

Д. Уайт

Электромеханическое преобразование энергии

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Д11

Д11 **Д. Уайт**
Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт – М.: Книга по Требованию, 2024. – 528 с.

ISBN 978-5-458-34986-4

В книге излагается общая теория электромеханических преобразователей энергии — генераторов, двигателей и т. д. Анализ основных явлений, связанных с электромеханическим преобразованием энергии, проводится на базе основ аналитической динамики. Уравнения движения выводятся для двухфазной идеализированной модели электрической машины, называемой обобщенной электрической машиной. Показывается, что на основе этих уравнений может быть проведен анализ всех практически используемых электромеханических преобразователей. Особое внимание обращено на динамические режимы работы электромеханических устройств. Показывается возможность применения аналоговых счетно-решающих машин для решения задач электромеханики. Книга может быть полезна для специалистов, работающих в области проектирования, исследования и эксплуатации электромеханических устройств и их применения в системах автоматического управления.

ISBN 978-5-458-34986-4

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

руют изложенный в ней теоретический материал и требуют значительной самостоятельной работы при их решении. Читателям очень рекомендуется найти время для их решения. Можно смело утверждать, что читатели, самостоятельно решившие хотя бы половину всех приведенных в книге задач, могут считать, что они находятся на верном пути к овладению электромеханикой.

В конце книги помещена одна глава из литографированного издания книги тех же авторов. Было целесообразно добавить ее как приложение к переводу, ибо предварительное ознакомление с ней может существенно уменьшить некоторые трудности, с которыми может столкнуться читатель, пожелавший глубоко изучить и действительно взять на вооружение для своих собственных исследований тот нелегкий материал, который преподносится в настоящей книге.

Вместе с тем нельзя не отметить, что «весовые функции» различных глав книги совсем не одинаковы. Так, гл. 5, излагающая «основные принципы динамики систем», а яснее говоря, элементы теории автоматического регулирования, имеет небольшую «весовую функцию» и не необходима в книге. Изложенный в ней материал, с одной стороны, слишком мал, чтобы быть по теории автоматического регулирования достаточным для современного инженера-электромеханика, а с другой стороны, почти не связан ни с предыдущими, ни с последующими ее главами.

К сожалению, книга посвящена динамике только одиночных машин. Лишь в гл. 9, посвященной синхронным машинам, имеется несколько параграфов, описывающих параллельную работу двух синхронных машин. Правда, рассмотрение систем машин (синхронных и асинхронных) и энергетических систем в целом потребовало бы много места и значительно увеличило бы и без того немалый объем книги. Однако отсутствие в книге исследований цепей, содержащих системы машин, естественно, не могло содействовать постановке таких актуальных вопросов, как рациональный выбор систем вращающихся координат при наличии в цепи ряда синхронных и асинхронных машин, рассмотрение несимметричных коротких замыканий и других несимметричных коммутаций, исследование динамической устойчивости систем методом мгновенных значений, исследование динамических перенапряжений и т. д. Почти не нашло места в книге ни в ее теоретической части, ни при решении конкретных задач изложение основных тенденций, отчетливо проявляющихся в настоящее время при исследовании динамики электрических цепей, содержащих различные вращающиеся машины.

Известным недостатком книги является также отсутствие в ней хотя бы нескольких до конца решенных числовых задач.

При редактировании в нескольких местах нельзя было согласиться с положениями, высказываемыми авторами. В таких случаях, не меняя текста книги, были сделаны подстраничные примечания, фиксирующие имеющееся несогласие.

При редактировании книги был также исправлен целый ряд очевидных и неочевидных опечаток.

И тем не менее в заключение предисловия к русскому переводу, нельзя не сказать, что эта, хотя и весьма нелегкая для изучения книга, должна стать настольной для каждого образованного инженера-электромеханика, решившего посвятить свою деятельность исследованию режимов работы отдельных машин и их систем в весьма разнообразных условиях современной практики.

