

**С.А. Ульянов**

**Электромагнитные  
переходные процессы в  
электрических системах**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 621.3  
ББК 31.352  
С11

С11 **С.А. Ульянов**  
Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов – М.: Книга по Требованию, 2024. – 519 с.

**ISBN 978-5-458-37545-0**

В книге рассмотрены электромагнитные переходные процессы в электрических системах и даны методы их расчета. Применение методов иллюстрировано числовыми практическими примерами. Книга предназначена в качестве учебника для студентов специальностей: «Электрические станции», «Электрические системы и сети», «Кибернетика электрических систем»; для студентов других электроэнергетических и электротехнических специальностей она может служить учебным пособием. Книга может быть также использована аспирантами, научными и инженерно-техническими работниками энергетической промышленности

**ISBN 978-5-458-37545-0**

© 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.



Серия Книжный Ренессанс

[www.samizday.ru/reprint](http://www.samizday.ru/reprint)



ный, но далеко не исчерпывающий. список литературы приведен в книге автора, изданной в 1964 г. [Л. 4].

Автор выражает глубокую благодарность коллективу кафедры «Электрические станции, сети и системы» Рижского политехнического института и доктору техн. наук, проф. Н. И. Соколову за рецензирование рукописи и сделанные ими замечания и предложения, которые учтены при окончательной подготовке рукописи к печати.

С благодарностью автор отмечает большую работу канд. техн. наук, доц. И. П. Крючкова по тщательному редактированию рукописи.

Все замечания и пожелания по данной книге автор примет с признательностью и просит их направлять в адрес издательства «Энергия» (Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10).

Москва, 1970.

*С. А. Ульянов*

## ВВЕДЕНИЕ

Курс «Переходные процессы в электрических системах» является одним из профилирующих для электроэнергетических специальностей и специализаций.

Переходные процессы возникают в электрических системах как при нормальной эксплуатации (включение и отключение нагрузок, источников питания, отдельных цепей, производство испытаний и пр.), так и в аварийных условиях (обрыв нагруженной цепи или отдельной ее фазы, короткое замыкание, выпадение машины из синхронизма и т. д.). Их изучение, разумеется, не может быть самоцелью. Оно необходимо прежде всего для ясного представления причин возникновения и физической сущности этих процессов, а также для разработки практических критериев и методов их количественной оценки, с тем чтобы можно было предвидеть и заранее предотвратить опасные последствия таких процессов. Короче говоря, важно понимать переходные процессы, но еще важнее уметь сознательно управлять ими.

При любом переходном процессе происходит в той или иной мере изменение электромагнитного состояния элементов системы и нарушение баланса между моментом на валу каждой вращающейся машины и электромагнитным моментом.

В результате этого нарушения соответственно изменяются скорости вращения машин, т. е. некоторые машины испытывают торможение, в то время как другие — ускорение. Такое положение существует до тех пор, пока регулирующие устройства не восстановят нормальное состояние, если это вообще осуществимо при изменившихся условиях.

Из сказанного следует, что переходный процесс характеризуется совокупностью электромагнитных и механических изменений в системе. Последние взаимно связаны и по существу представляют единое целое. Тем не менее благодаря довольно большой механической инер-

ции вращающихся машин начальная стадия переходного процесса характеризуется преимущественно электромагнитными изменениями. В самом деле, вспомним хотя бы процесс пуска асинхронного двигателя. С момента включения его в сеть до момента начала разворота ротора двигателя имеет место только электромагнитный переходный процесс, который затем дополняется механическим переходным процессом. Процесс пуска двигателя значительно усложняется, если учесть возникающую реакцию источника питания и действие его автоматических регулирующих устройств.

При относительно малых возмущениях (например, при коротком замыкании за большим сопротивлением или, как говорят, при большой удаленности короткого замыкания) весь переходный процесс практически можно рассматривать только как электромагнитный. Для иллюстрации укажем, что в установке с напряжением 400 в ток короткого замыкания в 5 000 а после его приведения к стороне генераторного напряжения составляет менее 1,5% номинального тока современного турбогенератора 200 Мвт (15,75 кв). Естественно, такое малое увеличение тока не вызовет заметного нарушения равновесия рабочего состояния упомянутого турбогенератора.

