

УДК 621.311.014.3

Переходные процессы в электроэнергетике

Журкевич В. В., Русецкий К. И.

Научный руководитель – к.т.н., доцент НОВАШ И. В.

При всяком изменении состояния электроэнергетической системы (ЭЭС) происходят переходные процессы. Под переходным процессом понимают процесс перехода от одного режима работы ЭЭС к другому, чем-либо отличающемуся от предыдущего.

Переходный процесс характеризуется изменением электромагнитного состояния элементов ЭЭС, напряжений, токов, мощностей, моментов, частоты, углов сдвига между ЭДС источников и напряжениями в разных узлах системы. Изменения состояния системы характеризуются нарушением баланса между электромагнитным и механическим моментами на валу каждой вращающейся машины. Вследствие относительно большой механической инерции вращающихся машин начальная стадия переходного процесса характеризуется преимущественно электромагнитными изменениями. При решении большинства практических задач переходный процесс принимают состоящим из ряда процессов, характеризующих изменение определенной группы параметров. В одну группу выделяют электромагнитные переходные процессы, в другую – электромеханические переходные процессы. Изучение переходных процессов дает: ясное представление о причинах возникновения и физической сущности явлений; знание основных математических выражений, описывающих эти явления, терминологии и определений; возможность использования практических критериев и методов их количественной оценки с целью прогнозирования и предотвращения опасных последствий этих процессов; навыки расчета переходных процессов.

Причины возникновения переходных процессов.

В общем случае в электрической цепи переходные процессы могут возникать, если в цепи имеются индуктивные и емкостные элементы, обладающие способностью накапливать или отдавать энергию магнитного или электрического поля. В момент коммутации, когда начинается переходный процесс, происходит перераспределение энергии между индуктивными, емкостными элементами цепи и внешними источниками энергии, подключенными к цепи. При этом часть энергии безвозвратно преобразуется в другие виды энергий (например, в тепловую на активном сопротивлении).

После окончания переходного процесса устанавливается новый установившийся режим, который определяется только внешними источниками энергии. При отключении внешних источников энергии переходный процесс может возникать за счет энергии электромагнитного поля, накопленной до начала переходного режима в индуктивных и емкостных элементах цепи.

Изменения энергии магнитного и электрического полей не могут происходить мгновенно, и, следовательно, не могут мгновенно протекать процессы в момент коммутации. В самом деле, скачкообразное (мгновенное) изменение энергии в индуктивном и емкостном элементе приводит к необходимости иметь бесконечно большие мощности $p = dW/dt$, что практически невозможно, ибо в реальных электрических цепях бесконечно большой мощности не существует.

Таким образом, переходные процессы не могут протекать мгновенно, так как невозможно в принципе мгновенно изменять энергию, накопленную в электромагнитном поле цепи. Теоретически переходные процессы заканчиваются за время $t \rightarrow \infty$. Практически же переходные процессы являются быстропротекающими, и их длительность обычно составляет доли секунды. Ток в индуктивности и напряжение на емкости не могут изменяться мгновенно. На этом основаны законы коммутации:

Первый закон коммутации состоит в том, что ток в ветви с индуктивным элементом в начальный момент времени после коммутации имеет то же значение, какое он имел непосредственно перед коммутацией, а затем с этого значения он начинает плавно

изменяться. Сказанное обычно записывают в виде $i_L(0_-) = i_L(0_+)$, считая, что коммутация происходит мгновенно в момент $t = 0$.

Второй закон коммутации состоит в том, что напряжение на емкостном элементе в начальный момент после коммутации имеет то же значение, какое оно имело непосредственно перед коммутацией, а затем с этого значения оно начинает плавно изменяться: $U_C(0_-) = U_C(0_+)$.

Следовательно, наличие ветви, содержащей индуктивность, в цепи, включаемой под напряжение, равносильно разрыву цепи в этом месте в момент коммутации, так как $i_L(0_-) = i_L(0_+)$. Наличие в цепи, включаемой под напряжение, ветви, содержащей разряженный конденсатор, равносильно короткому замыканию в этом месте в момент коммутации, так как $U_C(0_-) = U_C(0_+)$.

Переходные процессы в реальных электротехнических устройствах можно ускорять или замедлять путем подбора соответствующих параметров элементов цепей, а также за счет применения специальных устройств.

Математические основы анализа переходных процессов.

