

Министерство образования и науки Российской Федерации
Российский государственный профессионально-педагогический
университет
Уральское отделение Российской академии образования
Академия профессионального образования

Г.К. Смолин

Е.Д. Тельманова

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ

Учебное пособие

*Допущено Учебно-методическим объединением
по профессионально-педагогическому образованию в качестве учебного
пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по специальностям 030500.08 Профессиональное обучение (машиностроение
и технологическое оборудование) и 030500.19 Профессиональное обучение
(электроэнергетика, электротехника и электротехнологии)*

Екатеринбург

2006

УДК 621.313.13:681.5.015

ББК 3 291 – 05: Ж. с 11

С 51

Смолин Г.К., Тельманова Е.Д. Моделирование в электромеханике: Учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2006. 67 с.

Изложены основы моделирования в электромеханике. Рассмотрены методы математического, структурного, графического и компьютерного моделирования, принципы компьютерного моделирования в программной среде Simulink, в частности моделирование разомкнутых систем управления электрическими двигателями.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальностям 050501.19 Профессиональное обучение (электроэнергетика, электротехника и электротехнологии), 050501.08 Профессиональное обучение (машиностроение и технологическое оборудование), направлению 140600 Электротехника, электромеханика и электротехнологии, а также для студентов электромеханических колледжей.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Б.С.Чуркин (Российский государственный профессионально-педагогический университет); д-р техн. наук, проф. Ф.Н. Сарпулов (Уральский государственный технический университет)

© Российский государственный
профессионально-педагогический
университет, 2006

© Смолин Г.К., Тельманова Е.Д., 2006

Введение

Успешная деятельность будущего специалиста электротехнического профиля во многом зависит от сформированности таких профессиональных качеств, как изобретательность и творческий подход. Речь идет об умении придумывать, находить или заимствовать, иначе говоря, изобретать новые методы достижения поставленных целей. Построение и исследование динамических моделей автоматизированных электроприводов может привести к открытию новых свойств системы и таким образом способствовать изобретательству. В процессе компьютерного моделирования эффективность деятельности специалиста возрастает, так как при этом он осуществляет структурную оптимизацию модели, проводит ее исследование и экспериментальную проверку.

Таким образом, моделирование динамических систем является мощным аналитическим средством, развивает способность оценивать различные варианты решений оптимизационных задач и находить наилучшие.

Учебное пособие является частью учебно-методического комплекса, обеспечивающего процесс обучения моделированию в электромеханике, направленного на развитие профессиональных качеств специалиста электротехнического профиля. Содержание пособия охватывает широко используемые методы моделирования в области электромеханики, в том числе с использованием компьютера и программного комплекса Matlab.

Авторы надеются, что предлагаемое учебное пособие внесет вклад в учебно-методическое обеспечение образовательного процесса в системе непрерывного профессионального образования и окажет существенную помощь студентам в приобретении необходимых знаний в области моделирования в электромеханике.

Глава 1. ОСНОВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И СТРУКТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1. Характеристика понятия «модель», цели и виды моделирования. Принципы моделирования динамических систем

В деятельности специалиста электротехнического профиля немаловажную роль играют такие профессиональные качества, как способность к исследовательской деятельности, интеллектуальная самостоятельность.

Интеллектуальная самостоятельность обусловлена способностью студента к самостоятельному научно-теоретическому мышлению и рациональному познанию. Средствами научно-теоретического мышления являются символические и знаковые системы, с помощью которых строятся идеализированные объекты, воспроизводящие наиболее значимые стороны действительности [9]. Один из видов символа-знаковой идеализации – моделирование.

Моделирование – это осуществление каким-либо способом отображения действительности для изучения существующих в ней объективных закономерностей. Модель и отображаемый с ее помощью объект находятся в отношении сходства, а не тождества. Расхождение результатов, получаемых на модели и реальном объекте, обусловлено следующими основными факторами:

- неточностью математического описания из-за принятых упрощающих допущений;
- погрешностью определения отдельных параметров, входящих в модель;
- погрешностью вычислений при численном моделировании;
- погрешностью проведения эксперимента на реальном объекте из-за отклонения параметров режима от заданных значений;
- погрешностью измерений и обработки результатов эксперимента.

В настоящее время при исследовании процессов в электротехнологических устройствах широко применяется математическое моделирование с помощью ЭВМ. Для этого необходимо сформировать в компьютере уравнения – математическую модель. При формировании математической модели стремятся использовать модели разумного уровня детализации, так как слишком близкая к натуре модель бесплодна, а слишком отдаленная – вводит в заблуждение [6]. Физические основы, на которых базируется математическая модель, должны быть постоянно в поле внимания исследователя.

Моделирование электротехнических устройств базируется на макроскопической теории электромагнитных явлений. При таком подходе не учитывают поведение отдельных элементарных частиц, а представляют электрические заряды как объемные в виде сплошных непрерывных заряженных участков материальных тел. Это оправдано тем, что самые малые электрические заряды, доступные наблюдению с помощью электроизмерительных приборов, содержат в себе миллиарды частиц, отделенных друг от друга ничтожно малыми расстояниями.

Задачи по моделированию электротехнических устройств разделяют на полевые и цепные. Решение полевых задач базируется на уравнениях Максвелла и позволяет получить наиболее полное представление о протекании электромагнитных процессов в электротехническом устройстве с учетом его конструктивных особенностей. Однако такое моделирование требует расчета трехмерного электромагнитного поля, что связано с большим объемом вычислений. Решение цепных задач базируется на использовании таких интегральных параметров электромагнитного поля, как ток, напряжение, сопротивление, проводимость, индуктивность и емкость. При таком подходе электротехнические и электронные устройства представляют в виде идеализированных элементов с сосредоточенными параметрами, соединенных в электрические цепи, которые

могут содержать как элементы с двумя выводами (двухполюсники), так и многополюсные элементы, например четырехполюсники.

Учение о моделировании возникло в середине XV в., когда Леонардо да Винчи начал обосновывать методы моделирования [6]. Он опровергает заключение о том, что модели своими действиями не могут соответствовать реальным объектам. Затем он выводит общие аналитические закономерности; предлагает, используя аналогии, описать процесс плавания под водой для получения более четкого представления о полете птицы в воздухе, создавать стеклянные модели глаз и т.п.

В дальнейшем И. Ньютоном, Ж. Фурье и Ж. Л. Ф. Бертраном были сформулированы основные положения постановки опытов на моделях. С развитием физических, технических и экономических наук с середины XIX в. моделирование стало широко использоваться для экспериментального изучения сложных систем.

В историческом аспекте ученые переходили от физического моделирования к аналоговому, а затем к математическому. Широко использовал аналоговое моделирование Дж. Максвелл. Для объяснения электромагнитных явлений он рассматривал механические аналогии. Н. Бор для наглядности механизма передачи энергии в атоме в качестве модели возбужденного ядра атома взял подогретую каплю. При этом он сопоставил испарение и радиоактивность.

В настоящее время с появлением вычислительных машин и высококачественного программного обеспечения именно математическое моделирование стало приоритетным направлением в области экспериментирования.

Для понимания сущности процесса моделирования обратимся к характеристике понятия «модель».

Модель – это мысленный, условный образ в виде описания, схемы, плана, графика и т.п. объекта, процесса или явления, который служит для воспроизведения некоторых характеристик реального объекта, подлежащего познанию [4, 6, 15, 18].

Е.С. Бенькович с коллегами под моделью объекта понимают любой другой объект, отдельные свойства которого полностью или частично совпадают со свойствами исходного [3]. Таким образом, авторы подчеркивают, что модель всегда ограничена и должна отражать только те свойства исходного объекта, которые необходимы для конкретного исследования. В.В. Давыдов дает следующее определение: модель – это форма научной абстракции особого рода, в которой выделенные существенные отношения объекта закреплены в наглядно воспринимаемых и представляемых связях и отношениях вещественных или знаковых элементов [9]. Ученый-педагог отмечает, что модель является продуктом сложной познавательной деятельности, а именно мыслительной переработки чувственного исходного материала.

Исчерпывающе полной модель быть не может. Она всегда ограничена и должна лишь соответствовать целям моделирования, отражая только те свойства исходного объекта и в такой полноте, которые необходимы для конкретного исследования [9, 18].

Исходный объект может быть либо реальным, либо воображаемым. В инженерной практике на ранних этапах проектирования имеют дело с воображаемыми исходными объектами. Те модели, которые еще не реализованы в виде реальных разработок объектов, называются предвосхищающими.

Можно выделить несколько целей, ради которых создаются модели: осмысление структуры и свойств исследуемого объекта, прогнозирование поведения объекта, проведение безопасных экспериментов, оптимизационные исследования, использование модели в качестве тренажера в процессе обучения или имитатора при стендовых испытаниях систем управления.

Модель, созданная в качестве средства осмысления, способствует выявлению взаимозависимости переменных, характера их изменения во времени, позволяет найти существующие закономерности. При этом структура исследуемого объекта становится более понятной, выявляются причинно-следственные

связи. Исходя из требований к модели, свойства исходного объекта можно разделить на существенные и второстепенные, найти в нем только те свойства, которые необходимы для выполнения строго определенных функций.

Как средство прогнозирования модель позволяет предсказать поведение объекта при различных вариантах управления. Эксперименты, проводимые не с реальными объектами, а с моделями, избавляют исследователя от ненужного риска. Если проводится исследование каких-либо критических режимов, то модель позволяет найти оптимальное соотношение параметров.

Дискуссионной является классификация моделей. В научной литературе представлены различные классификации:

- по свойству моделей – логические, геометрические, физические, математические, цифровые [4, 5];
- по преобразованию свойств и отношений модели в свойства и отношения оригинала – условные, аналогичные и математические [7];
- по характеру объекта моделирования – естественные и искусственные, материальные и мысленные [4, 5, 7];
- по видовому признаку – материальные, идеальные, предметные, символические;
- по форме выражения – механические, логические, математические;
- по предмету исследования – физические, химические, технические, медицинские и т.д.;
- по природе явления – социальные, экономические, биологические, психологические и т.д.;
- по задачам исследования – эвристические и прогностические [1];
- по объему – полные и неполные;
- по степени точности – приближенные, точные, достоверные и вероятные;

- по способу выражения – знаковые, вещественные и графические [1, 9];
- по свойствам отражения – функциональные, информационные и системные [17].

В.А. Веников предлагает определение *динамической модели* как модели электрической системы, построенной частично как физической (при неполном моделировании), а частично как аналоговой, дающей подобие протекания во времени электрических и электромеханических процессов в электрических машинах и сетях без сохранения подобия полей [6].

Если подходить к вопросу классификации моделей с позиций моделирования динамических систем, то условно все модели можно разделить на две группы: *идеальные* и *материальные*. Исходя из этого различают моделирование *абстрактное* и *предметное*. В процессе абстрактного моделирования создаются идеальные модели, предметного – макеты или аналоги исследуемых объектов [8].

Основными разновидностями *предметного* моделирования являются физическое, аналоговое и цифровое моделирование [6].

В основе *физического* моделирования лежит увеличенная или уменьшенная копия реального объекта, иными словами, макет. В физической модели могут сохраняться не только геометрические пропорции, но и материал, цветовая гамма исходного объекта и другие необходимые свойства.

При *аналоговом* моделировании исходный объект заменяется объектом другой физической природы, обладающим аналогичным поведением. Например, колебания и резонанс можно изучать с помощью механических систем или электрических цепей. Однако очень важно увидеть в объекте-заменителе нужные черты и правильно их интерпретировать. Разновидностью аналогового моделирования является *структурное* моделирование, при котором дифференциальные уравнения, описывающие физический процесс, представляются отдельными элементами модели [6].

Цифровое моделирование связано с применением цифровой вычислительной техники, что расширяет возможности проведения исследований, позволяет решать сложные задачи поиска оптимальных параметров. Модель системы разбивается на подсистемы, которые отображаются в виде блоков, связанных между собой. На выделенные подсистемы составляется математическое описание [6].

Абстрактное моделирование также можно разделить на два вида: интуитивное и знаковое [1].

В основе *интуитивного* моделирования лежит модель, не поддающаяся описанию. Это может быть жизненный опыт человека, с помощью которого он предсказывает или объясняет события, явления окружающего мира. В этом смысле человек является носителем интуитивной модели реального мира.

При *знаковом* моделировании в качестве моделей используются схемы, графики, чертежи, тексты на различных языках, включая формальные, математические формулы и теории. Знаковое моделирование всегда выполняется с участием интерпретатора – человека или компьютера.

Разновидностью такого моделирования является *математическое* моделирование, в основе которого лежат идеальные объекты. Изучение объектов, как правило, проводится с помощью дифференциальных уравнений при абстрагировании от физической природы исходного объекта. В дальнейшем полученные знания используются для исследования объектов конкретной физической природы.