С. В. Страхов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга является одной из нескольких книг, появившихся в результате пересмотра курса электротехники в Массачусетском технологическом институте. Будучи, по существу, учебником, книга может также рассматриваться как отчет по исследовательской работе, имеющей целью такую организацию подготовки студентов-электриков, которая давала бы основу для успешного решения ими в их дальнейшей деятельности вопросов, связанных с развитием той области, в которой они работают.

Переработка программ по электротехнике, связанная с изменениями в промышленности, проводится в Массачусетском технологическом институте не впервые. Серьезный пересмотр программ имел место в начале 30-х годов. К 40-м годам появился ряд новых курсов, что вызвало опубликование четырех соответствующих книг. Развитие промышленности, происшедшее во время второй мировой войны, вызвало большие изменения в электротехнике. Следующий пересмотр программ был осуществлен с учетом этих изменений. К 1952 г. работа, проводившаяся с большим энтузиазмом и энергией, была, по существу, закончена.

Новый курс построен таким образом, что вопросы, связанные с промышленной практикой, рассмотрены на общей базе, обеспечивающей широкое инженерное приложение теории. Он также включает вновь развитую лабораторную программу, в которой подчеркивается роль эксперимента и его взаимоотношение с теоретическими построениями при решении инженерных задач. В связи с ограниченным временем, отводимым в четырехлетней программе на изучение предмета, в настоящем курсе предпочтение отдается основным принципам и методам анализа, а не описанию современной промышленности.

Дж. А. Стрэттон

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающая сложность и разнообразие электротехники как теоретической, так и прикладной, а также ограниченное время, отводимое на нее в четырехлетних институтских программах, вызывает необходимость изучать методы расчета и анализа современных устройств на научной основе. Это подчинение инженерной практики научным принципам сильно стимулируется в настоящее время тем фактом, что прогресс в современной электротехнике часто больше зависит от применения научных основ, чем от текущей практики. Примеры инженерной практики, еще имеющиеся в программе, должны служить для связи научных абстракций с современной техникой. В этих рамках мы сделали критический обзор теории электрических машин и преобразователей и сформулировали нашу точку зрения на общие принципы электромеханического преобразования электрической энергии. Эти важные для современной электротехники принципы являются основой сегодняшней практики.

Рассматривая электромеханику как один из краеугольных камней электротехники, мы пришли к выводу, что она должна основываться на прочной теоретической базе, подчеркивающей взаимосвязь между электромеханикой и другими науками, изучающими преобразование энергии. По этой причине, начав с определения функций состояния и переменных данной системы, мы использовали их в хорошо известных принципах аналитической динамики (принцип Гамильтона или соответственно закон сохранения энергии и принцип возможных перемещений) для получения уравнений движения данной системы. Мы совершенно уверены, что анализ электромеханических устройств, построенный на рассмотрении установившихся процессов с использованием эквивалентных схем и простейших сведений из теории цепей, не является прочной основой для понимания электромеханических явлений. Хотя такой подход и полезен при решении ряда современных проблем, он не является достаточным для решения более общих задач, связанных с электромеханическими явлениями.

В настоящей книге были использованы три источника. Первоначальным источником и основной движущей силой при написании книги было содержание односеместрового курса по электромеханическому преобразованию энергии для студентов старших курсов. Этот курс должен был освещать глубокие основные принципы и в то же время касаться специфических преобразователей в общей форме, достаточной, однако, для понимания физики динамических процессов в преобразователях. Представляется, что даже в условиях все возрастающего применения точных систем автоматического регулирования инженер должен быть знаком с динамическими свойствами преобразователей, которыми он заменяет человеческие мускулы. Вторым источником была исследовательская работа, проводимая по договору с военно-воздушными силами США и посвященная изучению динамических свойств

авиационных генераторов. Третьим источником была работа с аспирантами и их исследования.

