

Предисловие 9

Введение..... 12

▼ Часть I

Технологии моделирования электромеханических
мехатронных модулей движения в среде SimInTech 14

▼ Глава 1

Обобщенная функциональная структура, модели
и методология проектирования мехатронных
модулей движения..... 15

1.1. Принципы построения мехатронных модулей движения..... 15

1.2. Математические модели мехатронных модулей движения..... 18

1.2.1. Математические модели непрерывных элементов..... 18

1.2.2. Математические модели цифровых элементов..... 30

1.3. Задачи, концепция и этапы модельного проектирования модулей
движения в среде SimInTech..... 34

Контрольные вопросы..... 45

Литература к предисловию, введению и главе 1 45

▼ Глава 2

Пакет SimInTech – визуальная среда моделирования мехатронных систем	47
2.1. Принципы и методика моделирования	47
2.2. Запуск SimInTech.....	49
2.3. Главное командное меню	51
2.4. Панели инструментов главного окна и схемных окон.....	53
2.5. Палитра компонентов.....	57
2.6. Краткое описание процедур и этапов работы в среде SimInTech	60
2.7. Демонстрационно-обучающие примеры моделирования в среде SimInTech.....	62
Контрольные вопросы и упражнения	117
Литература	118

▼ Глава 3

Анализ и синтез мехатронных модулей движения как цифровых электроприводов с обратными связями	120
3.1. Принципы цифрового управления электроприводами	120
3.2. Структурные модели цифровых электроприводов	122
3.3. Анализ устойчивости цифровых электроприводов.....	126
3.4. Анализ качества цифровых электроприводов	127
3.5. Упрощенный метод синтеза цифровых электроприводов.....	129
3.6. Определение периода квантования непрерывных сигналов в цифровых электроприводах	134
Контрольные вопросы и упражнения	180
Литература	181

▼ Глава 4

Математические модели дискретных и нелинейных элементов цифровых электроприводов и их реализации в среде SimInTech	183
4.1. Общие сведения	183
4.2. Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи	184
4.3. Моделирование цифровых САР в среде SimInTech на основе линейных моделей	189

4.4. Моделирование цифровых САП в среде SimInTech с учетом нелинейных свойств элементов.....	209
Контрольные вопросы и упражнения.....	225
Литература.....	226

▼ Глава 5

Полупроводниковые преобразователи электромеханических модулей движения.....	227
5.1. Силовые полупроводниковые элементы.....	227
5.1.1. Силовые полупроводниковые диоды.....	227
5.1.2. Тиристоры.....	231
5.1.3. Биполярные IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) транзисторы.....	236
5.2. Силовые полупроводниковые преобразователи электромеханических модулей движения.....	240
5.2.1. Классификация.....	240
5.2.2. Основные характеристики силовых полупроводниковых преобразователей.....	242
5.3. Управляемые выпрямители.....	243
5.3.1. Однофазные управляемые выпрямители.....	243
5.3.2. Трехфазные управляемые выпрямители.....	253
5.4. Широтно-импульсные преобразователи.....	261
5.4.1. Одноплечевые широтно-импульсные преобразователи.....	261
5.4.2. Мостовой широтно-импульсный преобразователь.....	268
5.4.3. Динамические характеристики управляемых выпрямителей.....	271
5.5. Автономные инверторы.....	271
5.5.1. Вводные замечания.....	271
5.5.2. Одноплечевой однофазный инвертор.....	271
5.5.3. Мостовой однофазный инвертор.....	276
5.5.4. Трехфазные автономные инверторы.....	279
5.5.5. Многоуровневые инверторы.....	284
Литература.....	290

▼ Глава 6

Полупроводниковые преобразователи в цепи питания мехатронных модулей движения и их реализации в среде SimInTech.....	291
6.1. Расчетная схема питания мехатронного модуля движения.....	291