Таким образом, при известных условиях представляется возможным и целесообразным рассматривать только одну сторону переходного процесса, а именно явления электромагнитного характера. В соответствии с этим настоящий курс разбит на две части. В первой из них рассматриваются электромагнитные переходные процессы<sup>1</sup>, а во второй — совместно электромагнитные и механические, т. е. электромеханические переходные процессы. Такое деление помогает учащемуся постепенно осваивать разнообразный и достаточно сложный материал курса.

При прохождении курса «Теоретические основы электротехники» читатель уже знакомился с переходными процессами в цепях с сосредоточенными и распределенными параметрами. Рассмотрение этих процессов проводилось в предположении, что цепь является однофазной и ее питание осуществляется от источника с заранее известным напряжением (как по величине, так и по за-

---

<sup>1</sup> В конце первой части рассматривается упрощенный учет качаний генераторов, что является естественным переходом ко второй части курса.

кону его изменения). В данном курсе предстоит рассмотреть более сложные задачи, когда переходный процесс возникает в многофазной цепи, при этом он одновременно протекает в самих источниках питания, у которых дополнительно приходят в действие автоматические регулирующие устройства. В этом случае напряжения всех источников<sup>1</sup> являются неизвестными переменными величинами.

Преподавание в вузах этого курса как самостоятельной специальной дисциплины<sup>2</sup> началось в конце 20-х годов. За истекшее время его содержание и число часов, отводимое на него в учебных планах, неоднократно менялось. В последние годы установлена более тесная последовательная связь между его обеими частями.

Первая часть данного курса использует материал, изученный в курсах высшей математики (операционное исчисление), теоретических основ электротехники (линейные цепи), электрических машин (преимущественно синхронные и асинхронные машины) и электрических сетей и систем.

В свою очередь материал первой части данного курса используется при прохождении его второй части, а также при дальнейшем изучении других специальных курсов, как-то: электрических систем, дальних передач, основного электрооборудования станций, техники релейной защиты, автоматизации электрических систем и др.

Практические задачи, при решении которых инженер-электрик сталкивается с необходимостью количественной оценки тех или иных величин во время электромагнитного переходного процесса, многочисленны и разнообразны (см. § 1-3). Однако все они в конечном итоге объединены единой целью обеспечить надежность работы отдельных элементов и электрической системы в целом.

Теперь сделаем небольшую экскурсию в прошлое и покажем вкратце как развивалась проблема переходных процессов преимущественно в части исследования электромагнитных переходных процессов.

В то время как теория установившихся режимов развивалась в правильном направлении и быстро приспособ-

---

<sup>1</sup> За исключением тех, мощность которых практически может быть принята бесконечно большой.

<sup>2</sup> Точнее, двух дисциплин, так как вначале читались отдельно курс коротких замыканий и курс устойчивости электрических систем.

сбилась к нуждам практики, сущность переходных процессов долго оставалась невыясненной. На примере развития электромашиностроения нетрудно проследить, насколько важен учет явлений, в частности, при коротких замыканиях.

Первоначальные конструкции электрических машин выполнялись лишь в соответствии с требованиями нормальной работы. Пока мощности машин были малы, их конструкции обладали как бы естественным запасом устойчивости против механических и тепловых действий токов короткого замыкания. Однако такое положение существовало недолго. По мере роста мощности машин и особенно после осуществления их параллельной работы размер повреждений машин при коротких замыканиях резко возрос. Становилось очевидным, что нельзя обеспечить надежную конструкцию машины, не считаясь с аварийными условиями работы. Успех предлагаемых мер по усилению конструкций зависел от достоверности знаний самого процесса короткого замыкания. Так постепенно создавались все более совершенные конструкции электрических машин. В современном исполнении они являются одним из надежных элементов системы. Разумеется, эта надежность достигнута при учете и других опасных условий, в которых может оказаться машина.

Аналогичное положение наблюдалось при поисках способов гашения магнитного поля электрических машин. Недостаточность первоначальных сведений об этом процессе приводила к малоэффективным решениям. Подобные примеры можно обнаружить и в других областях электроэнергетики (аппаратостроении, технике релейной защиты и др.).