Поскольку электромеханическое преобразование энергии имеет место только при взаимодействии электромагнитного поля с движущимися материальными телами, целесообразно начать изложение с макроскопической электродинамики. Наш опыт преподавания на старших курсах показывает, что студенты, овладевшие макроэлектродинамикой, прекрасно подготовлены к более сложной работе. Однако мы обнаружили также, что для среднего студента время, необходимое для овладения электродинамикой, таково, что на изучение систем с сосредоточенными параметрами в объеме, необходимом для изучения динамических свойств, времени остается мало. Следует отметить, что описание динамики систем преобразования энергии только на базе теории поля часто оказывается нецелесообразным. Эти соображения, а также знакомство старшекурсников с такими понятиями электродинамики, как поле, энергия, сила, побудили нас начать с рассмотрения систем с сосредоточенными параметрами, делая некоторые ссылки на теорию поля как на основу для определения области применения сосредоточенных параметров, а также для определения параметров систем.

При выбранном подходе уравнения движения в гл. 1 получены в достаточно общей форме, причем принципиальным ограничением является то, что связанная система должна быть консервативной. Были использованы два подхода: принцип возможных перемещений и закон сохранения энергии, и принцип Гамильтона, из которого вытекают уравнения Лагранжа. Первый подход предполагает лишь электромеханически связанные величины; следовательно, уравнения движения системы должны быть записаны с использованием законов Кирхгофа и принципа Даламбера, что приводит к громоздким выкладкам при решении сложных задач. В свою очередь уравнения Лагранжа могут быть достаточно общими, чтобы включать неконсервативные части системы, так что все преобразования производятся автоматически. Некоторые авторы считают, что применение уравнений Лагранжа может увести студентов в сторону; однако мы уверены, что уравнения Лагранжа дают нечто большее, чем просто инструмент для решения задач. Они подводят студентов к вариационным принципам, которые в известном смысле столь же важны, как и закон сохранения энергии. Уравнения Лагранжа дают также представление об обобщенных координатах и закладывают прочный фундамент для определения независимых переменных. Функция Лагранжа и преобразование Лежандра указывают подход к функциям состояния вообще и являются связующим звеном с функциями состояния, обычно применяемыми в термодинамике. Мы уверены, что эти преимущества уравнений Лагранжа полностью оправдывают их применение. Это согласуется с желанием расширить область, охватываемую настоящей книгой, и заложить основу, которая в будущем позволила бы включить системы с более сложными связями, чем только электрические и механические.

Глава 2 содержит математический аппарат для решения уравнений движения, начиная с обычного классического метода решения линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами и кончая применением вычислительных машин непрерывного действия для решения нелинейных уравнений. Очевидно, что настоящая глава не ставит целью обучение математике, а должна лишь проиллюстрировать применение известного математического аппарата для анализа типичных преобразователей. Авторы не пытались изложить здесь все известные методы анализа линейных уравнений. Опущены метод электрических аналогий, операторные методы, отличные от преобразований Лапласа и т. д. Несмотря на это, использованный математический аппарат является достаточно показательным. В главе не содержится

примеров использования вычислительных машин дискретного действия. Однако мы учитываем все возрастающую важность их применения для анализа систем, и общие уравнения, полученные для электро-механических преобразователей энергии, могут быть непосредственно решены с их помощью.

Главы 3 и 4 представляют попытку объединить ранние работы Крона (Kron), Гиббса (Gibbs) и др. в универсальном изложении динамики вращающихся машин. Для общей физической модели, состоящей из концентрических магнитных цилиндров с токами, распределенными по их поверхностям, найдена картина поля, определены параметры и получены уравнения движения. С помощью выбора нужных свойств общей модели были получены полные динамические уравнения для большинства обычных и многих специальных машин. Рассмотрены математические преобразования, описывающие физическое изменение переменных при наличии коллектора и позволяющие представить уравнения движения в более удобной для решения форме.

Таким образом, одна физическая модель с одной системой уравнений описывает все установившиеся процессы в обычных машинах, динамику обычных машин, а также статику и динамику многих специальных машин.

Применение обобщенного подхода для изучения в лаборатории подобной условной машины позволяет свести решение задач, связанных с установившимися процессами в электрических машинах, к решению задач об установившихся процессах в цепях постоянного и переменного тока, с которыми студенты хорошо знакомы. Кроме того, решение общих уравнений поля позволяет выразить явления, возникающие при преобразовании энергии, в понятиях теории поля. Изучение этого раздела теории электрических машин требует сравнительно немного времени, что позволяет увеличить время, отводимое для изучения динамических свойств, которые являются весьма важными в современной технике, и значение которых в будущем еще более возрастет.