6.2. Выпрямитель с фильтром в качестве ВИП	293
6.3. Выпрямитель с цепью сброса энергии в качестве ВИП	297
6.4. Динамические и энергетические процессы в мехатронном модуле движения, питающегося от ВИП на базе выпрямителя	301
6.4.1. Анализ динамических процессов в мехатронном модуле движения, питающегося от ВИП на базе выпрямителя	301
6.4.2. Электромагнитные и электромеханические процессы в мехатронном модуле движения, питающегося от ВИП на базе выпрямителя.....	304
6.4.3. Динамические и энергетические процессы в двухконтурном электроприводе постоянного тока	317
Литература	321

▼ Часть II

Моделирование и элементы проектирования электромеханических мехатронных модулей движения	322
--	-----

▼ Глава 7

Модули движения с двигателями постоянного тока	323
7.1. Математическое описание, структурные схемы и модели двигателя постоянного тока в среде SimInTech.....	323
7.1.1. Математическое описание двигателя постоянного тока (ДПТ).....	323
7.1.2. Структурная модель ДПТ в переменных состояния	325
7.1.3. Структурная модель ДПТ с представлением электромагнитной и электромеханической цепей передаточными функциями	329
7.1.4. Структурные модели ДПТ, составленные по корням характеристического уравнения.....	331
7.2. Синтез регуляторов в одноконтурном электроприводе постоянного тока.....	335
7.2.1. Синтез непрерывных регуляторов	335
7.2.2. Синтез цифровых регуляторов	347
7.3. Синтез регуляторов в двухконтурном электроприводе постоянного тока.....	354

7.3.1. Синтез непрерывных регуляторов	354
7.3.2. Переоборудование регуляторов в двухконтурной системе.....	359
7.4. Электроприводы постоянного тока в мехатронных системах	363
7.4.1. Синтез регуляторов в следящей робототехнической системе постоянного тока	363
7.4.2. Система управления устройством чтения-записи жесткого диска компьютера.....	374
7.5. Задания для самостоятельной работы.....	376
Литература	377

▼ Глава 8

Элементы проектирования мехатронных модулей движения.....	378
8.1. Отдельные аспекты проектирования модулей движения.....	378
8.2. Примеры проектирования мехатронных модулей движения	379
8.3. Учебное проектирование.....	420
8.3.1. Методика учебного проектирования.....	420
8.3.2. Исходные данные для примера расчетной работы	423
8.3.3. Содержание расчетной работы.....	424
Литература	443

▼ Приложение А

Некоторые элементарные сведения по системам автоматического управления с микропроцессорными ЭВМ.....	445
А.1. Принципы построения и работы систем.....	445
А.2. Структурные модели и упрощенный метод синтеза линейных (линеаризованных) систем.....	449
Литература	456

▼ Приложение Б

Расчет частотных характеристик в среде SimInTech.....	457
---	-----

▼ Приложение В

Справочные данные и некоторые вспомогательные расчетные методики для учебного проектирования мехатронных модулей движения	469
В.1. Электрические двигатели	469
В.1.1. Двигатели постоянного тока [8.10].....	469
В.1.2. Асинхронные двигатели серии АИР.....	483
В.2. Отдельные сведения по некоторым элементам, используемым в мехатронных модулях движения	491

