис. 8.

Модель всего мехатронного устройства показана на рис. 9. В блоке DPR реализованы две модели по рис. 8. В блоках Shim реализована модель, представленная на рис. 6. Блоки МКМ1 и МКМ2 реализуют модель машины в соответствии с уравнениями (1-4) для МКМ1 с параметрами: $R_1 = 2,0$ Ом, $L_d = 8,5 \times 10^{-3}$ Гн, $L_q = 4,5 \times 10^{-3}$ Гн, $\psi_0 = 0,15$ Гн·А, $p = 6$ и МКМ2 с параметрами: $R_1 = 0,9$ Ом, $L_d = 4,8 \times 10^{-3}$ Гн, $L_q = 2,2 \times 10^{-3}$ Гн, $\psi_0 = 0,08$ Гн·А, $p = 3$.

Момент инерции на валу $J = 0,2$ кг·м².

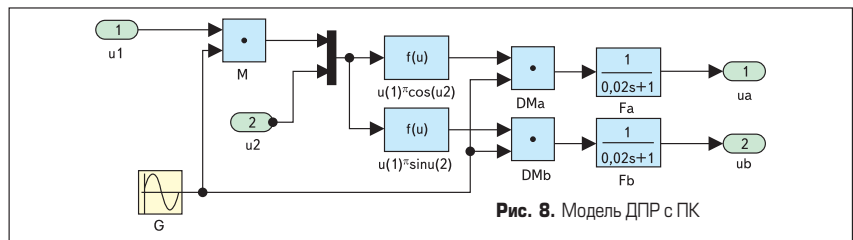


Рис. 8. Модель ДПР с ПК

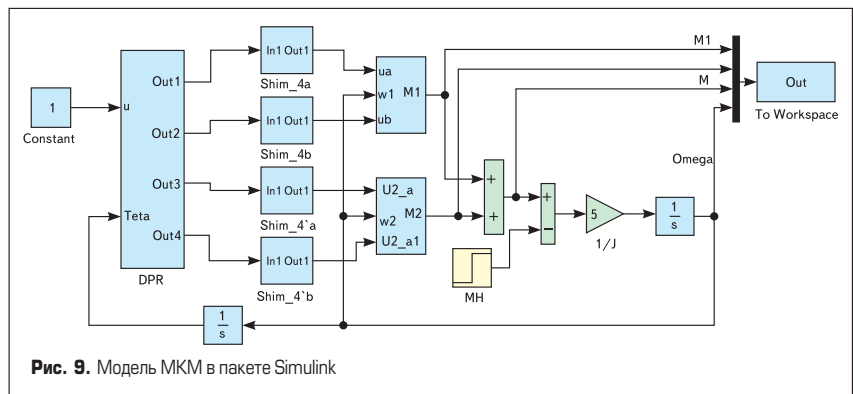
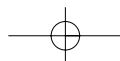


Рис. 9. Модель МКМ в пакете Simulink



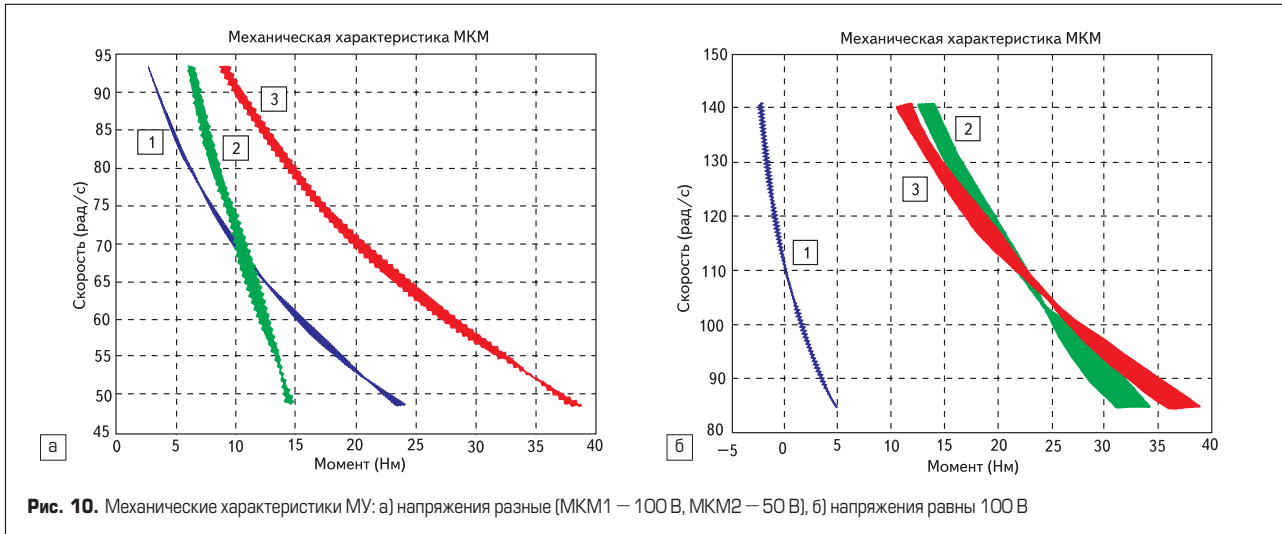
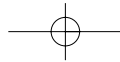