Может возникнуть сомнение относительно правильности выбора двухфазной машины в качестве устройства, для которого построена теория электрических машин. В гл. 10 показано, что характеристики любой симметричной многофазной машины могут быть получены путем простой замены переменных с помощью теории эквивалентной двухфазной машины, для которой известны уравнения движения. Мы считаем, что математическая сложность даже в случае двухфазной системы приводит к неясности ряда вопросов, изложенных в книге. Использование в качестве основного объекта трехфазной системы лишь внесло бы дополнительную математическую сложность и увело бы от понимания природы преобразования энергии во вращающихся машинах.

В главе 5 дается общее введение в теорию систем автоматического регулирования. Мы считаем, что это является целесообразным, так как те студенты, которые не слушают специального курса, должны тем не менее быть знакомы с основными положениями теории автоматического регулирования. Кроме того, в этой главе на базе характеристик машин рассматривается динамика взаимосвязанной системы электрических машин.

Главы 1—5 содержат материал, предназначенный для первого семестра четвертого курса. Позднее этот материал читался во втором семестре третьего курса. Работа в аудитории обычно дополняется работой в лаборатории, где студенты практически знакомятся с преобразователями и обобщенной машиной. Кроме того, положения теории осваиваются студентами при проведении экспериментов с промышленными электрическими машинами и преобразователями.

Главы 6—9 посвящены подробному описанию ряда специфических устройств. В них показывается, как может быть применен общий подход, изложенный в первых главах. Этот материал первоначально предназначался для использования аспирантами и инженерами. Он также использовался как часть факультативного односеместрового курса по электромашинным системам для студентов четвертого курса.

Главы 10 и 11 необходимы для общности изложения. В гл. 10 излагаются методы приведения любой n — m -фазной машины к эквивалентной двухфазной машине в целях анализа динамических свойств. Таким образом, обосновывается использование двухфазной модели в первых главах. Глава 11 показывает, как можно распространить результаты, полученные в гл. 3 для машин с синусоидально распределенными токами, на машину с любым произвольным распределением тока (любым размещением обмоток). В главе содержится также строгое обоснование метода, использующего простую замену переменных для анализа машин с коллектором. Этот метод крайне важен для унификации электрических машин всех типов.

Материал настоящей книги, впервые представленный группе студентов четвертого курса Массачусетского технологического института в осеннем семестре 1954 г., явился результатом коллективного труда. После этого были внесены некоторые изменения, но большинство основных мыслей, лежащих в основе книги, были сформулированы первоначальной группой, которая состояла из авторов, а также профессоров М. Риаз (M. Riaz), Р. Сандерс (R. Saunders), Г. Кёниг (H. Koenig), Р. Фрайзер (R. Frazier).

Особую признательность хочется выразить проф. М. Риаз за его участие в гл. 4, 6, 8 и 10, профессорам Л. Голд (L. Gould) и Р. Сандерс за их участие в гл. 5 и Д. Боброву (D. Bobroff) за участие в гл. 1. Кроме того, значительный труд в настоящую книгу вложили профессор Р. Адлер (R. Adler), Л. Чу (L. Chu), Д. Эпштейн (D. Epstein), Р. Фано (R. Fano), Ч. Кингсли мл. (C. Kingsley, Jr.), А. Куско (A. Kusko), О. Маварди (O. Mawardi), Н. Мейерс (N. Meyers) и К. Вильдес (K. Wildes). Особо следует отметить блестящие работы докторов Г. Крона и В. Гиббса, явившиеся неоценимым вкладом в развитие многих идей, представленных в настоящей книге.

Авторы также очень обязаны Б. Ловеллу (B. Lovell) за его неоценимую работу по редактированию книги. Мы хотели бы также поблагодарить Л. Хант (L. Hunt), Р. Коухлэн (R. Coughlan), Л. Боназолли (L. Bonazzoli) и Е. Фракасторо (E. Fraccastoro) за их участие в печатании рукописи книги.