Предисловие



В 70-х годах XX столетия возникла и в последующие годы сформировалась самостоятельная сфера науки и техники, получившая название *мехатроника*, базисом которой являются знания в области механики, электроники, микропроцессорной техники, информатики и компьютерных технологий. Мехатроника как дисциплина с 1994 года изучается во многих технических вузах, обеспечивающих подготовку специалистов для различных отраслей народного хозяйства РФ. Из широкого спектра вопросов, подлежащих освоению при изучении дисциплины, регламентированных соответствующими государственными образовательными стандартами и программами, особое место занимают вопросы проектирования и создания мехатронных систем на основе математических моделей, реализуемых с помощью современных компьютерных прикладных программ. К числу таких программ относятся высокоэффективные как зарубежные (Matlab&Simulink, Scilab, MATRXXX, VisSim, LabVIEW и др.), так и отечественные (МИК, ПА 9, CLASSIC, MBТУ, SimInTech и др.). В силу сложившихся обстоятельств в отечественной высшей школе в настоящее время доминируют преимущественно зарубежные программы. Они успешно используются многими российскими вузами в учебном процессе и активно продвигаются на отечественный рынок программных средств (так, например, торговая сеть технической литературы буквально «наводнена» различными учебными изданиями по пакету Matlab-Simulink; подобная ситуация имеет место и по многим другим зарубежным программам). Применение зарубежных программных средств, при наличии отечественных альтернативных программ, противоречит наметившейся в последнее время тенденции импортозамещения в различных отраслях народно-хозяйственной деятельности РФ, в том числе и в области информационных технологий в части программного обеспечения (ПО). В этой связи следует особо отметить, что многие ведущие отечественные университеты, можно сказать, предвосхитили возникшую в настоящее время проблему импортозамещения в области ПО. Ими к концу прошлого века были созданы программы визуального программирования с русскоязычной справочной системой и удобным для отечественных пользователей интерфейсом, не уступающие по своим функциональным возможностям

и характеристикам зарубежным аналогам. К числу таких программ относятся перечисленные выше отечественные программы. Из них особого внимания заслуживает программное обеспечение «Среда динамического моделирования технических систем SimInTech», разработанное коллективом ООО «3В Сервис» (www.3v-services.com).

Являясь альтернативой зарубежным аналогам, ПО SimInTech позволяет рассчитывать, моделировать, исследовать и синтезировать различные технические устройства (механические, гидравлические, теплотехнические, электротехнические и др., в том числе средства и системы автоматики). Вся необходимая сопроводительная документация, методическое обеспечение и исчерпывающая справочная контекстная система SimInTech выполнена на русском языке, что для многих российских пользователей снимает языковой барьер, который имеет место при освоении и использовании таких программ, как Matlab-Simulink и др., с англоязычным методическим и справочным сопровождением.

Визуальные, интерактивные средства программирования, используемые в среде SimInTech, сопроводительная документация и методическое обеспечение, отличающиеся «прозрачностью» и доступностью для понимания, позволяют пользователю, при наличии элементарных навыков работы в операционной среде Windows, за кратчайший срок изучить его и успешно использовать в работе. Программное обеспечение SimInTech совместимо с ОС «Гослинукс», являющейся дистрибутивом операционной системы Linux, что немаловажно при необходимости перехода с ОС Windows на ОС Linux.

С учетом изложенного выше и многолетнего позитивного опыта применения, а также положительных результатов проектных работ на основе SimInTech, выполненных ООО «3В Сервис», ОАО «Гипротрубопровод», АО «Атомпроект», ПАО «Компания “Сухой”», АО «ОКБМ Африкантов» и др. [1.1–1.6], авторский коллектив посчитал целесообразным его применение в качестве программного обеспечения для учебного пособия. В пособии использована версия 1.6.0.1 ПО SimInTech, подробная информация о которой размещена на официальном сайте simintech.ru.

Для решения задач с применением ПО SimInTech, предусмотренных в учебном пособии, достаточно знать основные положения теории линейных систем автоматического управления и элементы теории дискретных систем в объеме, обозначенном в пособии, а также иметь навыки работы в среде ОС Windows.

Учебное пособие является результатом коллективного труда сотрудников ООО «3В Сервис» (А. Н. Петухов), Морской академии в Щецине (Польша) (С. Г. Герман-Галкин), АЧИИ Донского ГАУ (Б. А. Карташов, С. Н. Литвинов), доленое участие которых следующее: организационно-методологическое обеспечение и общая редакция пособия – А. Н. Петухов; предисловие, введение – коллегиально все авторы; глава 1 – Б. А. Карташов с участием

С. Г. Герман-Галкина; главы 2–4 – Б. А. Карташов; глава 7 – С. Г. Герман-Галкин; глава 8 – Б. А. Карташов, С. Н. Литвинов; приложения А и Б – Б. А. Карташов; приложение В – Б. А. Карташов, С. Н. Литвинов.