Наиболее сложным является математическое описание динамических систем, так как в исходном варианте оно нелинейно. Поэтому математические расчеты таких систем выполняются с использованием методов фазовой плоскости, конечных приращений, гармонической линеаризации, кусочно-линейной аппроксимации нелинейных характеристик, линеаризации уравнений в окрестности точки статического равновесия путем разложения в ряд Тейлора.

Разновидностью математического моделирования является компьютерное моделирование. *Компьютерная модель* – это программная реализация математической модели, т.е. она имеет две составляющие: программную и аппаратную. Программная составляющая является другой формой абстрактной знаковой модели, которая может интерпретироваться процессором компьютера. Компьютерная модель проявляет свойства физической модели в момент интерпретации программной составляющей компьютером. Совместная работа компьютера и моделирующей программы называется электронным эквивалентом исходного объекта. Компьютерная модель сочетает в себе и абстрактные, и физические черты, обладает уникальным набором полезных свойств. Основное ее свойство – это простота создания и модификации. Функциональная сложность моделей практически не ограничена, вычисления проводятся с высокой точностью.

В зависимости от цели моделирования и класса моделируемого явления предпочтение отдается аналитической или имитационной модели. *Аналитическая* модель представляет собой систему алгебраических, дифференциальных, интегральных и других уравнений. Результатом вычислительной процедуры является точное решение. *Имитационная* модель воспроизводит функционирование исследуемой системы во времени с использованием математической модели. Исследователь в процессе имитационного моделирования имеет дело с тремя основными элементами: реальной системой, имитационной моделью и ЭВМ [20]. Применение такой модели наиболее эффективно при исследовании динамических систем. Однако имитационное моделирование – процесс сложный и трудоемкий, поэтому необходимо вооружиться мощными инструментальными средствами моделирования, такими как пакет Matlab.

Имитационная модель имеет два наиболее важных признака:

- представление в модели динамики системы;
- изменение модельного времени.

Итогом моделирования, как правило, является оптимизация тех или иных параметров системы. Потенциальные возможности имитационного моделирования значительно шире [8, 18, 20].

Разработка и использование математических моделей основываются на ряде принципов моделирования. Выделяют следующие принципы:

- информационной достаточности;
- осуществимости;
- множественности моделей;
- агрегирования;
- параметризации [8].

В основе принципа *информационной достаточности* лежит утверждение о том, что адекватная модель системы может быть построена только при достаточном уровне априорных сведений о ней. При отсутствии информации построить модель невозможно, при избытке информации моделировать не имеет смысла.

Модель считается *осуществимой*, если вероятность достижения цели исследования значительно отличается от нуля, граница времени достижения приемлема.

Принцип *множественности* моделей является основным. Речь идет о том, что всесторонне познать реальность можно только на нескольких моделях, позволяющих отражать интересующий нас процесс с разных сторон.

В основе принципа *агрегирования* лежит деление сложных систем на подсистемы, что не только упрощает математическое описание, но и позволяет гибко перестраивать модель.

С помощью принципа *параметризации* можно сократить объем моделирования за счет замены некоторых подсистем числовыми величинами.

На этапе разработки модели необходимо уточнить цели и задачи моделирования, определить тип разрабатываемой модели, а по окончании определить степень соответствия модели первоначальному

замыслу разработчика. Поэтому классификация систем имеет большое значение. Рассмотрим классификацию.

Моделируемые системы по признаку мощности множества состояний можно разделить на статические и динамические [8].

Динамические системы имеют больше одного состояния или изменяются во времени, другими словами, поведение таких систем зависит от времени [3, 8]. Различают два типа динамических систем: с дискретными состояниями и с непрерывным множеством состояний. Если в каждый промежуток времени определяется состояние системы, то мы имеем дело с динамической системой с *дискретными состояниями*. Примером такой системы может служить изменение числа заявок в сфере обслуживания. Примером системы с *непрерывным множеством состояний* является капля в процессе падения, форма которой непрерывно меняется.

В зависимости от условий перехода системы из одного состояния в другое различают детерминированные системы и стохастические. Для *детерминированной* системы можно точно определить, в какое состояние она перейдет. У *стохастической* системы существует множество возможных состояний перехода.

Модель считается корректной в случае ее принадлежности к тому же классу, что и реальная система [8].

Динамические системы можно представлять различными способами как в виде систем дифференциальных уравнений, так и в виде явных формул решений этих систем. Приняты следующие способы описания систем:

- формулами вида $z = z(t)$;
- нелинейными алгебраическими уравнениями вида $G(z(t), t) = 0$;
- дифференциальными уравнениями в форме систем уравнений первого порядка вида $dz/dt = F(z, t)$;
- алгебро-дифференциальными уравнениями вида $dz/dt = F(z, v, t)$, $G(z, v, t) = 0$.

Таким образом, математическая модель динамической системы представляет собой систему уравнений. Прежде чем приступить к

решению такой системы, необходимо выполнить ряд вспомогательных и трудоемких операций по сортировке формул и преобразованию системы уравнений к виду, удобному для ее решения. Сложные и продолжительные численные методы решения систем, а также сопутствующие предварительные процедуры можно переложить на вычислительную машину. Программная реализация численных методов решения систем зависит от вида дифференциальных уравнений. Если динамическая система описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями в форме Коши, то для их решения прекрасно подойдут такие математические пакеты, как Matlab, Mathematica, Maple.

В чем же отличие между математическим и компьютерным моделированием? Математическое моделирование – это изучение свойств новой теоретической модели численными методами с помощью машинной арифметики. Под компьютерным моделированием понимают проектирование различных систем с помощью графических сред. Моделирование динамических систем, в которых состав компонентов изменяется во времени, практически не осуществимо при помощи пакетов математического моделирования. В этом случае речь идет о компонентном моделировании с использованием пакетов компонентного моделирования [3].

Основой пакета компонентного моделирования является блок, представляющий собой аналог реального устройства или компонента. Блоки соединяются между собой в функциональные схемы. Компонентное моделирование динамических систем позволяет выполнять программа Simulink, в которой реализованы принципы визуально-ориентированного программирования. Simulink выгодно отличается от множества подобных программ удобством графического пользовательского интерфейса, обилием блоков компонентов в множестве библиотек, разнообразием виртуальных средств регистрации и визуализации результатов моделирования [10]. Пакет Simulink входит в состав системы Matlab, что имеет глубокий смысл, так как каждый пакет выполняет свои взаимосвязанные

функции. Моделирующая программа Simulink автоматически составляет сложные конечно-разностные системы для линейных, нелинейных и дифференциальных уравнений. Эффективным решением таких систем с применением аппарата матричных вычислений занимается система Matlab. Кроме того, Simulink использует практически любые операторы, функции и язык программирования системы Matlab [10].

Компонентное моделирование динамической системы является составной частью имитационного моделирования, когда компьютер моделирует определенные предметные ситуации, при этом для анализа функционирования синтезированной структуры требуется проведение ряда экспериментов с ней [1]. Кроме того, имитационное моделирование желательно сочетать с оптимизационным моделированием, что позволяет сделать исследование наиболее полным и завершенным [18, 20]. Эксперименты с моделью проводятся на ЭВМ путем машинных прогонов с целью получения данных о функционировании системы в течение определенных интервалов времени. Имитационное моделирование складывается из ряда основных этапов, имеющих определенную последовательность [18, 20].

Обобщение вышесказанного подтверждает определение *моделирования* как любого метода опосредствованного практического или теоретического, мысленного или опытного оперирования объектом [6]. В процессе моделирования всегда используется промежуточный «квазиобъект», находящийся в объективном соответствии с познаваемым объектом и называемый *моделью*.

1.2. Уравнение движения и математическая модель механической части двухмассовой механической системы

Исследовать динамику электропривода (ЭП) в лабораторных условиях очень сложно из-за трудности постановки экспериментов, поэтому исследования переходных процессов удобнее проводить на

моделях. Математическая модель представляет собой комплекс уравнений, описывающих работу ЭП и системы управления. Для построения графиков переходных процессов необходимо решить систему дифференциальных уравнений. Рассмотрим механическую часть двухмассовой системы (рис. 1.1).

Двухмассовая механическая система – это система, состоящая из двух масс, соединенных между собой упругой связью. Первая масса представляет собой ротор электродвигателя, вторая масса – исполнительный орган, упругая связь между ними – механическое передаточное устройство. Массы характеризуются моментами инерции J_1 и J_2 .

На рис. 1.1 изображена расчетная схема, на основе которой составляется математическое описание устройства, т.е. модель двухмассовой системы, поэтому на ней указываются все параметры и значения, необходимые для расчета:

- ω_1 – скорость первой массы;
- ω_2 – скорость второй массы;
- M_1 – момент, развиваемый первой массой;
- M_{c1} – статический момент, обусловленный трением;
- M_{c2} – статический момент, обусловленный нагрузкой на второй массе;
- M_{12} – момент упругого взаимодействия.

В статическом режиме работы $\omega_1 = \omega_2 = \text{const}$, в динамическом – $\omega_1 \neq \omega_2 = \text{var}$.

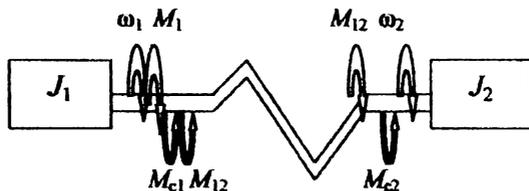


Рис. 1.1. Расчетная схема

В расчетной схеме можно выделить три звена, которые описываются математически. Для этого каждое звено выделяется отдельно с обозначением всех расчетных параметров (рис. 1.2).

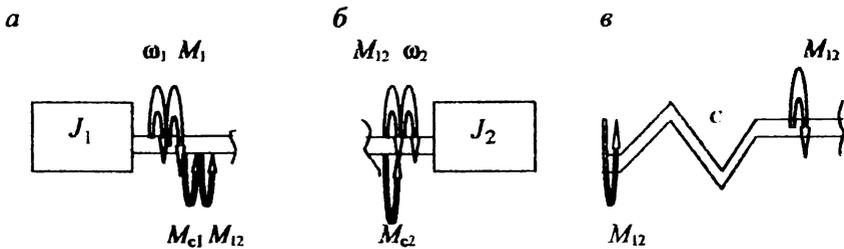


Рис. 1.2. Звенья двухмассовой системы:
а – первое; б – второе; в – третье

Составим математические уравнения для каждого звена. На основании второго закона Ньютона для вращающихся масс $\sum M = J \frac{d\omega}{dt}$.

$$M_1 - M_{c1} - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt},$$

$$M_{12} = C(\varphi_1 - \varphi_2),$$

$$M_{12} - M_{c2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}.$$

1.3. Динамические модели

В теории управления используются два вида динамических моделей. Первый вид основан на представлении процессов в переменных «входы – выходы», где входы – это воздействие на систему, а выходы – физические переменные, характеризующие поведение системы. Второй вид моделей использует представление системы в переменных состояния, связанных с выходными в виде математического описания.

Динамическая модель в виде «входы – выходы» используется для структурного моделирования. При этом входами считают воздействия на систему (M_{c1} , M_{c2}). Выходными величинами как правило являются результаты этого воздействия (ω_1 , ω_2).

Перед выполнением динамической модели необходимо уравнения математической модели представить в операторном виде. Для этого заменим d/dt на p , затем продифференцируем уравнения:

$$M_1 - M_{c1} - M_{12} = J_1 p \omega_1;$$

$$M_{12} - M_{c2} = J_2 p \omega_2;$$

$$M_{12} p = C(\omega_1 - \omega_2).$$

Преобразуем полученную систему уравнений в удобный для структурного моделирования вид:

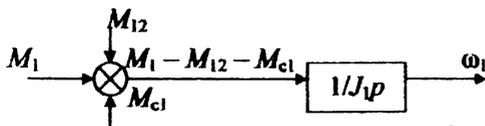
$$(M_1 - M_{c1} - M_{12}) \frac{1}{J_1 p} = \omega_1$$

$$(M_{12} - M_{c2}) \frac{1}{J_2 p} = \omega_2;$$

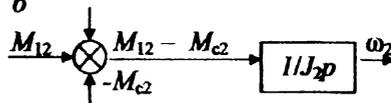
$$(\omega_1 - \omega_2) \frac{C}{p} = M_{12}.$$

Для каждого уравнения составим структурную схему, где \otimes – сумматор. Выходные сигналы обозначим стрелками, все параметры (p, C, J и т.д.) поместим в рамку \square (рис. 1.3).

a



б



в

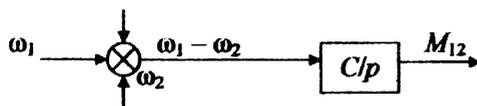


Рис. 1.3. Структурные схемы:

a – первое звено; *б* – второе звено; *в* – третье звено

Полученные структурные схемы каждого звена необходимо объединить в одну двухмассовую систему (рис. 1.4).