Особо мы отмечаем наших жен Глорианну Уайт (Glorianna G. White) и Бланш Вудсон (Blanche S. Woodson), чьей неоценимой помощью — осязаемой и неосязаемой, мы пользовались во время написания книги.

Наконец, авторы хотели бы выразить свою признательность доктору Г. Брауну (G. Brown), без чьей предусмотрительности, упорства и мужества эта книга не увидела бы света.

Кеймбридж, Массачусетс,
ноябрь 1958 г.

*Давид Уайт
Герберт Вудсон*

ГЛАВА ПЕРВАЯ

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1-0. ВВЕДЕНИЕ

Преобразование электромеханической энергии происходит в результате электродинамических процессов, в связи с чем необходимо строгое изучение движения заряженных материальных тел в электромагнитных полях. Однако для квазистатических (низкочастотных) и низкоскоростных электромеханических систем уравнения движения могут быть записаны с высокой степенью точности с помощью сосредоточенных параметров электрических цепей, полученных из статических уравнений поля [Л. 1].

Целью этой книги является изучение электромеханических систем с использованием сосредоточенных параметров. Оно распадается на три главные задачи: 1) физическое описание системы, 2) составление дифференциальных уравнений движения системы, 3) решение уравнений с учетом конкретных условий задачи. Физическое описание системы влечет за собой выбор идеализированной модели, характер которой определяется физикой задачи и законченность которой зависит от поставленных требований. Уравнения движения получают из идеализированной модели несколькими способами. Некоторые из них описаны в настоящей главе. Решение уравнений движения в общем случае затруднительно, так как уравнения для всякой системы преобразования энергии нелинейны. В ряде случаев уравнения могут быть линеаризованы (например, для малых сигналов); в других — замена переменных приводит к упрощению уравнений. В тех случаях, когда необходимо решать полную систему нелинейных уравнений, может потребоваться применение вычислительных машин. Типы нелинейностей разнообразны и возможность упрощения зависит от вида электромеханических систем и областей их применения.

1-1. РАЗЛИЧНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Уравнения движения электромеханических систем можно получить на основании физических законов, используя для получения механических сил электрического происхождения плотность сил из теории электромагнитного поля или принцип возможных перемещений и закон сохранения энергии. Другим путем уравнения могут быть получены при помощи вариационных принципов, примененных к выбранным функциям энергии. Трудно отдать предпочтение какому-либо из этих методов. Каждый из них при правильном применении приводит к верным результатам. Имеется, однако, большое различие между этими

методами с точки зрения формальности применяемой техники анализа.

Применение законов физики для получения уравнений движения является, видимо, наименее формальным, но требует большой интуиции и рассудительности, в особенности, когда речь идет о сложных системах, содержащих большое количество переменных. Условия электрических связей, вытекающие из характера механического движения, и уравнения движения для электрической и механической частей системы получают из известных законов физики, таких как закон Фарадея, закон Кулона, законы Кирхгофа и принцип Даламбера. Принцип возможных перемещений и закон сохранения энергии используются для определения механических сил взаимодействия систем, потому что они легко приводят к решению уравнений механических сил, выраженных в значениях величин электрических цепей. С другой стороны, эти условия связи могут быть найдены путем интегрирования плотностей сил, полученных из теории электромагнитного поля.

Решение уравнений движения на базе вариационных принципов значительно отличается от предыдущего метода. Вначале устанавливается общая терминология для всех типов систем, будь то электрическая, механическая, термическая, акустическая и т. д., путем введения силовых функций (функций энергии) от обобщенных переменных. Затем определяют уравнения движения для всех систем, включая выражения для любых связей, используя один основной принцип, например принцип Гамильтона. Вариационный подход является совершенно формальным, и, следовательно, интуиция в области физических представлений может быть потеряна в математических выкладках. Однако, если метод правильно понят и если соответствующее внимание уделено выбору силовой функции, физическая интуиция может дать пользу благодаря общности метода. Вариационный метод является одним из наиболее мощных методов механики. И хотя начинающим свойственно стремление охватить явление во всей его полноте, большие возможности вариационного метода часто не используются ими. Это происходит как в силу кажущихся трудностей, так и в силу того, что начинающие предпочитают руководствоваться физической интуицией.