Более серьезная разработка теории переходных процессов в электрических машинах началась с первых лет текущего столетия. В конце 20-х годов Парк (Park) разработал строгую теорию переходных процессов в электрических машинах, приняв в основу ранее предложенную Блонделем (Blondel) теорию двух реакций. Эта теория обеспечила быстрое развитие дальнейших исследований в данной области. Они интенсивно проводились у нас в Союзе и за рубежом, главным образом в США. Особое место среди них занимают работы А. А. Горева.

Примерно в те же годы стала находить все более широкое применение теория симметричных составляю-

щих, остававшаяся в течение нескольких лет без использования. Она позволила решить на строгой научной основе все вопросы, связанные с несимметрией в многофазной цепи.

Наряду с теоретическими исследованиями существенно важной являлась своевременная разработка практических методов расчета переходных процессов. В этом испытывалась острая нужда в связи с проводившейся широкой электрификацией нашей страны.

К выполнению таких работ привлекались научно-исследовательские и учебные институты (ВЭИ, МЭИ, ЛПИ, ХЭТИ и др.), крупные энергообъединения (Мосэнерго, Ленэнерго) и проектные организации (ТЭП). Для координации работ, обобщения результатов, подготовки решений и рекомендаций были созданы специальные комиссии. Так, в 30-х годах под председательством К. А. Круга работала комиссия по разработке указаний к выполнению расчетов коротких замыканий.

Теоретические исследования и практические методы расчета всегда требуют экспериментальной проверки. Ранее ее проводили в натуральных условиях. Однако испытания проводились крайне редко из-за значительного риска, что такой эксперимент повлечет серьезную аварию, поскольку системы не располагали достаточным резервом мощности, связи между станциями были слабы, отсутствовали многие автоматические устройства (как-то: регулирование возбуждения генераторов, повторное включение цепей и др.) и, наконец, само оборудование было еще недостаточно совершенным (например, время действия выключателей составляло десятки доли секунды). Позже и особенно в последнее время благодаря значительному усовершенствованию электрических систем подобные эксперименты проводят по мере необходимости, причем, как правило, они не вызывают каких-либо заметных помех в нормальной работе системы. С той же целью используются записи автоматических осциллографов, которыми все больше оснащают наиболее ответственные и характерные цепи систем.

Неоценимую помощь в экспериментировании и проверке ряда новых теоретических разработок, схем и автоматических устройств оказало и продолжает оказывать физическое и математическое моделирование электрических систем. Применение электронных вычислительных машин непрерывного действия (машины-анало-

ги) и дискретного действия (цифровые машины) в значительной мере расширили возможности очень эффективного математического моделирования.

Расчетные модели, где все элементы системы (включая генераторы) представлены схемами замещения, уже свыше 35 лет широко используют для решения многих задач. В зависимости от их конструкции они позволяют получить решение в соответствии с принятым методом расчета, почти полностью освобождая от утомительной и трудоемкой вычислительной работы, что также очень ценно.

По вопросам переходных процессов в электрических системах, их моделированию и практическим методам их расчета написано много книг. Лишь некоторые из них указаны в данном учебнике.

# Раздел первый

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И УКАЗАНИЯ

---

### Глава первая

#### ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

##### 1-1. Основные определения

Из всего многообразия электромагнитных переходных процессов в электрической системе наиболее распространенными являются процессы, вызванные:

а) включением и отключением двигателей и других приемников электроэнергии;

б) коротким замыканием в системе, а также повторным включением и отключением (одновременным или каскадным) короткозамкнутой цепи;

в) возникновением местной несимметрии в системе (например, отключение одной фазы линии передачи);

г) действием форсировки возбуждения синхронных машин, а также их развозбуждением (т. е. гашением их магнитного поля);

д) несинхронным включением синхронных машин.

Коротким замыканием называют всякое не предусмотренное нормальными условиями работы замыкание между фазами, а в системах с заземленными нейтралью (или четырехпроводных) — также замыкание одной или нескольких фаз на землю (или на нулевой провод).

В системах с незаземленными нейтралью или с нейтралью, заземленными через специальные компенсирующие устройства, замыкание одной из фаз на землю называют простым замыканием. При этом виде повреждения прохождение тока обусловлено главным образом емкостью фаз относительно земли.

При возникновении короткого замыкания в электрической системе сопротивление цепи уменьшается (степень уменьшения зависит от положения точки короткого замыкания в системе), что приводит к увеличению токов в отдельных ветвях системы по сравнению с токами нормального режима. В свою очередь это вызывает снижение напряжений в системе, которое особенно велико вблизи места короткого замыкания.

Обычно в месте замыкания образуется некоторое переходное сопротивление, состоящее из сопротивления возникшей электрической дуги и сопротивлений прочих элементов пути тока от одной фазы к другой или от фазы на землю. Электрическая дуга возникает или с самого начала происшедшего повреждения как, например, при перекрытии или пробое изоляции, или через некоторое время, когда перегорит элемент, вызвавший замыкание. При замыканиях между фазами переходное сопротивление определяется главным образом сопротивлением электрической дуги.

Когда токи достаточно велики (сотни ампер и более), сопротивление дуги приблизительно постоянно и по своему характеру почти чисто активное. С уменьшением тока и увеличением длины дуги, что имеет место в течение переходного процесса, ее сопротивление возрастает. Наглядной иллюстрацией такого изменения могут служить графики (рис. 1-1), полученные экспериментально при возникновении самопогасающих дуг на линиях 110 кВ с деревянными опорами.

В ряде случаев переходные сопротивления могут быть столь малы, что практически ими можно пренебречь. Такие замыкания называют металлическими.

Естественно, при прочих равных условиях ток при металлическом замыкании больше, чем при наличии

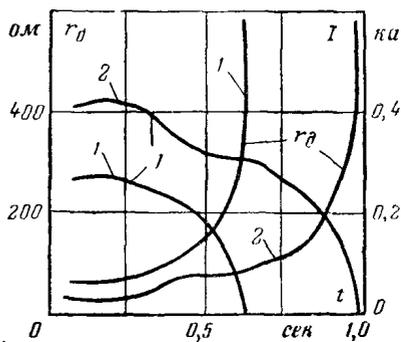


Рис. 1-1. Кривые изменения во времени тока и сопротивления самопогасающей открытой дуги на линии 110 кВ с деревянными опорами.

1, 2 — номера опытов.

переходного сопротивления. Поэтому, когда требуется найти возможные наибольшие величины токов, исходят из наиболее тяжелых условий, считая, что в месте замыкания отсутствуют какие-либо переходные сопротивления<sup>1</sup>.

В трехфазных системах с заземленной нейтралью различают следующие основные виды коротких замыканий в одной точке:

- а) трехфазное;
- б) двухфазное;
- в) однофазное;
- г) двухфазное на землю, т. е. замыкание между двумя фазами с одновременным замыканием той же точки на землю.

Трехфазное короткое замыкание является симметричным, так как при нем все фазы остаются в одинаковых условиях<sup>2</sup>. Напротив, все остальные виды коротких замыканий являются несимметричными, поскольку при каждом из них фазы находятся уже в неодинаковых условиях; поэтому системы токов и напряжений при этих видах короткого замыкания в той или иной мере искажены.

Многолетняя аварийная статистика по союзным и зарубежным системам показывает, что при глухозаземленной нейтрали относительная вероятность различных основных видов короткого замыкания характеризуется примерными данными табл. 1-1. В той же таблице показаны рекомендуемые сокращенные обозначения каждого вида короткого замыкания.

Как видно из этой таблицы, подавляющее число коротких замыканий связано с замыканием на землю, в то время как трехфазное короткое замыкание является очень редким. Однако отсюда было бы неправильным делать вывод, что трехфазное короткое замыкание можно вообще оставить без внимания. Поскольку оно все же возможно, с ним следует считаться, тем более что оно иногда может быть решающим для окончательного суждения относительно возможности работы в условиях короткого замыкания. Само изучение процесса трехфаз-

---

<sup>1</sup> Учет переходных сопротивлений и контактных соединений при выполнении расчетов коротких замыканий для установок напряжением до 1 000 в имеет особое значение (§ 17-5).

<sup>2</sup> При наличии переходных сопротивлений симметрия сохраняется лишь при равенстве этих сопротивлений.