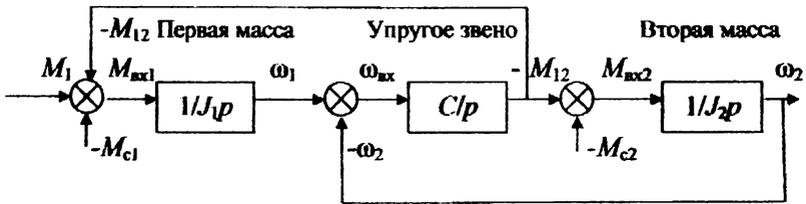


Рис. 1.4. Структурная схема двухмассовой системы

Основой каждого звена является величина, заключенная в рамку, вида k/p .

Звенья такого типа называются интегрирующими. Выражение в рамке каждого звена является передаточной функцией:

$$W_1(p) = \frac{1}{J_1 p} = \frac{\omega_1(p)}{(M_1 - M_{c1} - M_{12})(p)};$$

$$W_2(p) = \frac{1}{J_2 p} = \frac{\omega_2(p)}{(M_{12} - M_{c2})(p)};$$

$$W_3(p) = \frac{C}{p} = \frac{M_{12}(p)}{(\omega_1 - \omega_2)(p)}.$$

Полученную трехзвенную структурную схему можно свернуть в однозвенную. Выполняется это в том случае, когда схема имеет сложный вид. Тогда все передаточные функции преобразуют в одну (рис. 1.5).

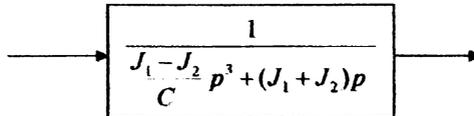


Рис. 1.5. Однозвенная структурная схема

1.4. Двухмассовая механическая система в дискретном варианте

Если в системе управления электроприводом используются цифровые устройства, выполненные на базе микропроцессоров, то сигналы, поступающие с двухмассовой системы на вход этих аппаратов, следует преобразовывать в дискретные. Для преобразования аналогового сигнала в дискретный его необходимо квантовать по времени и по уровню.

Квантование по времени – это сьем значений непрерывной функции в дискретные моменты времени: $0, T, 2T, 3T \dots kT$, где T – период дискретизации по времени.

Квантование по уровню – это округление аналогового сигнала до ближайшего возможного дискретного сигнала (0; 1). Чтобы ввести полученный сигнал в ЭВМ, его необходимо закодировать. Величина kT представляет собой интервал квантования и может быть выражена в виде решетчатой функции (рис. 1.6).

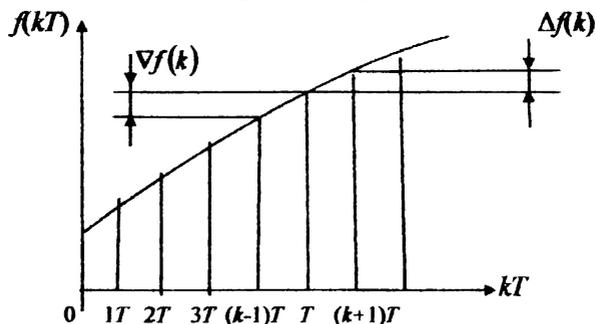


Рис. 1.6. Решетчатая функция

В процессе дискретизации используется приращение функции за один интервал T . Первая правая разность имеет вид

$$\Delta f(k) = f(k+1) - f(k),$$

тогда первую обратную разность можно записать в виде

$$\nabla f(k) = f(k) - f(k-1).$$

Преобразование аналогового сигнала в дискретный изображается с помощью квантователя или ключа. На выходе квантователя получаем дискретный сигнал, т.е. квантованный по времени и по уровню, или цифровой. Полученный дискретный сигнал можно запомнить с помощью фиксатора. Сочетание квантователя и фиксатора представляет собой устройство выборки и хранения (рис. 1.7).

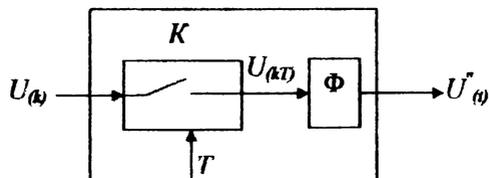


Рис. 1.7. Устройство выборки и хранения

В динамической модели двухмассовой системы все переменные «вход – выход» становятся дискретными переменными вида $M_1(kT)$, $M_{12}(kT)$, $M_{c1}(kT)$, $M_{c2}(kT)$, $\omega_1(kT)$, $\omega_2(kT)$ (рис. 1.8).

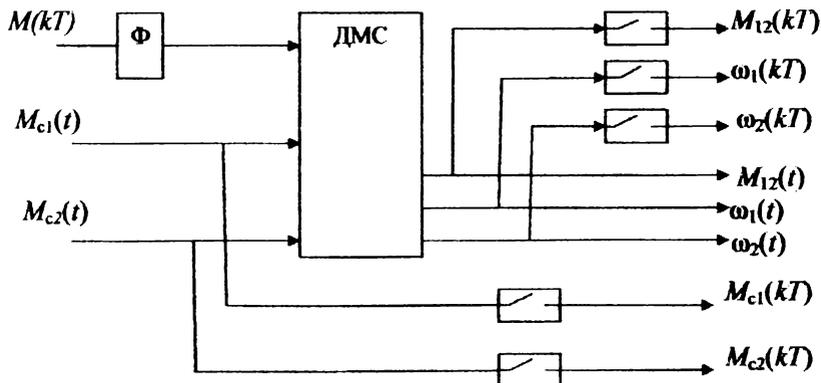


Рис. 1.8. Двухмассовая система в дискретном варианте

Для выполнения структурной схемы двухмассовой системы в дискретном варианте дифференциальные уравнения математической модели преобразуем в систему разностных уравнений:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \frac{1}{pJ_1}(M_1 - M_{e1} - M_{12}); \\ \omega_2 &= \frac{1}{pJ_2}(M_{12} - M_{e2}); \\ pM_{12} &= C(\omega_1 - \omega_2); \\ \frac{\Delta\omega_1}{\Delta t} &= \frac{M_1}{J_1} - \frac{M_{e1}}{J_1} - \frac{M_{12}}{J_1}; \\ \frac{\Delta\omega_2}{\Delta t} &= \frac{M_{12}}{J_2} - \frac{M_{e2}}{J_2}; \\ \frac{\Delta M_{12}}{\Delta t} &= C\omega_1 - C\omega_2.\end{aligned}$$

Заменяем дифференциалы первыми прямыми разностями:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\omega_1(k)}{T} &= \frac{M_1(k)}{J_1} - \frac{M_{e1}(k)}{J_1} - \frac{M_{12}(k)}{J_1}; \\ \frac{\Delta\omega_2(k)}{T} &= \frac{M_{12}(k)}{J_2} - \frac{M_{e2}(k)}{J_2}; \\ \frac{\Delta M_{12}(k)}{T} &= C\omega_1(k) - C\omega_2(k).\end{aligned}$$

На основании выражения $\Delta f(k) = f(k+1) - f(k)$ преобразуем дифференциальные уравнения, т.е. выполним дискретизацию:

$$\begin{aligned}\Delta\omega_1(k) &= \frac{TM_1(k)}{J_1} - \frac{TM_{e1}(k)}{J_1} - \frac{TM_{12}(k)}{J_1}; \\ \Delta\omega_2(k) &= \frac{TM_{12}(k)}{J_2} - \frac{TM_{e2}(k)}{J_2}; \\ \Delta M_{12}(k) &= TC\omega_1(k) - TC\omega_2(k).\end{aligned}$$

При этом считается, что $f(k)$ – это текущее значение переменной, а $f(k+1)$ – будущее:

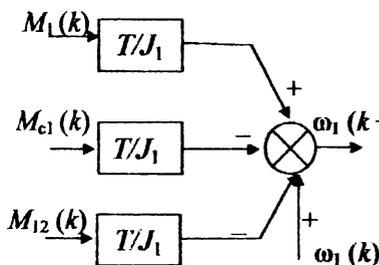
$$\Delta\omega_1(k+1) = \frac{T}{J_1} M_1(k) - \frac{T}{J_1} M_{e1}(k) - \frac{T}{J_1} M_{12}(k) + \Delta\omega_1(k);$$

$$\Delta\omega_2(k+1) = \frac{T}{J_2} M_{12}(k) - \frac{T}{J_2} M_{e2}(k) + \Delta\omega_2(k);$$

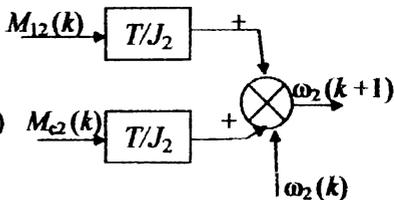
$$\Delta M_{12}(k+1) = TC\omega_1(k) - TC\omega_2(k) + \Delta M_{12}(k).$$

На основании разностных уравнений составим структурные схемы каждого звена (рис. 1.9).

а



б



в

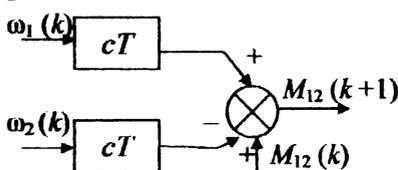


Рис. 1.9. Структурные схемы в дискретном варианте:

а – первое звено; б – второе звено; в – третье звено

Для объединения звеньев в одну структурную схему необходимо преобразовать будущее значение переменной в текущее, для чего используется элемент памяти П, который задерживает сигнал на время T (рис. 1.10).

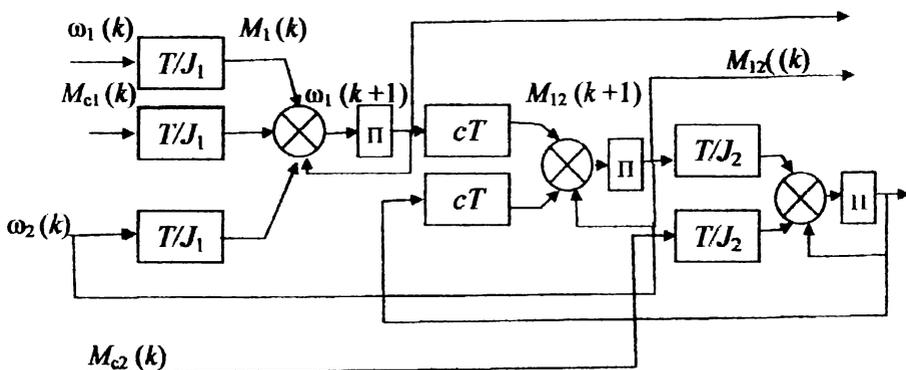


Рис. 1.10. Механическая часть двухмассовой системы
в дискретном варианте

1.5. Модели управляющих устройств

Устройства управления, как и механическая часть двухмассовой системы (ДМС), могут быть двух видов: аналоговыми и дискретными.

Аналоговые устройства описываются дифференциальными уравнениями, в которых связаны переменные «входы – выходы». Дискретные устройства описываются разностными уравнениями.

Рассмотрим пример аналогового устройства управления. Задача устройства – стабилизировать скорость движения, т.е. поддерживать ее на одном уровне. В качестве регулирующего устройства можно взять силовой преобразователь (СП), который регулирует напряжение на двигателе в зависимости от сигнала, поступающего с него (рис. 1.11). Такой принцип регулирования скорости описывается следующим уравнением:

$$y(t) = k_n \cdot \left[u(t) + \frac{1}{T_n} \int_0^t u(t) dt \right],$$

где $k_n = k_{o.c}$ – коэффициент передачи;

$y(t)$ – сигнал управления с преобразователя на двигатель;

$u(t)$ – сигнал рассогласования, равный $u(t) = \omega_3(t) - \omega_{oc}(t)$;

T_n – постоянная интегрирования.

Выполним преобразования:

$$y(t) = k_n u(t) + \frac{k_n}{T_n} \int_0^t u(t) dt.$$

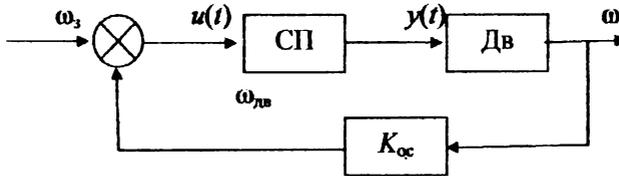


Рис. 1.11. Структурная схема системы регулирования скоростью двигателя

Из уравнения видно, что выходной управляющий сигнал пропорционален сигналу рассогласования и интегралу от него $\int_0^t u(t) dt$. Таким образом, рассмотренное устройство управления можно считать пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором.