1-2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

Фундаментальное соотношение для сил в статике состоит в том, что при равновесии сумма всех сил, действующих на тело, равна нулю. Эта основная концепция была использована Даламбером для постулирования положения, что при динамическом равновесии механических систем сумма всех сил равна нулю [Л. 2]. Для многоконтурной динамической системы принцип Даламбера требует, чтобы для k -го механического узла ¹

$$\sum_{i=1}^r (\dot{p}_{ki} - f_{ki}) = 0, \quad (1-1a)$$

где

$$\dot{p}_{ki} = \frac{dp_{ki}}{dt} = \frac{d}{dt} (m_{ki} \dot{x}_{ki}) \text{ — } i\text{-я инерционная сила } k\text{-го узла (внешняя);}$$

f_{ki} — i -механическая сила, включая любые силы связи, приложенная к k -му узлу.

¹ Терминология и определения в этой главе даются в предположении, что физическая система представлена в виде механической и электрической эквивалентных схем. Таким образом, «механический узел» или «механический контур» является узлом или контуром в механической эквивалентной схеме, и каждый механический узел имеет только одну степень свободы и описывается одной координатой x_k . [Более подробный материал по этому вопросу приведен в книге Гарднера М. Ф. и Бэрнса Дж. Л. «Переходные процессы в линейных системах», Физматгиз, 1951 (гл. II) *Примечание редактора.*]

Кроме того, чтобы удовлетворить принципу Даламбера для динамического равновесия, должны быть удовлетворены соотношения непрерывности пространства. Это означает, что вдоль любого механического контура (k -го контура) сумма всех перемещений или скоростей должна быть равна нулю:

$$\sum_{i=1} \dot{x}_{ki} = 0, \quad (1-16)$$

где $\dot{x}_{ki}$ — i -я скорость в k -м контуре.

Аналогично для электрических систем динамические уравнения равновесия, установленные Кирхгофом, являются разновидностью принципа суммирования сил и условия непрерывности заряда [Л. 3].

Для электрических цепей потенциальное уравнение выражается следующим образом: сумма всех падений напряжения вдоль контура (k -го контура) равна нулю:

$$\sum_{i=1}^s e_{ki} = 0, \quad (1-1в)$$

где e_{ki} — i -е напряжение в k -м контуре.

Соотношение непрерывности заряда или непрерывности тока состоит в том, что сумма всех токов в узле (k -м узле) должна равняться нулю:

$$\sum_{i=1}^r i_{ki} = 0, \quad (1-1г)$$

где i_{ki} — i -й ток в k -м узле.

Принцип Даламбера (1-1а), соотношение непрерывности пространства (1-1б) и законы Кирхгофа (1-1в и г) выражают полные уравнения движения электромеханических систем. При этом механические силы электрического происхождения подчиняются принципу Даламбера (1-1а), а в электрических напряжениях и токах, связанных законами Кирхгофа (1-1в и 1-1г), проявляется эффект механического движения.

Основные законы, необходимые для изучения динамики электромеханических устройств с точки зрения теории цепей, являются в настоящее время вполне разработанными. К сожалению, механические силы электромеханической связи, которые выражены в форме, позволяющей легко решать задачи теории электромагнитного поля, трудно приспособить к изучению эквивалентной схемы связанных электрических и механических систем. Прямое распространение макроскопических потенциальных уравнений, выраженных в понятиях теории электромагнитного поля, на потенциальные уравнения, записанные в терминах теории электрических цепей, при помощи интегральных методов затруднительно, если только физическое устройство не является весьма простым. Оказывается, что легче вывести эти условия связи, используя принцип возможных перемещений и закон сохранения энергии.