Задача исследования переходных процессов заключается в том, чтобы выяснить, по какому закону и как долго будет наблюдаться заметное отклонение токов в ветвях и напряжений на участках цепи от их установившихся значений. Так, например, если в исследуемой ветви некоторой цепи до коммутации существовал постоянный ток I_1 , а в установившемся режиме после коммутации он стал I_2 , то нас будет интересовать закон изменения переходного тока i между моментом коммутации ($t = 0$) и тем неизвестным нам моментом времени t_1 , когда переходный процесс можно считать закончившимся.

Анализ переходных процессов производят путем решения дифференциальных уравнений, составленных для исследуемой электрической цепи на основе законов Кирхгофа или метода контурных токов (рисунок 1).

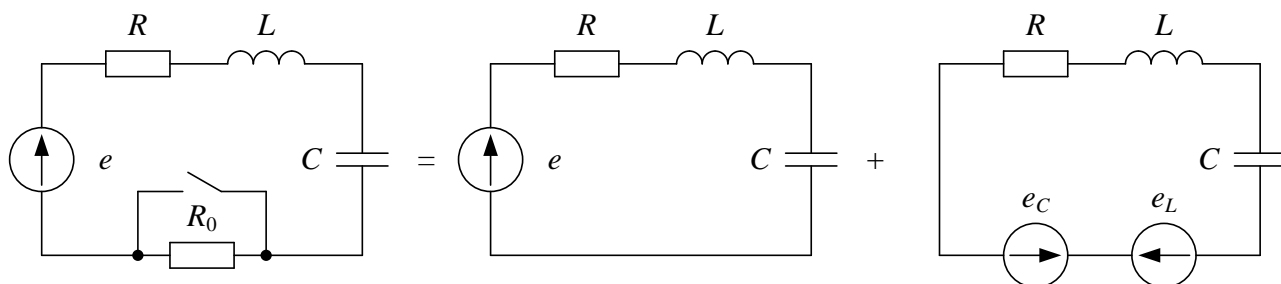


Рисунок 1

Поскольку в правой части дифференциальных уравнений, описывающих электрическое состояние цепей, обычно находится напряжение (или ток) источника (внешняя вынуждающая сила), то частное решение находят из анализа установившегося режима после коммутации. Отсюда этот режим называют **принужденным** и соответственно токи или напряжения, найденные в данном режиме, называют **принужденными**. Расчет принужденного режима, когда внешние источники вырабатывают постоянную или синусоидальную ЭДС (ток), не представляет трудностей и может быть осуществлен любым известным методом.

Однородное дифференциальное уравнение получают путем «освобождения» его от правой части. Физически это означает, что исследуемая цепь «освобождается» от внешней вынуждающей силы. Токи или напряжения, найденные при решении однородного дифференциального уравнения, называются **свободными**. Свободные токи и напряжения являются результатом действия внутренних источников схемы: ЭДС самоиндукции, возникающих в катушках, и напряжений на конденсаторах, когда и те, и другие не уравновешены внешними источниками.

Схематически анализ переходного процесса может быть представлен как результат наложения двух режимов: принужденного и свободного.

Заметим, что физически существует только переходные токи и напряжения, а разложение их на свободные и принужденные составляющие является математическим приемом, позволяющим упростить расчет переходных процессов в линейных цепях. Напомним, что принцип суперпозиции применим лишь к линейным цепям.

Существуют различные методы решения однородного дифференциального уравнения:

1. Классический метод анализа переходных процессов заключается в непосредственном интегрировании дифференциальных уравнений.
2. Классический метод анализа применяют обычно для анализа процессов в несложных электрических цепях.

Алгоритм расчета переходного процесса классическим методом.

Для анализа переходного процесса предварительно следует привести схему к минимальному числу накопителей энергии, исключив параллельные и последовательные соединения однотипных реактивных элементов (индуктивностей или емкостей). Система интегродифференциальных уравнений, составленных в соответствии с законами Кирхгофа или методом контурных токов, может быть сведена путем подстановки к одному дифференциальному уравнению, которое используется для составления характеристического уравнения.

Порядок дифференциального, следовательно, и характеристического уравнения зависит от числа реактивных элементов приведенной схемы. Главная трудность в решении задачи классическим методом для уравнений высоких порядков состоит в отыскании корней характеристического уравнения и постоянных интегрирования. Поэтому для решения уравнений порядка выше второго применяют другие методы, в частности операторный метод, основанный на применении преобразования Лапласа и исключающий трудоемкую процедуру отыскания постоянных интегрирования.