Математическая модель ПИ-регулятора имеет вид

$$\int_0^t U(t) dt = x(t);$$

$$y(t) = k_n U(t) + \frac{k_n}{T_n} x(t);$$

$$U(t) = \frac{dx(t)}{dt}.$$

Составим на каждое уравнение структурную схему (рис. 1.12).

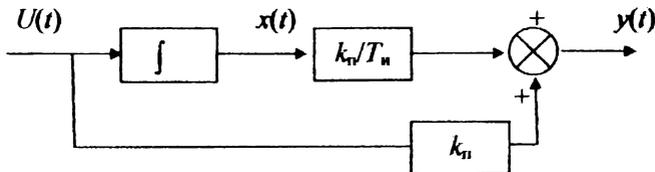


Рис. 1.12. Структурная схема ПИ-регулятора

Для перехода к дискретному варианту ПИ-регулятора дифференциальные уравнения математической модели преобразуем в систему разностных уравнений.

$$y(k) = k_n u(k) + \frac{k_n}{T_n} x(k);$$

$$x(k+1) = x(k) + T_n \dot{x}(k).$$

Выполним структурные схемы для каждого уравнения (рис. 1.13).

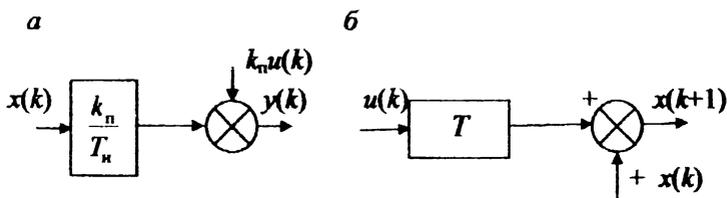


Рис. 1.13. Структурные схемы в дискретном варианте:

a – первое звено; *b* – второе звено

В общем виде ПИ-регулятор представлен на рис. 1.14. П – память, или элемент задержки времени (задерживает сигнал на один такт дискретизации генератора, до нового сигнала); *T* – тактовый генератор.

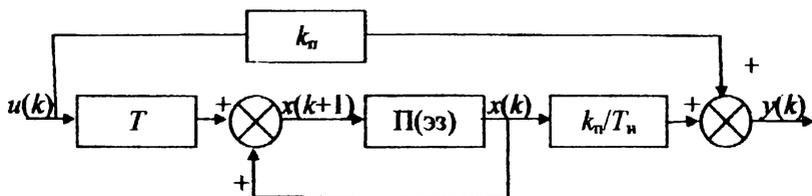


Рис. 1.14. ПИ-регулятор в дискретном варианте

Принцип работы цифрового регулятора заключается в следующем. С появлением дискретного импульса от тактового

генератора считывается состояние входа $u(k)$ и на основании текущего состояния системы $x(k)$ формируется выходной сигнал $y(k)$, затем рассчитывается будущее (новое) состояние системы $x(k+1)$ по уравнению математической модели в дискретном варианте. Значение $x(k+1)$ устанавливается на входе элемента памяти П.

На основании вышеизложенного ПИ-регулятор в дискретном варианте можно считать последовательным автоматом.

В общем случае дискретные управляющие автоматы можно выполнять по двум принципам: с использованием элементов жесткой логики (реле, контакторы, интегральные микросхемы) (рис. 1.15); на основе программируемой логики. В основе второго управляющего автомата лежит процессор, который управляет по заранее составленной программе.

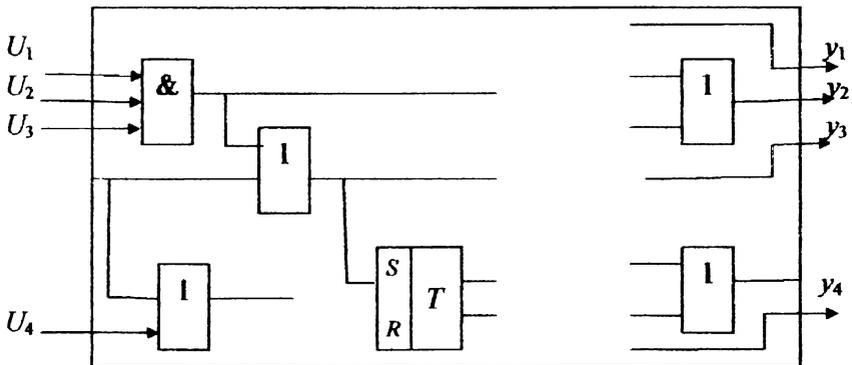


Рис. 1.15. Устройство управления на основе жесткой логики

Контрольные вопросы

1. Каковы цели создания моделей?
2. Дайте определение динамической модели.

3. В чем отличие между математическим и компьютерным моделированием?

4. Как выполнить переход от расчетной схемы двухмассовой механической системы к ее динамической модели вида «входы – выходы»?

5. Какова сущность преобразования аналогового сигнала в дискретный сигнал?

6. Объясните назначение элемента задержки времени в структурной схеме двухмассовой механической системы (дискретный вариант).

7. В чем заключается принцип работы цифрового пропорционально-интегрального регулятора?

Глава 2. ГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ АВТОМАТОВ

Дискретные управляемые автоматы могут быть синхронными и асинхронными.

Синхронные автоматы меняют свое состояние в строго определенные моменты времени, которые задаются тактовым генератором. Выполняются они на основе бесконтактной логики.

Асинхронные автоматы меняют свое состояние только при изменении состояния входа. Примером таких автоматов могут быть релейно-контакторные схемы управления.

Асинхронные и синхронные автоматы, в свою очередь, делятся на два вида: автоматы Мура и Милли. В *автомате Мура* сигнал на выходе зависит от внутреннего состояния управляемого автомата, в *автомате Милли* – от состояния входа.

Рассмотренные дискретные автоматы можно моделировать графическим способом. При этом строится граф автомата с использованием двух основных элементов. Один из элементов – вершина графа в виде овала, в котором указывается текущее состояние автомата. Второй элемент графа – дуга со стрелкой, которая отображает смену состояния автомата в сторону стрелки (рис. 2.1).

Далее выполняются функции включения и отключения управляемого элемента, на основе которых составляется релейно-контакторная схема управления. В электроприводе распространено автоматическое управление пуском, торможением и реверсом двигателя. Схемы управления выполняются на основе реле и контакторов и представляют собой асинхронные автоматы. Элементом памяти в них является *RS*-триггер, который в релейно-контакторном исполнении представлен на рис. 2.2. U_1 и U_2 являются входными сигналами, X – выходным.

При подаче напряжения на катушку триггер устанавливается. Условия установки триггера: $S = 1$, $R = 0$.

При сбросе триггера $R = 1$.

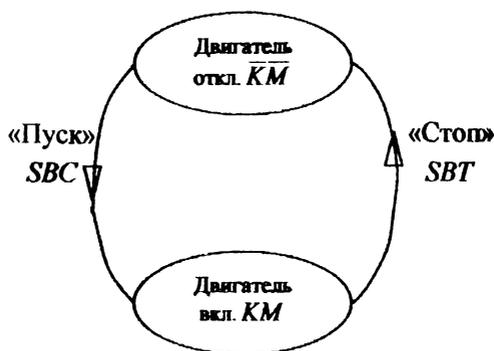


Рис. 2.1. Граф автомата управления двигателем

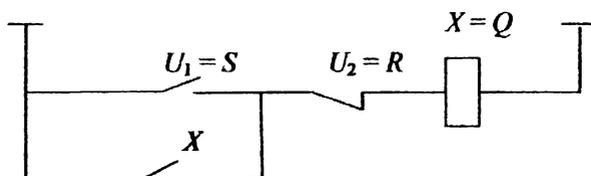


Рис. 2.2. RS-триггер в релейно-контакторном исполнении

Рассмотрим процесс графического моделирования.

Необходимо разработать релейно-контакторную схему управления насосом (рис. 2.3).

Система управления должна обеспечивать автоматическое поддержание уровня воды в резервуаре между двумя отметками. Для контроля за уровнем используем два датчика воды: $SQ1$ – нижнего уровня (контакты замкнуты) и $SQ2$ – верхнего уровня (контакты разомкнуты).

На начальном этапе моделирования необходимо построить граф автомата, в котором управляющим элементом является контактор KM . Смена состояния автомата должна происходить в результате срабатывания датчиков $SQ1, SQ2$ (рис. 2.4).

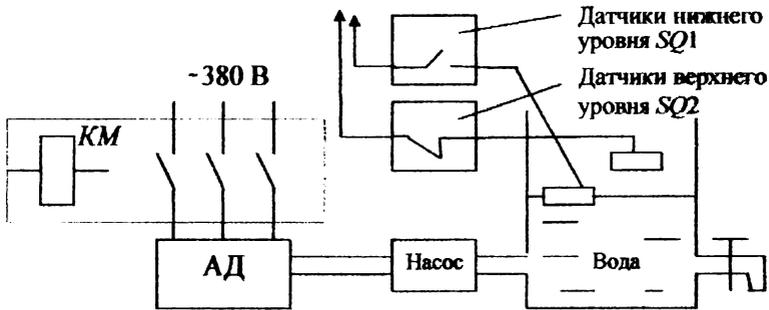


Рис. 2.3. Электропривод насоса

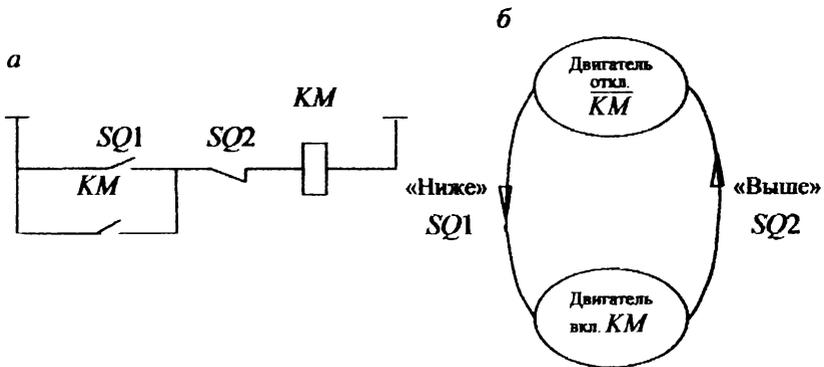


Рис. 2.4. Автомат насоса:

a – схема управления, *б* – граф автомата

Схема управления имеет вид *RS*-триггера, установка которого происходит в результате срабатывания датчика *SQ1*, а сброс – при срабатывании датчика *SQ2*.

Логическое уравнение, на основании которого строится релейно-контакторная схема, можно записать следующим образом:

$$KM(k+1) = (SQ1 + KM(k))SQ2.$$

Включение и отключение системы управления насосом выполняется кнопками: *SBC* – «Пуск», *SBT* – «Стоп». Управляющим элементом является электромагнитное реле или контактор *K*.

Функция включения имеет вид

$$K(K+1) = (SBC + K(k))\overline{SBT}.$$

Граф автомата и схема управления представлены на рис. 2.5.

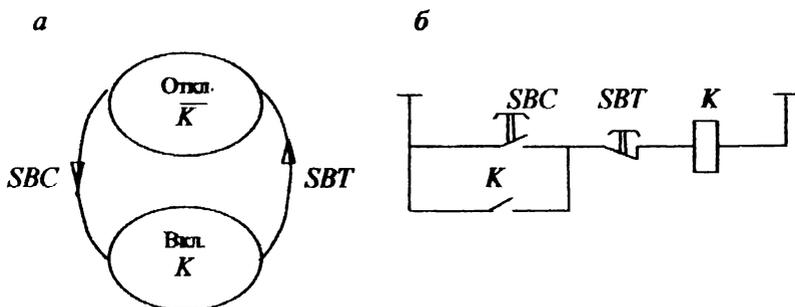


Рис. 2.5. Автомат системы управления насосом:

a – граф автомата; *б* – схема управления

Объединив обе схемы управления в одну, получим принципиальную схему электропривода насоса, в которой предусматривается тепловая защита с помощью реле *KK* (рис. 2.6).