Авторы считают своим долгом выразить признательность генеральному директору ООО «3В Сервис» В. Н. Петухову за финансовую помощь в процессе подготовки учебного пособия и его издании. Авторы благодарны профессорско-преподавательскому коллективу кафедры «Робототехника и мехатроника» ФГБОУ ВО ДГТУ в лице зав. кафедрой Е. А. Лукьянова, и особенно профессору Н. Ф. Карнаухову, за полезные замечания и рекомендации, которые были учтены при окончательном редактировании рукописи учебного пособия.



Введение

Целенаправленность учебного пособия состоит в изучении и освоении отдельных вопросов, связанных с проектированием *мехатронных модулей движения*. Для понимания сущности данного термина и его места в общей иерархии понятий и определений, относящихся к новому современному быстро развивающему научно-техническому направлению мехатроника, рассмотрим некоторые из них [1.7, 1.8].

Мехатроника – это новая область науки и техники, посвященная созданию машин и систем с компьютерным управлением движением, которая базируется на знаниях в области механики, электромеханики, электротехники, силовой электроники, информатики, микропроцессорной техники и компьютерного управления движением машин и агрегатов. Термин «мехатроника» получен в результате комбинации слов «МЕХАника» и «элекТРОНИКА».

Мехатроника как техническая дисциплина изучает синергетическое объединение узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых технических модулей и систем, машин и комплексов машин с интеллектуальным управлением и их функциональными движениями.

В последнем определении подчеркивается синергетический характер интеграции всех компонентов (механических, электронных, электротехнических, компьютерных), который раскрывает термин *синергия*. Под этим термином понимается совместное действие, направленное на достижение общей цели. При синергетическом объединении достигается качественно новый результат – больший, чем арифметическая сумма вкладов отдельных составляющих. В этом же определении указывается на функциональный признак *интеллектуального управления* (он продиктован требованиями к обеспечению высокого качества выполнения сложных и точных движений), который может быть реализован на базе современных микропроцессорных и программных средств и перспективных подходов к синтезу управляющих алгоритмов на основе адаптивных методов классической и современной теории автоматического управления.

Мехатронная система – множество механических, микропроцессорных, электронных и электротехнических компонентов, находящихся в связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство. Задачей мехатронной системы является преобразование информации о цели управления, поступающей с верхнего уровня, в целенаправленное функциональное движение системы с управлением на основе принципа обратной связи.

Мехатронный модуль движения (ММД) – функционально и конструктивно самостоятельное изделие, построенное с взаимопроникновением и синергетической аппаратно-программной интеграцией составляющих его элементов, имеющих различную физическую природу, и предназначенное для реализации движений его выходного звена.

Мехатронные модули движения, являющиеся конструктивными «кубиками», из которых строят мехатронные системы, в зависимости от вида используемой энергии подразделяются на электромеханические, электрогидравлические и электропневматические. Наибольшее применение из них нашли электромеханические модули, основной комплекс задач проектирования которых детально освещен в учебных изданиях [1.7, 1.8]. В данном учебном пособии рассматриваются отдельные вопросы проектирования, не вошедшие в [1.7, 1.8]. Их сущность сводится к синтезу оптимальных алгоритмов функционирования электромеханических модулей движения как цифровых электроприводов с обратными связями. В основе концептуального подхода синтеза положен так называемый метод «переоборудования регулятора» [1.8, 1.14], заключающийся в том, что первоначально оптимальный алгоритм управления определяется применительно к аналоговой модели модуля движения. Затем на основе найденного непрерывного алгоритма формируется его дискретный аналог, параметры которого уточняются в результате повторной оптимизации на основе дискретной модели модуля движения. Эти оптимизационные задачи, которые на основе аналитических методов классической теории автоматического управления решаются достаточно сложно, в учебном пособии реализуются намного проще с помощью специальных программных модулей (блоков) отечественного ПО SimInTech, о котором упоминалось выше в предисловии. При таком подходе отпадает необходимость в детальном освоении специальных вопросов теории оптимальных систем автоматического управления, требующей специальной математической подготовки, что позволит широкой студенческой аудитории, научно-техническим специалистам и конструкторам осваивать и решать вопросы проектирования мехатронных систем.