1-2-1. Механические силы электромеханической связи, полученные из принципа возможных перемещений и закона сохранения энергии

Приступая к анализу сложной электромеханической системы при помощи принципа возможных перемещений (Л. 2 и 4) и закона сохранения энергии, стремятся упростить ее. Для этого выделим все чисто электрические части и все чисто механические части системы, включая потери, как показано на рис. 1-1. Эта процедура выделения доводится до такой степени, что каждая пара электрических зажимов оказывается соединенной с одним накопителем энергии, электрической или магнитной. Любые внутренние соединения между контурами, которые связаны

с разными накопителями энергии, вынесены во внешнюю электрическую схему. Механические переменные, представленные при помощи пары механических зажимов, суть те, которые влияют на запасание энергии

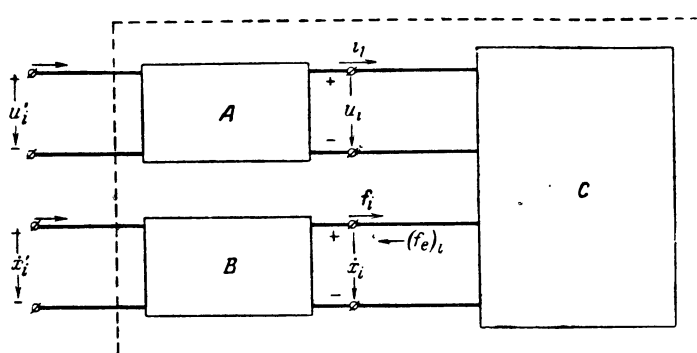


Рис. 1-1. Упрощение электромеханической системы для исследования на основе принципа возможных перемещений и закона сохранения энергии.

A — электрическая схема; уравнения движения получают из законов Кирхгофа; *B* — механическая схема; уравнения движения получают из принципа Даламбера и соотношения непрерывности пространства; *C* — электромеханическая схема (представляет поля связи — электрическое и магнитное); уравнения движения получают из принципа возможных перемещений и закона сохранения энергии.

в электрических или магнитных полях. Любые чисто механические связи между механическими переменными, такие как зубчатые передачи, пружины и т. п., включены во внешнюю механическую схему.

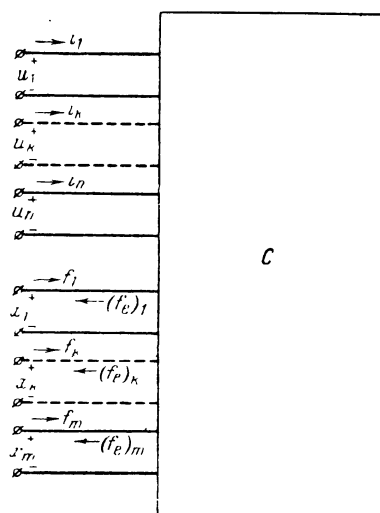


Рис. 1-2. Система, исследуемая на основе принципа возможных перемещений и закона сохранения энергии.

C — электромеханическая схема (представляет поля связи — электрическое и магнитное); все диссипативные элементы вынесены во внешние цепи, следовательно, система консервативная.

Процедура разделения заканчивается получением общей консервативной электромеханической связанной схемы, изображенной на рис. 1-2, в которой имеется n пар электрических зажимов и m пар механических зажимов. В соответствии с представлениями теории цепей с сосредоточенными параметрами каждая пара электрических зажимов будет связана или с накопителем энергии магнитного поля, или с накопителем энергии электрического поля. Для конкретности предположим, что электрические зажимы $1 \leq i \leq l$ связаны с накопителем энергии электрического поля, а зажимы $l+1 \leq i \leq n$ связаны с накопителем энергии магнитного поля. Полная накопленная энергии W в связанной схеме:

$$W = W_e + W_m, \quad (1-2)$$

где W_e — энергия, запасенная в электрических полях;

W_m — энергия, запасенная в магнитных полях.

Для связанной схемы (рис. 1-2) с сосредоточенными параметрами требуется, чтобы переменные системы были функционально связаны. Например, если электромеханическая связанная схема может быть охарактеризована при помощи электрически линейных индуктивностей, то k -е потокосцепление задано, как

$$\Psi_k = \sum_{i=l+1}^n L_{ki} i_i, \quad (1-3a)$$