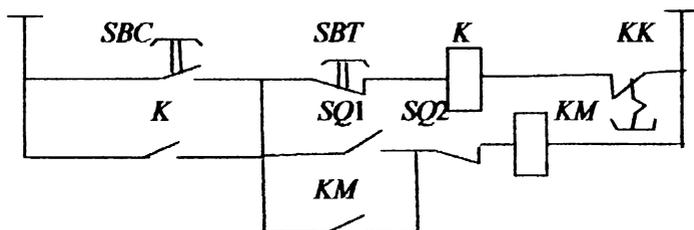


Рис. 2.6. Принципиальная схема электропривода насоса

Рассмотрим еще один пример графического моделирования, задачей которого является построение графа автомата и принципиальной схемы управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения в автоматическом режиме.

Пуск реостатный в две ступени, торможение динамическое. Пуск осуществляется путем установки реле напряжения в якорную цепь, которые контролируют скорость двигателя (рис. 2.7).

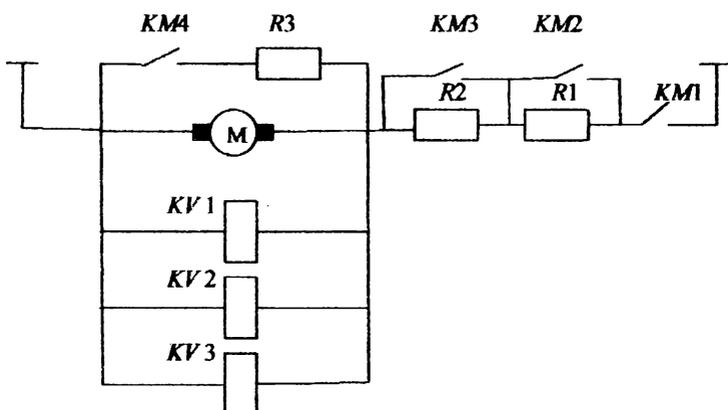


Рис. 2.7. Схема силового канала двигателя постоянного тока

Двигатель запускается при полностью введенном сопротивлении, контактор *KM1* замкнут, контакторы *KM2*, *KM3*, *KM4* разомкнуты. По мере разгона по команде от реле напряжения *KV1* и *KV2* контакторы *KM2*, *KM3* замыкаются, поочередно шунтируя резисторы. Торможение происходит по команде от реле *KV3*. При этом *KM1* отключается, а *KM4* включается, замыкая якорь на тормозное сопротивление *R3*. Пуск осуществляется кнопкой «Пуск» *SBC*, а остановка – кнопкой «Стоп» *SBT*. Граф автомата системы управления изображен на рис. 2.8.

Затем, опираясь на графическую модель системы управления реостатным пуском двигателя постоянного тока, выполним релейно-контакторную схему управления электроприводом (рис. 2.9).

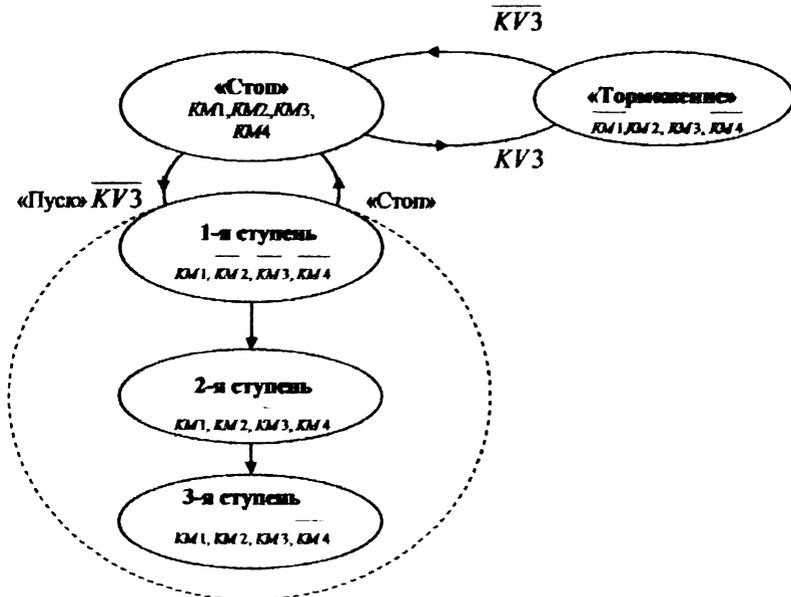


Рис. 2.8. Граф автомата системы управления

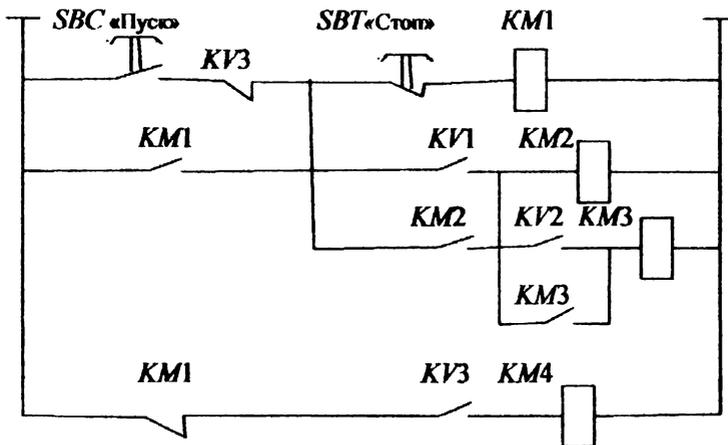


Рис. 2.9. Принципиальная схема управления реостатным пуском двигателя и динамическим торможением

Контрольные вопросы

1. Какова классификация дискретных управляемых автоматов?
2. Назовите основные элементы графа автомата системы управления. Каково их назначение?
3. Какова последовательность моделирования системы управления электроприводом с использованием графов?
4. Напишите функция включения контакторов *KM1*, *KM2*, *KM3*, *KM4* в схеме, изображенной на рис. 2.9.

Глава 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

3.1. Понятие компьютерной модели и характеристика программного обеспечения моделирования

Компьютерное моделирование является разновидностью математического моделирования. *Компьютерная модель* – это программная реализация математической модели, дополненная различными служебными программами, которые могут рисовать, изменять графические образы во времени. Компьютерная модель имеет две составляющие: программную и аппаратную.

Анализ состояния программного обеспечения схемы технологического моделирования показал, что для исследовательских работ в области автоматизированного ЭП можно использовать следующие программы:

- Simulink и Stateflow;
- Model Vision Studium;
- Design Lab 8.0;
- Elektronik Workbench.

В пакете Simulink пользователь имеет дело с графической формой языка моделирования. Компоненты программы представлены в виде блоков двух типов: «вход – выход» и «вход – выход – состояние».

Различные по функциональному назначению классы собраны в библиотеки (непрерывные, дискретные, нелинейные, математические блоки, источники, приемники, генераторы). С помощью Simulink можно моделировать и анализировать динамические системы (пуск, торможение, реверс). При этом используется графический язык блок-диаграмм.

В процессе проектирования, наладки и эксплуатации ЭП необходим детальный анализ переходных процессов, тем более что существуют различные способы пуска, торможения и реверса, возможны режимы изменения нагрузки (крановый ЭП). Известно, что

динамика ЭП описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, которые могут решаться различными методами, позволяющими анализировать переходные процессы с необходимой точностью. Наиболее эффективным и широко используемым методом расчета является решение системы нелинейных дифференциальных уравнений с помощью ЭВМ (моделирования).

Все модели условно можно разделить на группы (рис 3.1).



Рис. 3.1. Классификация моделей

Из представленной классификации видно, что с помощью компьютерного моделирования создаются и исследуются идеальные модели, представляющие собой абстрактные образы реальных или воображаемых объектов.

3.2. Построение и исследование динамических моделей в программной среде Simulink

Рассмотрим процесс работы с программой. Так как Simulink является основной частью пакета Matlab, то сначала загружается эта система, а затем запускается подсистема Simulink непосредственно из

основного окна, для чего необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по кнопке запуска этой системы, находящейся в верхней части окна. Запуск можно также осуществить набором команды *Simulink* в основном окне. После запуска откроется окно просмотра библиотек Simulink, которое называется *Simulink Library Browser*. Для создания новой модели или открытия уже существующей необходимо открыть окно, в котором будет происходить построение модели или уже имеется модель. Две крайние левые кнопки в верхней части окна служат для выполнения этой задачи. После нажатия на одну из кнопок появляется окно *Untitled 1*.

Процесс построения модели Simulink происходит в следующем порядке:

- выбор из библиотек Simulink необходимых блоков;
- размещение блоков в окне *Untitled* и задание межблочных связей;
- установка для каждого блока соответствующих параметров, отвечающих требованиям моделируемой системы.

Блок из библиотеки представляет собой систему «входы – выходы – состояние» или просто «входы – выходы».

Блок переносится из библиотеки в окно модели в результате выполнения операции *drag and drop* (перетаскивание объекта при помощи мыши). Пользователю доступны входы, выходы и параметры блока. С помощью связей блоки объединяются в систему. Для установки соответствующих параметров блока достаточно сделать двойной щелчок левой кнопкой мыши по пиктограмме блока. В открывшемся диалоговом окне устанавливаются параметры с использованием клавиатуры. Для соединения двух блоков между собой необходимо подвести курсор мыши в форме крестика к порту одного из соединяемых блоков. Далее следует нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее, осуществить перемещение курсора к другому порту. Simulink позволяет копировать блоки непосредственно в окне модели. Курсор устанавливается на требуемый блок, нажимают правую кнопку и, удерживая ее в нажатом положении, перемещают

курсор в нужное место, где и появляется скопированный блок. Имеющуюся структурную модель можно свернуть в один блок, который называется *Subsystem*: курсором выделяется сворачиваемая структура в пункте меню *Edit*, выбирается команда *Create Subsystem*, при этом в основном окне образуется блок под названием *Subsystem*. Существует стандартный метод выделения части системы в составной блок. В библиотеке блока *Subsystem* выбирается необходимый блок и переносится в окно для моделирования. Затем раскрывается окно перенесенного блока и в нем формируются структурные подсистемы.

После окончания выполнения динамической модели в окне построения необходимо задать параметры симуляции. С этой целью в меню окна разработанной модели находят *Simulation* и далее *Params*. В открывшемся окне указывается модельное время, в течение которого проводится эксперимент, выбирается метод интегрирования, устанавливается шаг интегрирования. При необходимости указываются и погрешности, получаемые при численном решении. Запуск симуляции осуществляется по команде *Start Simulink* или щелчком по кнопке в верхней части окна. Результаты моделирования можно увидеть на экране осциллографа или графопостроителя.

3.3. Моделирование разомкнутых систем управления электродвигателями постоянного тока

К разомкнутым системам управления электроприводами постоянного тока относятся такие системы, в которых не используется обратная связь по контролируемым координатам или технологическим параметрам исполнительного органа. Основой регулируемого электропривода все чаще являются двигатели постоянного тока, которые могут иметь независимое, последовательное и смешанное возбуждение. Машины постоянного тока обратимы, т.е. могут работать как в генераторном режиме, так и в двигательном. Широкое распространение двигатели постоянного тока получили в

электроприводе, где требуется надежное регулирование частоты вращения. Эти двигатели обладают повышенным пусковым моментом, хорошей перегрузочной способностью.

Рассмотрим процесс моделирования разомкнутой системы управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения. Математическую модель якорной цепи выполним на основе схемы замещения (рис. 3.2).

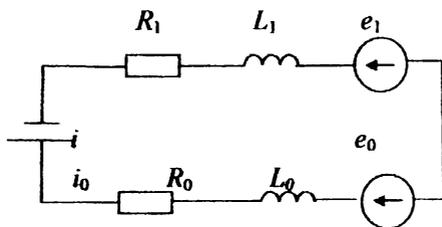


Рис. 3.2. Схема замещения якорной цепи

На схеме отображены основные параметры якорной цепи: e_0 – ЭДС источника питания; e_1 – противоЭДС двигателя; i – ток якорной цепи; R_0 , L_0 , R_1 , L_1 – активное сопротивление и индуктивности источника питания и обмотки якоря соответственно; i_0 – ток источника питания.

Выполним математическое описание схемы в виде дифференциального уравнения:

$$e_0 - e_1 = R_0 i + L_0 \frac{di}{dt} + R_1 i + L_1 \frac{di}{dt}.$$

Якорную цепь с механической частью двигателя можно связать следующими функциями:

$$e_1 = c\omega;$$

$$M = ci.$$

В формулах опускается магнитный поток, так как он постоянный и номинальный.

Уравнение движения описывает механическую часть двигателя:

$$M - M_{cr} = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Для перехода к динамической модели заменим $\frac{d}{dt}$ на p :

$$e_0 - e_1 = R_0 i + L_0 p i + R_1 i + L_1 p i;$$

$$e_1 = c\omega;$$

$$M = ci;$$

$$M - M_{cr} = J p \omega.$$

Известно, что электромагнитная постоянная времени силовой цепи якоря равна

$$T = \frac{L_0 + L_1}{R_0 + R_1}.$$

Запишем динамическую модель в виде «входы – выходы»:

$$\frac{e_0 - e_1}{R(1 + pT)} = i; \quad (1)$$

$$e_1 = c\omega; \quad (2)$$

$$(k_m M - M_c) \frac{1}{Jp} = \omega; \quad (3)$$

$$M = ci, \quad (4)$$

где k_m – коэффициент приведения электромагнитного момента к приведенному значению момента сопротивления.

Для каждого уравнения модели составим структурную схему (рис. 3.3).

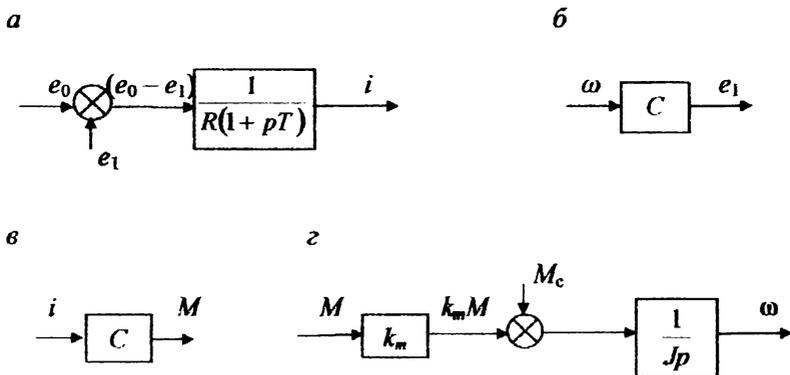


Рис. 3.3. Структурные схемы:
a – для уравнения (1); *б* – для уравнения (2);
в– для уравнения (3); *з* – для уравнения (4)

Полная структурная схема представлена на рис. 3.4.

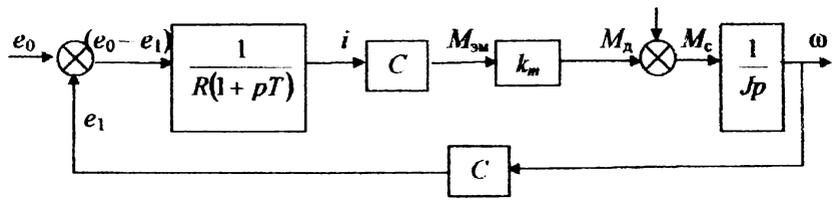


Рис. 3.4. Структурная схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Проброзируем структурную схему таким образом, чтобы удобно было проводить исследования динамики электропривода с помощью симулятивной программы Simulink (рис. 3.5).

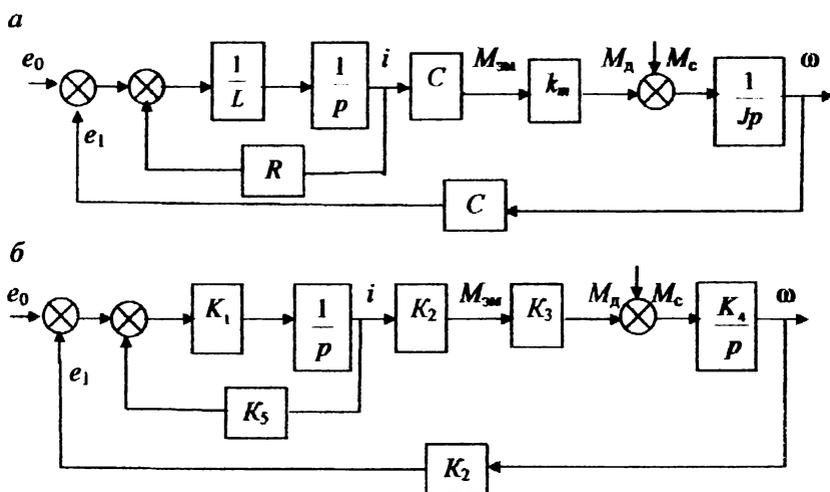


Рис. 3.5. Структурные схемы двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

а – первый вариант, *б* – второй вариант

3.4. Моделирование системы управления реостатным пуском двигателя постоянного тока независимого возбуждения в две ступени в функции ЭДС и динамическим торможением в функции времени

Задачи управления двигателем тока независимого возбуждения определяются его механическими характеристиками (рис. 3.6).

Реостатный пуск в две ступени начинается с первой точки по искусственной характеристике, когда введены добавочные сопротивления $R_{д1}$ и $R_{д2}$ (рис. 3.7). $R_{у1}$ и $R_{у2}$ – регулировочные сопротивления. По мере разгона двигателя контакторы $KМ2$ и $KМ1$ шунтируют добавочные сопротивления, после чего двигатель выходит на естественную характеристику в точку *б* (см. рис. 3.6). Шунтирование резисторов происходит по команде от реле напряжения в функции ЭДС.

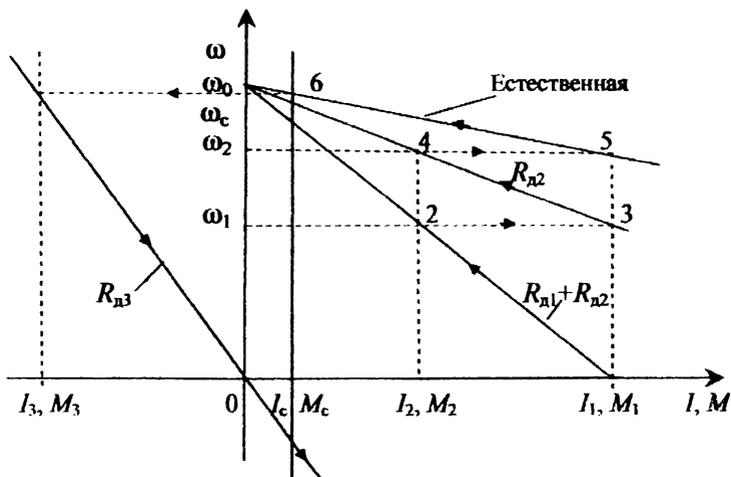


Рис. 3.6. Механические характеристики пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения

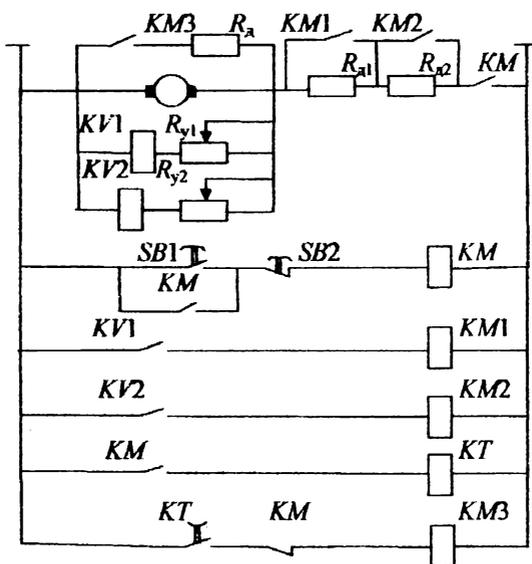


Рис. 3.7. Релейно-контакторная схема пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения в две ступени в функции ЭДС и динамического торможения в функции времени

Торможение выполняется по команде от реле времени KT , при этом двигатель переходит из точки 6 в точку 7 и затормаживается до 0. Якорь двигателя перед торможением должен быть отключен от сети контактором KM .

Работу схемы описывают логические уравнения

$$KM = \overline{SB2}(SB1 + KM);$$

$$KM1 = KV1;$$

$$KM2 = KV2;$$

$$KT = KM;$$

$$KM3 = \overline{KM} \cdot KT(\Delta t).$$

Математическая модель силового канала электропривода имеет вид

$$U_a = R_{a\Sigma}(1 + T_a p)i_a + e_a;$$

$$e_a = c\omega;$$

$$M_{эм} = ci_a;$$

$$M_e - M_c = J \frac{d\omega}{dt};$$

$$M_e = M_{эм} \cdot \eta_{мех}.$$

Выведем уравнение статической механической характеристики $\omega = f(M)$:

$$U = E + IR;$$

$$I = \frac{M}{c}.$$

Подставим значение тока в первое уравнение:

$$U = E + \frac{MR}{c}.$$

Известно, что $E = c\omega$, тогда

$$U = c\omega + \frac{MR}{c}.$$

Уравнение механической характеристики можно записать следующим образом:

$$\omega = \frac{U}{c} - \frac{MR}{c^2}.$$

Динамическая модель для режима динамического торможения имеет вид

$$\begin{aligned}
 U_a &= 0; \\
 R_{\alpha\Sigma}(1 + T_a p)i_a + e_a &= 0; \\
 e_a &= c\Omega; \\
 M_{эм} &= ci_a; \\
 M_e - M_c &= j_{\Sigma} p\Omega; \\
 M_a &= M_{эм} \cdot \eta_{пот.}
 \end{aligned}$$

где $R_{\alpha\Sigma} = R_a + R_{дз}$.

Выполним математическое описание канала задания:

$$U_a(t) = \begin{cases} U_{пюм}, & \text{если } t < t_{\text{торм}}; \\ 0, & \text{если } t \geq t_{\text{торм}}. \end{cases}$$

Такое изображение подачи напряжения на якорь двигателя эквивалентно блоку представленному на рис.3.8:

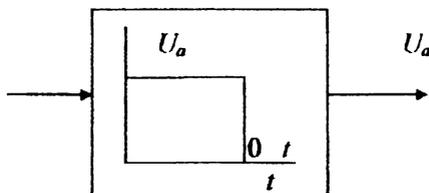


Рис. 3.8. Блок задания напряжения

В общем виде суммарное сопротивление цепи в пусковом режиме и в динамическом торможении равно

$$R_{\alpha\Sigma} = R_{ан} \cdot Д + R_{д.т.б}$$

где $Д$ – коэффициент, осуществляющий контроль режима работы системы (пуск, двигательный режим, торможение):

$$Д(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t < t_{\text{торм}}; \\ 0, & \text{если } t \geq t_{\text{торм}}. \end{cases}$$

Функцию задания режима можно представить в виде блока (рис. 3.9).

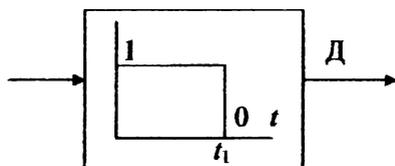


Рис. 3.9. Блок задания режима работы

Поскольку сопротивления $R_{доб}$ при пуске шунтируются в функции ЭДС, то эта функциональная зависимость может быть представлена в виде

$$R_{ан}(e_{я}) = \begin{cases} R_a + R_{я1} + R_{я2} & \text{при } e_{я} < e_1; \\ R_a + R_{я1} & \text{при } e_1 \leq e_{я} \leq e_2; \\ R_a & \text{при } e_{я} \geq e_2. \end{cases}$$

Реостатный пуск двигателя в две ступени можно представить в виде блока (рис. 3.10).

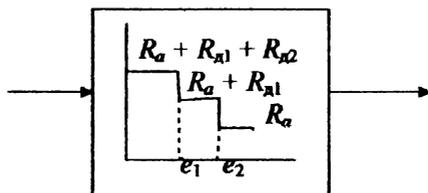


Рис. 3.10. Блок задания реостатного пуска

Канал задания для динамического торможения выполняется в виде следующего математического описания:

$$R_{от}(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } t < t_{торм}; \\ R_a + R_{д3}, & \text{если } t \geq t_{торм}. \end{cases}$$

Блок задания динамического торможения представлен на рис. 3.11.

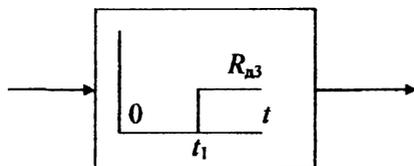


Рис. 3.11. Блок задания динамического торможения

В общем виде модель канала задания представлена на рис. 3.12.