**Технологии моделирования
электромеханических
мехатронных модулей
движения в среде SimInTech**



Обобщенная функциональная структура, модели и методология проектирования мехатронных модулей движения



ГЛАВА

1

1.1. Принципы построения мехатронных модулей движения

Базовые функциональные компоненты мехатронных систем по степени интеграции подразделяются на модули движения (МД), электромеханические модули движения (ЭМД) и мехатронные модули движения (ММД), краткие признаки которых применительно к электромеханическим модулям движения, сформулированные в [1.7, 1.8], следующие.

Модуль движения (МД) конструктивно и функционально представляет собой устройство, включающее в себя механическую и электротехническую части, которое можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями в составе мехатронной системы. Модуль движения включает в себя механическое устройство и электрический двигатель с источником питания. Примерами таких модулей движения являются электродвигатель-редуктор, электродвигатель-колесо, электродвигатель-барабан, электродвигатель-шпиндель и т. д.

Электромеханический модуль движения (ЭМД) конструктивно и функционально представляет собой устройство, включающее в себя механическую, электромеханическую и электрическую части, которое можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями в составе мехатронной системы. Отличительным признаком ЭМД от МД является наличие в нем силового полупроводникового преобразователя (СПП, рис. 1.1.1) датчиков для контроля величин (параметров), характеризующих модуль движения, и электронных блоков для обработки и усиления сигналов датчиков. То есть по сравнению с МД ЭМД дополняется информационным устройством, преобразующим контролируемую величину в сигнал, удобный для измерения, дальнейшей передачи, хранения и обработки. Примеры электромеханических модулей движения: электромеханические устройства, интегрирующие электродвигатели и различные преобразователи движения (винтовые, червячные, планетарные, волно-

вые и т. п.), дополненные необходимыми датчиками (преобразователями механических величин в электрические сигналы).

Электромеханические модули движения являются функциональными «кубиками», из которых можно компоновать сложные мехатронные системы.

Мехатронный модуль движения (ММД) – конструктивно и функционально самостоятельное устройство с синергетической интеграцией механической, электрической (электротехнической), информационной и компьютерной (электронной) частей, которое можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями в составе мехатронной системы. То есть по сравнению с ЭМД в конструкцию ММД дополнительно встраивают микропроцессорное вычислительное устройство, что придает модулю интеллектуальные свойства и является отличительным признаком от ЭМД.

Взаимную интеграцию рассмотренных модулей движения поясняет рис. 1.1.1. Из его анализа следует, что наибольшими синергетическими признаками обладают мехатронные модули движения, которые являются главными конструктивными компонентами современных мехатронных систем. Мехатронные модули движения по своим функциональным возможностям идентичны традиционным электроприводам с компьютерным управлением (цифровым электроприводам), отличаясь от них только конструктивным интеграционным исполнением.