Рис. 10. Механические характеристики МУ: а) напряжения разные (МКМ1 — 100 В, МКМ2 — 50 В), б) напряжения равны 100 В

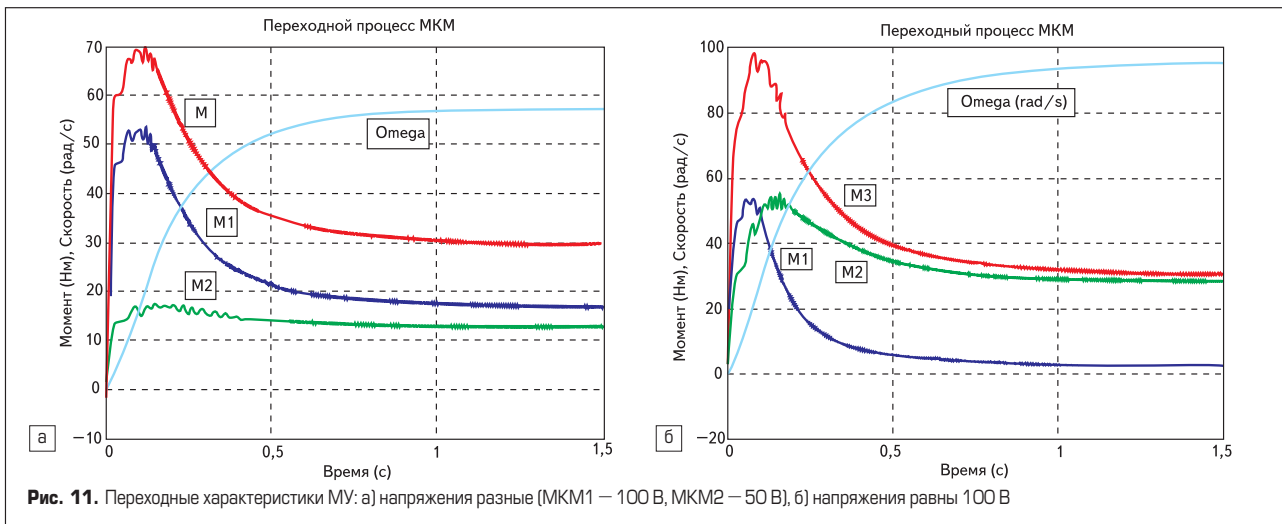


Рис. 11. Переходные характеристики МУ: а) напряжения разные (МКМ1 — 100 В, МКМ2 — 50 В), б) напряжения равны 100 В

Блок Constant задает входной сигнал, который определяет амплитуду напряжения на обмотках МКМ. В блоке Mn реализуется нагрузочный момент на валу МУ. Результаты моделирования записываются в рабочее пространство Matlab (блок To Workspace) для их обработки и представления.

На рис. 10 представлены механические характеристики для различных (рис. 10а) и равных (рис. 10б) напряжений на обмотках якоря МКМ. Кривые 1 соответствуют машине МКМ1, кривые 2 — машине МКМ2, характеристики 3 соответствуют всему МУ.

Из характеристик видно, что в случае различных напряжений на обмотках МКМ1 и МКМ2 (напряжений питания СПП) при малых скоростях момент МКМ1 превышает момент МКМ2. При больших скоростях момент МКМ2 превышает момент МКМ1.

В случае одинаковых напряжений на обмотках якоря момент всего МУ определяется только МКМ2, причем при больших скоростях МКМ1 развивает отрицательный момент.

Переходные процессы МУ при различных и равных напряжениях на обмотках представлены на рис. 11.

Несмотря на то, что в МУ реализована обратная связь от ДПР, его статические и дина-

мические характеристики являются неудовлетворительными. Для построения качественной системы необходимо замыкать ее по току, скорости (а для следящих систем и по положению вала) и синтезировать регуляторы. Следует заметить, что скорость для реализации обратных связей легко вычисляется из сигнала ДПР.

Параметрический синтез регуляторов в замкнутой системе

Одна из наиболее распространенных структур замкнутой системы с МУ представлена на рис. 12. В ней в качестве регуляторов тока используются релейные регуляторы (РРТ). Заметим, что таких регуляторов четыре.

Они управляют четырьмя СПП, которые, в свою очередь, питают четыре якорных обмотки МКМ. Регулятор скорости (РС) является общим, а на его вход подаются сигнал управления и сигнал обратной связи с вычислителя скорости (ВС).

На рис. 13 представлены электромагнитные процессы в разомкнутой по скорости системе с МУ при задании на вход регуляторов амплитуды тока 20 А. Электромагнитные моменты каждой МКМ и суммарный момент представлены на верхних осциллограммах. Токи в обмотках статора одной машины — на нижних осциллограммах.

В этом случае МУ является источником момента и его скорость нарастает линейно, о чем

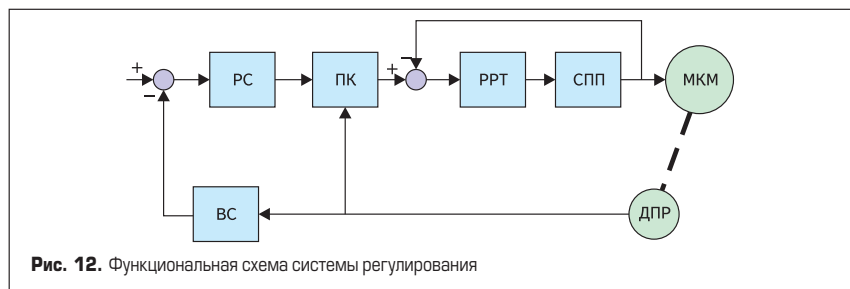
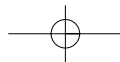


Рис. 12. Функциональная схема системы регулирования



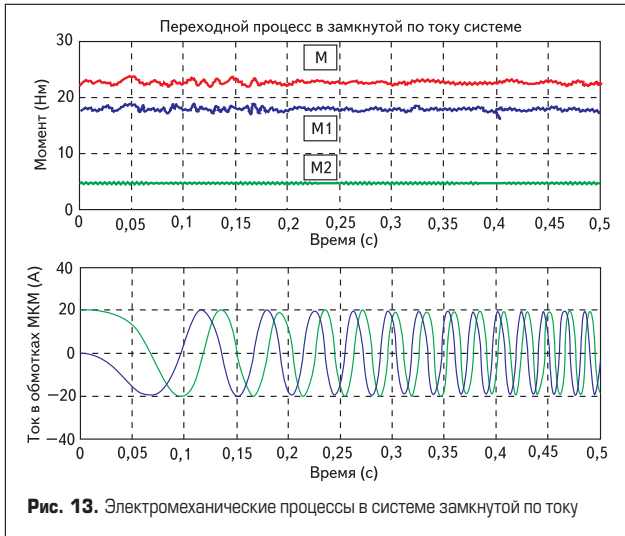


Рис. 13. Электромеханические процессы в системе замкнутой по току

свидетельствует рост частоты токов в обмотках якоря МКМ.

Токовый контур при релейных регуляторах является практически безинерционным (рис. 13). Поскольку момент трансцендентно зависит от положения вала (уравнения 4), МУ даже при наличии безинерционных токовых контуров является системой нелинейной.

Задача синтеза параметров регулятора для нелинейной системы может быть решена с использованием пакета прикладных программ Simulink Response Optimization. Этот прикладной пакет реализует метод динамической оптимизации при заданных ограничениях. В библиотеке пакета имеется блок Signal Constraint, который можно подключить к выходу системы. Этот блок позволяет задать ограничения на переходный процесс в системе как по управляющему, так и по возмущающему воздействию.

Синтез параметров регулятора в данной системе осуществлялся в два этапа. На первом этапе проведен синтез регулятора по управляющему воздействию. В этом случае момент нагрузки задавался постоянным, равным 10 Н·м. На втором этапе осуществлен синтез по возмущающему воздействию (моменту). В этом случае сигнал на входе системы задавался равным нулю. Окно блока Signal Constraint при синтезе регулятора по возмущающему воздействию показано на рис. 14.

Граничные значения переходного процесса задаются перемещением (Click and Drop) прямых линий. В данном случае провал скорости при набросе момента ограничен величиной

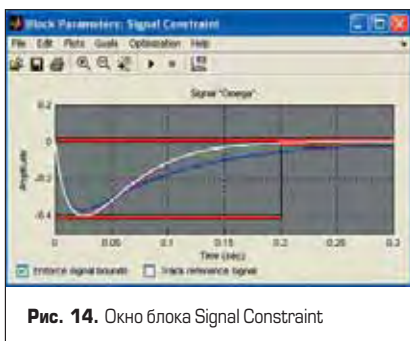


Рис. 14. Окно блока Signal Constraint

0,4 рад/с, а время восстановления заданной скорости — величиной 0,2 с. Промежуточные и конечный (яркая кривая) результаты оптимизации видны из рис. 14.