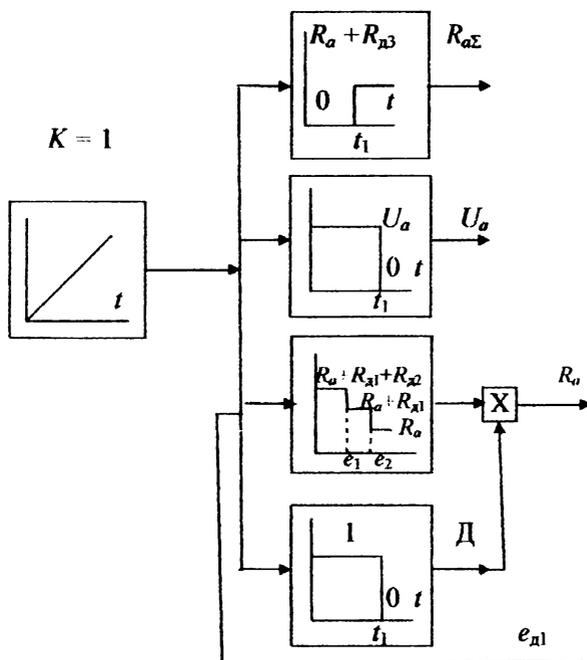


Рис. 3.12. Канал задания

Канал возмущения (рис. 3.13), отражающий постоянную реактивную нагрузку на валу, имеет математическое описание

$$M_c = |M_c| \text{sign}\omega ;$$

$$M_c = \text{const.}$$

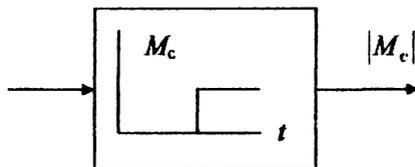


Рис. 3.13. Блок, отображающий канал возмущения

Структурная модель системы управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения с реостатным пуском в функции ЭДС и динамическим торможением в функции времени (детализированная структурная схема) представлена на рис. 3.14.

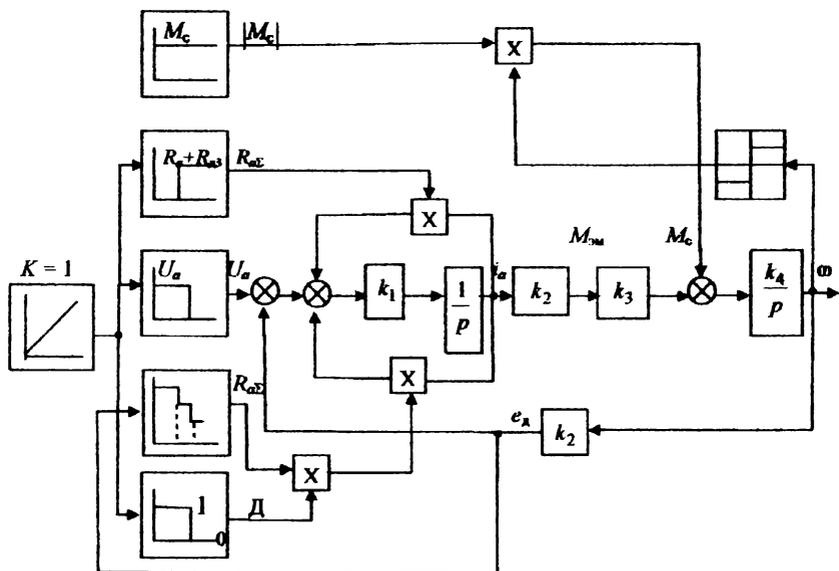


Рис. 3.14. Модель системы управления двигателя

Исследование динамической модели системы управления двигателем постоянного тока независимого возбуждения с помощью программы Simulink возможно только при условии адаптации структурной модели путем замены блоков на соответствующие из библиотек программы (рис. 3.15).

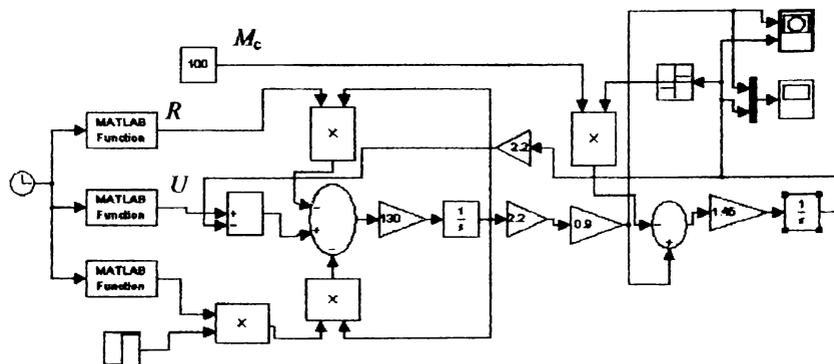


Рис. 3.15. Динамическая модель

Рассмотрим блоки приведенной модели.

1. Константа (рис. 3.16)

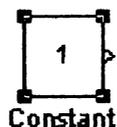


Рис. 3.16. Блок постоянной величины

Параметр: *Constant value* – постоянная величина.

Источник постоянного воздействия характеризуется единственным параметром — своим уровнем воздействия в виде константы (по умолчанию 1). При установленном флажке *Interpret vector parameters* вектор параметров интерпретируется как одномерный. Можно задавать вектор констант в квадратных скобках:

например, запись [-0.5, 1.0, 1.5] задает вектор из трех констант со значениями -0.5, 1.0 и 1.5.

2. Генератор ступенчатого сигнала (рис. 3.17)



Рис. 3.17. Блок генератора ступенчатого сигнала

Параметры:

- *Step time* – время подачи ступенчатого сигнала;
- *Initial value* – начальное значение сигнала;
- *Final value* – конечное значение сигнала;
- *Sample time* – эталонное время.

3. Графопостроитель (рис. 3.18)



Рис. 3.18. Блок графопостроителя

При вызове графопостроителя открывается его рабочее окно (рис. 3.19), в которое выводятся результаты моделирования.

Свойства окна можно вызвать через пиктограмму *Properties*, где возможно настроить следующие параметры:

- *Number of axes* – число осей (каналов) осциллографа;
- *Time range* – пределы временного интервала;
- *Tick labels* – вывод, скрытие отметок по осям;
- *Sampling* – установка временных соотношений: *Decimation* (в десятичных долях времени со значением по умолчанию 1); *Sample Time* (в тактах эталонного времени, по умолчанию 0).

Параметр *Number of axes* позволяет превратить одноканальный осциллограф в многоканальный. При этом осциллограф приобретает несколько входных портов, к которым можно подключать различные сигналы.

При показе сигнала осциллограф использует различные цвета в следующем порядке: желтый, сиреневый, синий, красный, зеленый, темно-синий. Когда отображается больше шести сигналов, область циклически повторяет цвета в порядке, перечисленном выше.

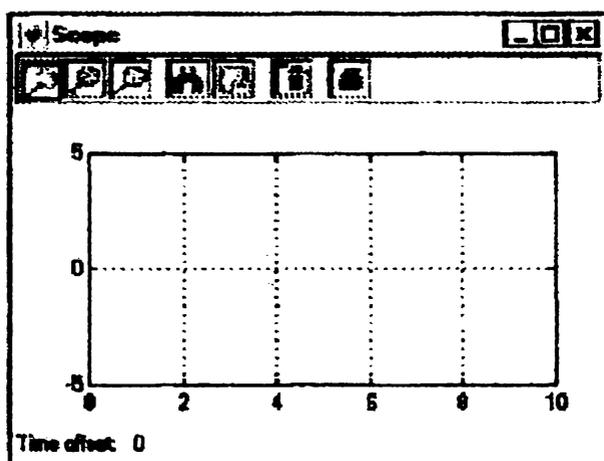


Рис. 3.19. Рабочее окно графопостроителя

4. Графопостроитель функции двух переменных (рис. 3.20)



Рис. 3.20. Блок графопостроителя функции двух переменных

Параметры:

- $x-min$ – минимальное значение сигнала по горизонтальной оси;
- $x-max$ – максимальное значение сигнала по горизонтальной оси;
- $y-min$ – минимальное значение сигнала по вертикальной оси;
- $y-max$ – максимальное значение сигнала по вертикальной оси.

Графопостроитель — второе по распространенности устройство после осциллографа. В отличие от осциллографа виртуальный графопостроитель имеет входы по осям X и Y , что позволяет строить графики функций в полярной системе координат, фигуры Лиссажу, фазовые портреты и т. д.

5. Сумматор (рис. 3.21)

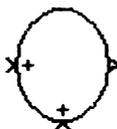


Рис. 3.21. Блок суммирования сигналов

Параметры:

- *List of signs* – число входов (указывается символами «+» и «-»);
- *Icon shape* – вид представления блока (круглый или квадратный).

6. Усилитель (рис. 3.22)

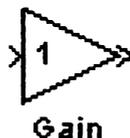


Рис. 3.22. Блок усилителя

Параметр: *Gain* – коэффициент усиления. Определяет тип операции, используемой, чтобы умножить ввод:

- 1) $K * u$ (элементарное умножение);
 - 2) $K * u$ (умножение матриц с усилением как левый операнд);
 - 3) $U * K$ (умножение матриц с усилением как правый операнд).
7. Блок умножения (рис. 3.23)

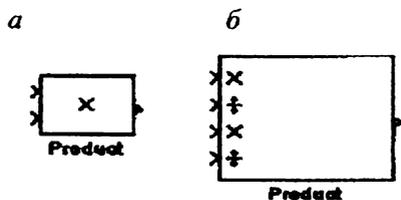


Рис. 3.23. Блок умножения:
a – с двумя выводами; *b* – с четырьмя выводами

Параметр: *Number of inputs* – число входов (указывается символами «*» и «/»).

8. Блок выделения знака сигнала (рис. 3.24)

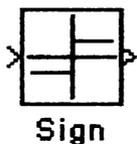


Рис. 3.24. Блок выделение знака сигнала

9. Функция *Matlab* (рис. 3.25)

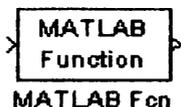


Рис. 3.25. Блок задания функции *Matlab*

Блок задания функции *Matlab Fcn* служит для задания функций одной переменной или ряда переменных $u(i)$ по правилам, принятым для языка программирования базовой системы Matlab 6.0 (реализуется в виде *M*-файлов).

Параметры:

- *Matlab function* – функция или выражение;
- *Output dimensions* – размерности вывода;
- *Output signal type* – выбор типа сигнала вывода *Matlab Fcn*: число, комплекс или автомат (*real, complex, auto*).

10. Интегратор (рис. 3.26)

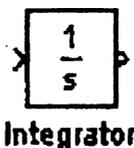


Рис. 3.26. Блок интегратора

Параметры:

- *Initial condition source* – определение начальных условий: *internal* – внутреннего, *external* – внешнего условия сброса состояния;
- *Initial condition* – начальное состояние;
- *Limit output* – установка уровня превышения, функционирует как ограниченный интегратор: *Upper saturation limit* – верхнее, *Lower saturation limit* – нижнее ограничение интеграла;
- *Show saturation port* – добавление порта вывода, показывающего состояние ограничения интегратора;
- *Show State Port* – порт состояния.

Для создания произвольного нелинейного элемента можно воспользоваться блоком *Matlab function*. В командной строке окна управления *Matlab* следует набрать команду *EDIT*, при этом откроется редактор *Matlab*. Далее необходимо составить программу в виде

условия данной нелинейности, например:

<code>function y=al(x);</code>	функция зависимости y от x
<code>if x<1</code>	если x меньше 1
<code>y=30</code>	y равняется 30
<code>else</code>	в противном случае
<code>y=20</code>	y равняется 20
<code>end</code>	окончание условия
<code>if x>2</code>	если x больше 2
<code>y=1</code>	y равняется 1
<code>end</code>	окончание условия
<code>if x>3</code>	если x больше 3
<code>y=0</code>	y равняется 0
<code>end</code>	конец программы

Затем эту программу нужно сохранить под каким-нибудь именем на английском языке, а имя занести в свойства блока *Matlab function*. Если требуется нелинейный элемент в функции времени, то на вход этого блока подается сигнал с блока линейно нарастающего сигнала, который находится в библиотеке источников сигналов. В случае, если необходим нелинейный элемент в функции других переменных, то на вход блока *Matlab function* подается сигнал с того блока создаваемой модели, где формируется данная переменная.

Когда модель уже собрана, следует настроить параметры моделирования. Для этого в меню *Simulation* нужно выбрать пункт *Parameters*. В открывшемся диалоговом окне можно выбрать способ моделирования, начальное и конечное время моделирования, шаг интегрирования и т.п.

После настройки параметров моделирования необходимо произвести запуск цикла. В меню *Simulation* следует выбрать строку *Start*, после чего начнется отчет заданного времени моделирования.

Если в модели использовался блок графопостроителя в функции двух переменных, то при старте открывается окно графопостроителя, в котором в момент моделирования вычерчивается график двух выбранных переменных.

Если использовался блок графопостроителя в функции времени, то после окончания моделирования можно открыть окно графопостроителя двойным щелчком «мышью». При просмотре графиков переходных процессов можно изменять масштаб в широких пределах, выделив «мышью» нужный участок.