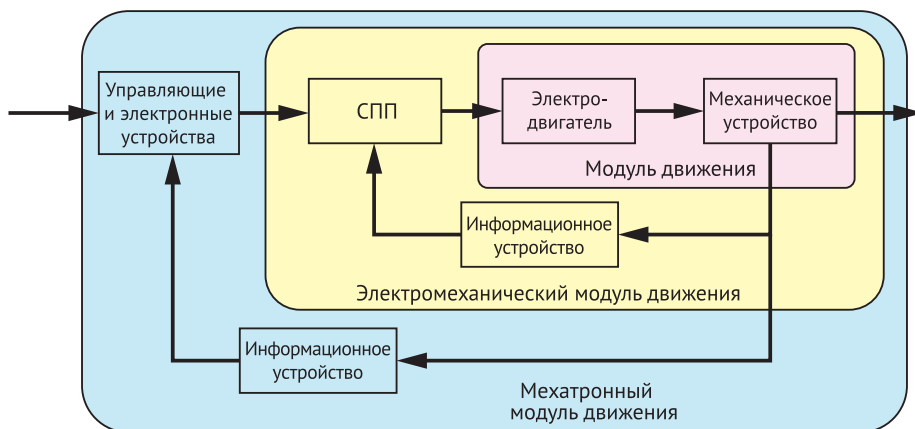


Рис. 1.1.1. Интеграция различных типов модулей движения

Это позволяет рассматривать их как цифровые электроприводы [1.7] (рис. 1.1.2).

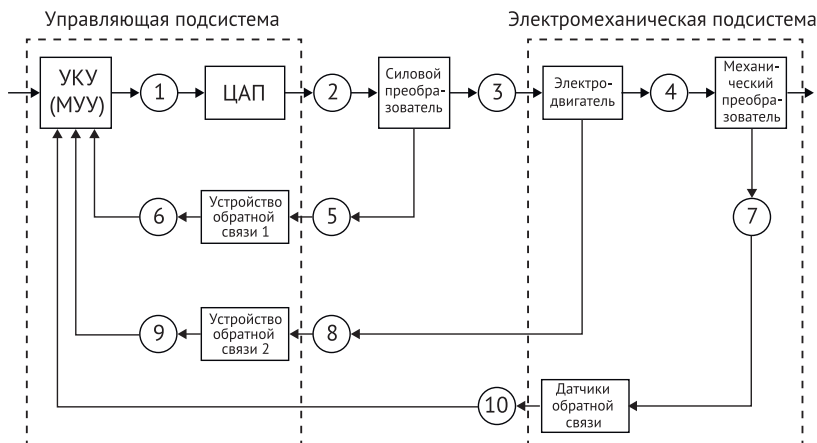


Рис. 1.1.2. Блок-схема мехатронного модуля движения как цифрового электропривода

В обобщенном варианте цифровой электропривод может включать в себя следующие основные элементы (рис. 1.1.2):

- устройство компьютерного управления движением (УКУ), называемое также микропроцессорным управляющим устройством (МУУ), – его функциональной задачей является информационное преобразование (обработка цифровых сигналов, цифровое управление, расчет управляющих воздействий, обмен данными с периферийными устройствами);
- цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), реализующий функцию информационно-электрического преобразования;
- промежуточные усилительные элементы (драйверы), связывающие ЦАП с силовым преобразователем;
- силовой преобразователь [управляемый выпрямитель или широтно-импульсный преобразователь (ШИП)] для двигателей постоянного тока; автономный инвертор – для двигателей переменного тока);
- электродвигатель постоянного или переменного тока;
- механический преобразователь, который реализует заданное управляемое движение и взаимодействует с внешними объектами (редуктор, вариатор или непосредственно мотор-шпиндель);
- устройство обратной связи 1, которое используют для контроля текущих значений напряжений и токов в силовом преобразователе, а также управляющих функций (например, для организации контура управления моментом, развиваемым приводом);
- устройство обратной связи 2, которое используют для контроля текущих значений напряжения и тока электродвигателя, а при необходимости – подключения активных корректирующих звеньев (или пассивных RC-цепочек, например по току);

- датчики обратной связи по положению и скорости движения выходного звена механического устройства, выполняющие функции механико-информационного преобразования;
- интерфейсные устройства, обозначенные на блок-схеме как 1-10.