По завершении процесса оптимизации конечные результаты синтеза (параметры регулятора) высвечиваются в окне Optimization Progress (рис. 15).

В результате сравнения параметров регулятора, определенных на первом и втором этапе синтеза с учетом требований к системе, выбираются окончательные параметры регулятора. В данном случае были выбраны параметры, полученные при синтезе системы по возмущающему воздействию (рис. 15).

Переходный процесс в системе с таким регулятором по управляющему и возмущающему воздействию представлен на рис. 16 при задании скорости 2 рад/с и набросе момента нагрузки 10 Н·м.

Заключение

Магнитокоммутационная машина может найти широкое применение в приборном электроприводе, в промышленной автоматике и робототехнике, в современных транспортных системах, в медицине, в мехатронных системах современных компьютеров, в судовых и авиационных системах. Такие машины представляют собой дискретные конструкции, которые совместно с дискретными системами

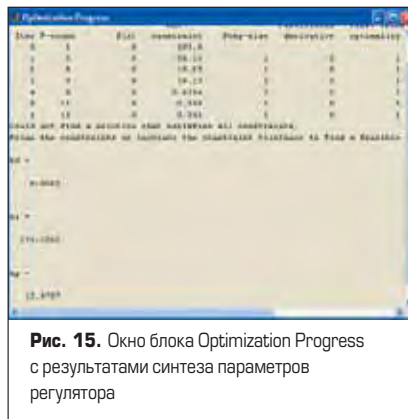


Рис. 15. Окно блока Optimization Progress с результатами синтеза параметров регулятора

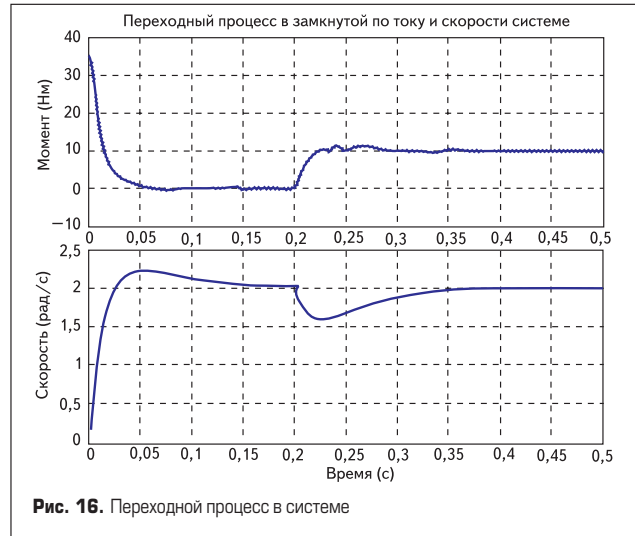


Рис. 16. Переходный процесс в системе

управления позволяют создавать гибкие мехатронные устройства с информационными и энергетическими возможностями, недоступными для традиционных конструкций.

XX век ознаменовался двумя техническими революциями в информатике и силовой электронике. На очереди революция в области электромеханики. Магнитокоммутационная машина и мехатронные системы на ее основе являются типичными представителями нетрадиционной электромеханики.

Литература

1. Afonin A. Trends in development of the unconventional electromechanical systems. In Proc. 2nd Intern. Conf. on Unconventional and Electromechanical Systems UEES'96. Poland. 1996. Vol. 1.
2. Afonin A. Multi-layer electromechanical energy converters // Electromotion. 1996. N 3.
3. Afonin A. Multi-layer electromechanical systems of linear and rotational motion. In Proc. 3rd Intern. Conf. on Unconventional and Electromechanical Systems UEES'97. Ukraine. 1997. Vol. 1.
4. Afonin A., Grebennikov V. Contactless electric motors of a new type — trends of development. In Proc. The Intern. Conf. on Electrical Drives and Power Electronics EDPE'96. Slovakia. 1996. Vol. 1.
5. Afonin A., Cierzniewski P. Multi-layer moving-magnet linear motors. In Proc. Intern. Symp. on Electrical Machines ICEM'98. Turkey. 1998. Vol. II.
6. Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P. Elektromechaniczne przetworniki Energii komutacja elektroniczna. Szczecin. 2000.
7. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. СПб.: КОРОНА принт. 2001.
8. Герман-Галкин С. Г. Некоторые вопросы создания компьютерных обучающих курсов электротехнического цикла // Exponenta pro. 2003. № 1.
9. Дьяконов В. SIMULINK 4. Специальный справочник. СПб.: Питер Пресс. 2002.
10. Черных И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений. М.: Диалог-МИФИ. 2004.