3.5. Моделирование системы управления пуском асинхронного двигателя с фазным ротором в функции времени

Основой для моделирования может быть релейно-контакторная схема управления (рис. 3.27), согласно которой пуск асинхронного двигателя осуществляется в две ступени. Шунтирование ступеней пускового реостата в роторной цепи двигателя происходит по команде от реле времени $KT1$ и $KT2$ с помощью контакторов $KM3$ и $KM4$.

Математическая модель силового канала при прямом пуске:

$$M = \frac{2M_K \cdot S_{K1} \cdot S}{S^2 + S^2_{K1}};$$

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0};$$

при пуске в обратном направлении в толчковом режиме:

$$M = \frac{-2M_K \cdot S_{K1} \cdot S}{S^2 + S^2_{K1}};$$

$$S = \frac{-\omega_0 - \omega}{-\omega_0}.$$

Приведем уравнения, связывающие электрическую часть с механической:

$$M_e - M_c = J \frac{d\omega}{dt};$$

$$M = M_{эм} \cdot \eta_{лост};$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{P};$$

$$M_K = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 X_K};$$

$$S_K = \frac{R'_2}{X_K},$$

где $X_K = X_1 + X'_2$ – критическое скольжение. С введением добавочного сопротивления в роторную цепь изменяется критическое скольжение. При пуске, когда добавочное сопротивление полностью введено,

$$S_{K1} = \frac{R'_2 + R'_{2\alpha 1}}{X_K},$$

в результате шунтирования части пускового реостата

$$S_{K1} = \frac{R'_2 + R'_{2\alpha 2}}{X_K}.$$

На последнем этапе по команде от реле времени пусковой реостат полностью выводится из цепи, двигатель выходит на естественную характеристику и критическое скольжение определяется

$$S_{K3} = \frac{R'_2}{X_K}.$$

Рассмотренное изменение критического скольжения, являющееся результатом воздействия на приведенное сопротивление роторной цепи двигателя, изображается блоком задания, приведенным на рис. 3. 28.

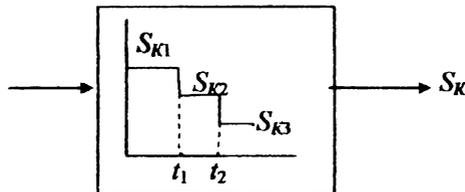


Рис. 3.28. Блок задания критического скольжения

Согласно вышеприведенным формулам, при регулировании сопротивления R_2' скорость идеального холостого хода ω_0 и критический момент M_K остаются неизменными, поэтому эти параметры могут быть заданы блоками, изображенными на рис. 3.29.

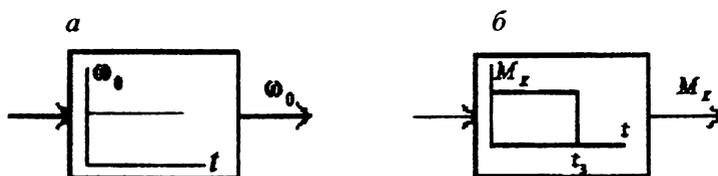


Рис. 3.29. Блоки задания:

a – скорости холостого хода; *b* – критического момента

Реактивная нагрузка канала возмущения изображается блоком, приведенным на рис. 3.30.

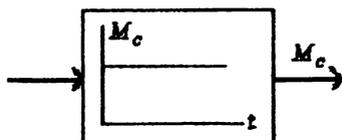


Рис. 3.30. Блок задания реактивной нагрузки

Структурная модель системы управления асинхронным двигателем с фазным ротором в функции времени с реостатным пуском и торможением за счет сил сопротивления представлена на рис. 3.31.

Коэффициенты в схеме (k_1, k_2, k_3) определены из математической модели и соответственно равны: $k_1 = 2$; $k_2 = \eta_{\text{пот}}$; $k_3 = 1/J$.

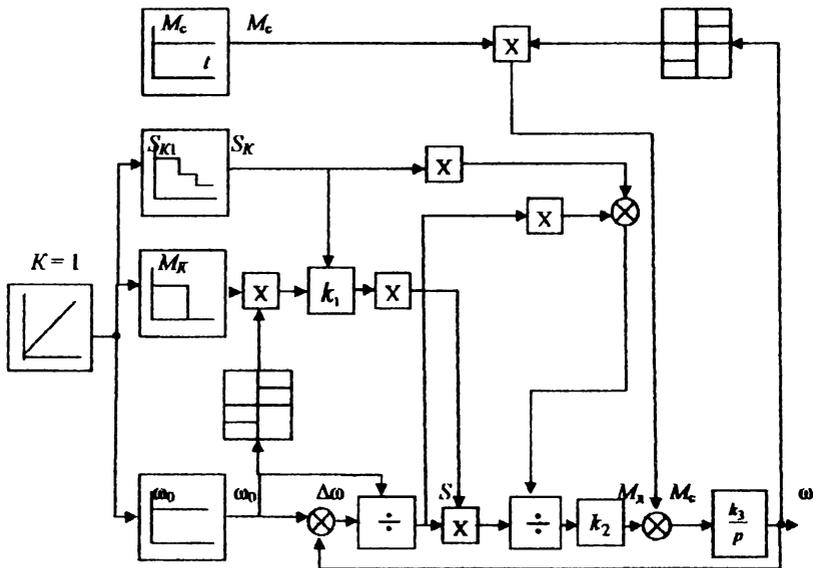


Рис. 3.31. Структурная модель системы управления асинхронным двигателем с фазным ротором в функции времени

Выполним динамическую модель проектируемой системы управления с помощью блоков библиотеки *Simulink* (рис. 3.32).

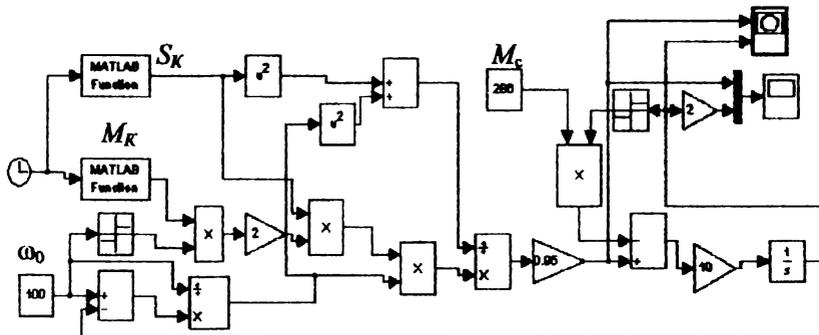


Рис. 3.32. Динамическая модель системы управления асинхронным двигателем

Изменение сопротивления цепи ротора R_2' происходит в функции времени, поэтому скольжение S_K также изменяется в нелинейной зависимости от времени. Нелинейная функция $S_K = f(t)$ может быть задана блоком, изображенным на рис. 3.33.

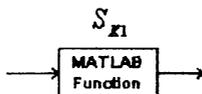


Рис. 3.33. Блок задания нелинейной функции

Полученная модель системы управления пуском асинхронного двигателя с фазным ротором в функции времени исследуется в виртуальной лаборатории Matlab.

Контрольные вопросы

1. Опишите процесс работы с программой Simulink.
2. Выполните математическую модель якорной цепи двигателя постоянного тока независимого возбуждения.
3. Какими блоками выполняется канал задания системы управления реостатным пуском двигателя постоянного тока независимого возбуждения в две ступени в функции ЭДС и динамическим торможением в функции времени?
4. Приведите наиболее широко используемые блоки библиотеки Simulink.
5. Каково назначение М-файлов в программе Matlab?

Заключение

Для углубления понимания студентами сущности процесса моделирования в учебном пособии уделяется большое внимание раскрытию понятия модели; рассматриваются разнообразные методы моделирования в историческом аспекте; содержится учебная и научная информация, типовые решения, иллюстрации, материалы для самоконтроля.

Для поддержания у студентов высокого познавательного интереса предлагается вовлекать их в процесс самостоятельной познавательной деятельности путем решения учебно-познавательных заданий. Задания по моделированию динамических систем позволят изучить свойства новой теоретической модели таким образом, что обучаемый будет вовлечен в процесс воздействия на модель-предмет, и в результате изучаемая модель наполнится достаточно полной информацией об искомым предметам. Имитационное и оптимизационное моделирование с помощью графической среды программы Matlab позволит перевести познавательную деятельность студентов на исследовательский уровень.

Библиографический список

1. *Балл Г.А.* Теория учебных задач: Психолого-педагогический аспект. – М.: Педагогика, 1990. – 184 с.
2. *Башарин А.В., Постников Ю.В.* Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ. Учеб. пособие для вузов.– 3-е изд.– Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 512 с.
3. *Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б.* Практическое моделирование динамических систем. – СПб.: БВХ-Петербург, 2002. – 464 с.
4. *Веников В.А.* Моделирование в науке и технике. Наука и человечество. – М.: Знание, 1966.–412 с.
5. *Веников В.А.* Принципы моделирования и высшее образование// Вестн. высш. шк.– 1972. – № 11. – С. 29 – 34.
6. *Веников В.А., Веников Г.В.* Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): Учеб. для вузов по спец. «Кибернетика электрических систем». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1984. – 439 с.
7. *Войтко В.И., Балл Г.А.* Категория модели и ее роль в педагогических исследованиях // Программированное обучение.– Киев, 1978. – Вып. 15.– С.7 – 11.
8. *Гультияев А.* Визуальное моделирование в среде MATLAB: Учеб. курс. – СПб.: Питер, 2000. – 432 с.
9. *Давыдов В.В.* Виды обобщения в обучении: Логико-психологические проблемы построения учебных предметов. – М.: Пед. о-во России, 2000. – 480 с.
10. *Дьяконов В.П.* Simulink 4.0: Спец. справ.– СПб.: Питер, 2002. – 528 с.
11. *Иванушкин В.А., Саратулов Ф.Н., Шымчак П.* Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов. – Щецин, 2000. – 310с.
12. *Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф.* Общий курс электропривода: Учеб. для студентов вузов.– М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.

13. *Карлацук В.И.* Электронная лаборатория на IBM PC.– М.: СОЛОН-Р, 2001. – 736 с.

14. *Ключев В.И.* Теория электропривода: Учеб. для студентов вузов.– М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

15. Краткий словарь современных понятий и терминов /Сост. Н.Т. Бунимович, Г.Г. Жаркова, Т.М. Корнилова и др.– М.: Республика, 1993. – 510 с.

16. *Копылов И.П.* Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для студентов вузов.– М.: Высш. шк., 1987. – 248 с.

17. *Кочергин Л.Н.* Моделирование мышления. – М.: Политиздат, 1969. – 224 с.

18. Моделирование и основы автоматизированного проектирования приводов: Учеб. пособие для студентов вузов/*В.Г. Стеблецов, А.В. Сергеев, В.Д. Новиков, О.Г. Камладзе* – М.: Машиностроение, 1989. – 224 с.

19. *Москаленко В.В.* Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.

20. *Цвиркун А. Д., Акинфиев В. К., Филиппов В. А.* Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем (оптимизационно-имитационный подход). – М.: Наука, 1985. – 173 с.

21. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе /*М.М. Соколов, Л.П. Петров, Л.Б. Масандилов, В.А. Ладензон.*– М.: Энергия, 1967. – 200 с.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Основы математического и структурного моделирования	4
1.1. Характеристика понятия «модель», цели и виды моделирования. Принципы моделирования динамических систем.....	4
1.2. Уравнение движения и математическая модель механической части двухмассовой механической системы.....	15
1.3. Динамические модели.....	17
1.4. Двухмассовая механическая система в дискретном варианте.....	20
1.5. Модели управляющих устройств.....	24
Глава 2. Графическое моделирование дискретных управляемых автоматов.....	29
Глава 3. Компьютерное моделирование	36
3.1. Понятие компьютерной модели и характеристика программного обеспечения моделирования.....	36
3.2. Построение и исследование динамических моделей в программной среде Simulink.....	37
3.3. Моделирование разомкнутых систем управления электродвигателями постоянного тока.....	39
3.4. Моделирование системы управления реостатным пуском двигателя постоянного тока независимого возбуждения в две ступени в функции ЭДС и динамическим торможением в функции времени.....	43
3.5. Моделирование системы управления пуском асинхронного двигателя с фазным ротором в функции времени	57
Заключение.....	63
Библиографический список	64

Смолин Георгий Константинович
Тельманова Елена Дмитриевна

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ

Учебное пособие

Редактор Е.А. Ушакова

Печатается по постановлению редакционно-издательского
совета университета

Подписано в печать 05.07.06. Формат 60×84/16. Бумага для множ.
аппаратов. Печать плоская. Усл. печ. л. 3,1. Уч.-изд. л. 3,4. Тираж 100
экз. Заказ *№214*

Издательство Российского государственного профессионально-
педагогического университета. Екатеринбург, ул. Машиностроителей,
11.

Ризограф РГПТУ. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.