В зависимости от физической природы входных и выходных переменных интерфейсные блоки могут быть как механическими преобразователями движения, так и содержать электронные аппаратно-программные компоненты. Примерами механических интерфейсов являются передачи и трансмиссии, связывающие входное механическое устройство с двигателями (интерфейс 4) и датчиками обратной связи (интерфейсы 7).

Интерфейсные электронные устройства расположены на входах и выходах УКУ (МУУ) и предназначены для его сопряжения со следующими элементами:

- с ЦАП (интерфейс 1) и далее с силовым преобразователем (интерфейс 2);
- с датчиками обратной связи (интерфейс 7), которые в случае применения сенсоров с аналоговым выходным сигналом строятся на основе АЦП;
- с устройствами обратной связи для контроля электрических сигналов в силовом преобразователе и электродвигателе (интерфейсы 6, 9 на основе АЦП).

Модули движения строятся на базе электрических двигателей [постоянного и переменного (асинхронные, синхронные) тока]. Наряду с таким преимущественным подходом в мехатронных системах находят применение модули движения на основе линейных двигателей переменного тока и соленоидных приводных устройств [1.9].

1.2. Математические модели мехатронных модулей движения

Мехатронные модули движения (цифровые электроприводы) (рис. 1.1.2) содержат непрерывные и дискретные (цифровые) элементы, которые с целью их анализа и синтеза интерпретируют в виде математических моделей. Под термином математическая модель понимается записанная в форме аналитических соотношений совокупность знаний о конкретном техническом устройстве. В нижеследующих подпунктах данного параграфа рассмотрены модели, которые используются в настоящем учебном пособии.

1.2.1. Математические модели непрерывных элементов

Модели непрерывных элементов мехатронных модулей движения могут быть представлены в виде: обыкновенных дифференциальных уравне-

ний, передаточных функций, частотных характеристик, структурных схем (графоаналитических моделей) и пространства состояний [1.10–1.13, 1.20].

Дифференциальное уравнение системы с входной переменной $u(t)$ и выходной $x(t)$ в общем случае имеет вид¹:

$$a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = b_m \frac{d^m u}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{d}{dt} + b_0 u, \quad (1.2.1)$$

где $a_0 \dots a_n, b_0 \dots b_m$ – константы, зависящие от физических параметров системы.

При проектировании мехатронных модулей движения используют как известные (изученные), так и вновь разрабатываемые компоненты (элементы, устройства). Динамические свойства многих известных элементов изучены, и их математические модели приведены в специальной литературе (учебниках, каталогах, справочниках). Если в мехатронном модуле движения используется элемент, математическое описание которого не изучено, то проектировщику приходится решать задачу его определения. Чаще всего подобные задачи сводятся к отысканию математической модели в виде дифференциального уравнения с помощью аналитических методов, которые базируются на физических законах функционирования исследуемого элемента. При математическом описании несложных механических устройств (с малым количеством степеней свободы), входящих в состав модуля движения, используют второй закон Ньютона или принцип Даламбера. Для устройств с большим количеством степеней свободы применяют основополагающие принципы аналитической механики (принципы возможных – виртуальных перемещений, принцип Даламбера–Лагранжа), обобщенные уравнениями Лагранжа второго рода. При построении моделей электромеханических элементов и устройств для отыскания описания их механических составляющих используют методы классической механики, а для описания электромеханических составляющих – законы Кирхгофа, Фарадея и Ленца. Поясним изложенное выше на следующем примере.

Пример 1.2.1. Необходимо определить математическую модель соленоидного актуатора как функционального элемента мехатронного модуля движения (рис. 1.2.1), отображающую динамические свойства его механической и электрической частей.

¹ Символ t в обозначениях переменных говорит, что они являются функциями времени. Для упрощения записи в уравнениях (1.2.1) его можно не указывать.

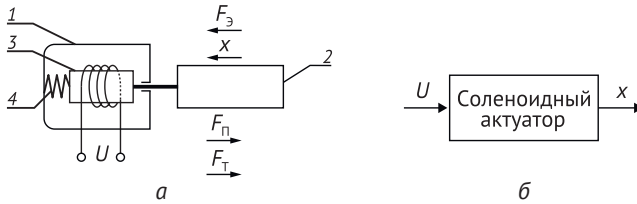


Рис. 1.2.1. Схематичное представление соленоидного актуатора:
 а – конструктивная схема; б – функциональная схема;
 1 – актуатор; 2 – рабочий механизм; 3 – соленоид; 4 – пружина

Для вывода искомой модели воспользуемся вторым законом Ньютона и вторым законом Кирхгофа.

На основе второго закона Ньютона запишем уравнение движения подвижных масс актуатора:

$$m\ddot{x} = F_3 - F_T - F_{\text{п}}, \quad (1.2.2)$$

где m – масса подвижных частей рассматриваемой динамической системы (сердечника, штока, рабочего механизма); F_3 – электромагнитная сила, создаваемая соленоидом; F_T – сила вязкого трения; $F_{\text{п}}$ – сила, создаваемая пружиной.

Для упрощения примем, что сила соленоида линейно зависит от величины тока I в его обмотке:

$$F_3 = kl, \quad (1.2.3)$$

где k – постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных параметров соленоида (количество витков обмотки, материала сердечника, его конфигурации и др.).

Сила вязкого трения:

$$F_T = q\dot{x}, \quad (1.2.4)$$

где q – коэффициент вязкого трения.

В актуаторе применена пружина с линейной характеристикой, для которой сила

$$F_{\text{п}} = cx, \quad (1.2.5)$$

где c – коэффициент упругости пружины.

С учетом уравнений (1.2.3–1.2.5) уравнение (1.2.2) примет вид:

$$m\ddot{x} = kI - q\dot{x} - cx,$$

или в канонической форме как

$$T_2^2\ddot{x} + T_1\dot{x} + x = k_m I, \quad (1.2.6)$$

где $T_1 = \frac{q}{c}$ (с); $T_2 = \sqrt{\frac{m}{c}}$ (с); $k_m = \frac{k}{c}$ (м/А) – постоянные времени и передаточный коэффициент модели звена, соответствующего механической части актуатора.

Для определения уравнения Кирхгофа рассмотрим электрическую схему соленоида (рис. 1.2.2).

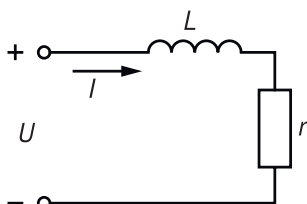


Рис. 1.2.2. Схема электрической цепи актуатора

Уравнение Кирхгофа, соответствующее рис. 1.2.2 и отображающее динамические свойства электрической части актуатора, имеет следующий вид:

$$L\dot{I} + Ir = U,$$

где L, r – соответственно индуктивность и активное сопротивление обмотки соленоида.

После преобразования последнего уравнения к канонической форме оно примет следующий вид:

$$T\dot{I} + I = k_{\text{эл}} U, \quad (1.2.7)$$

где $T = \frac{L}{r}$ (с); $k_{\text{эл}} = \frac{1}{r}$ ($1/\text{Ом}$) – постоянная времени и передаточный коэффициент модели звена, соответствующего электрической части актуатора.

Таким образом, получена математическая модель соленоидного актуатора в виде системы дифференциальных уравнений (1.2.6) и (1.2.7), которые путем алгебраических преобразований можно свести к одному дифференциальному уравнению, отображающему связь выходной величины x – перемещения штока актуатора, сочлененного жестко с рабочим механизмом, и входной величины U – напряжением на обмотке соленоида. По причине громоздкости таких преобразований формирование единой математической модели сведением уравнений (1.2.6) и (1.2.7) к одному дифференциальному уравнению в примере не рассматривается, поскольку эта задача решается значительно проще на основе математического аппарата передаточных функций и структурных схем, основные положения которого рассматриваются ниже.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru