

КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧЕ 750 кВ

Представлена математична модель електромагнітних перехідних процесів в електричних системах, основана на використанні дискретних вузлових рівнянь в фазних координатах і неявних методів чисельного інтегрування, що дає можливість моделювати перехідні процеси при симетричних та несиметричних комутаціях і пошкодженнях в електричних мережах будь-якої конфігурації.

Представлена математическая модель электромагнитных переходных процессов в электрических системах, основанная на использовании дискретных узловых уравнений в фазных координатах и неявных методов численного интегрирования, позволяющая моделировать переходные процессы при симметричных и несимметричных, одноместных и многоместных коммутациях и повреждениях в электрических сетях произвольной конфигурации.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В условиях эксплуатации электрические сети подвержены целому ряду управляющих и возмущающих воздействий, в числе которых значительную долю составляют коммутации – плановые (включения, отключения) и аварийные (КЗ, отключения КЗ, АПВ, ОАПВ). Элементы системы характеризуются наличием электростатического и электромагнитного влияния, в связи с чем любой электрической системе потенциально присущи колебательные свойства, и все коммутации (плановые, аварийные, возмущающие) сопровождаются переходными процессами колебательного характера, в течение которых, при переходе от режима, предшествующего коммутации, к новому установившемуся напряжению и токи, как правило, превышают установившиеся значения. Коммутационные перенапряжения в переходных режимах, воздействующие на изоляцию, могут превышать допустимые значения и быть причиной повреждений элементов. Поэтому переходные процессы выдвигают целый ряд дополнительных, специфических требований к оборудованию, схемам и режимам электрических систем, и требуемые показатели функционирования могут быть обеспечены только на основе расчетов коммутационных перенапряжений с применением возможно более полных и точных математических моделей.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В учебной, научной и нормативной литературе [1, 2] для оценки максимальных напряжений переходного процесса при коммутациях пользуются выражениями следующего вида:

$$U_{\text{макс}} = K_{\text{уд}} \cdot U_{\text{уст}} = K_{\text{уд}} \cdot K_{\text{уст}} \cdot U_{\text{ф}} = K_{\text{п}} \cdot U_{\text{ф}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{уд}}$ – ударный коэффициент (отношение максимального напряжения переходного процесса к вынужденной составляющей), $K_{\text{уст}}$ – отношение вынужденной составляющей перенапряжения (установившегося режима) к рабочему напряжению. Коэффициентом

$$K_{\text{п}} = K_{\text{уд}} \cdot K_{\text{уст}} \quad (2)$$

определяется кратность коммутационных (внутренних) перенапряжений. Величина ударного коэффициента в (2) зависит от ряда факторов: частоты и декремента затухания свободных колебаний, начальных и

граничных условий, характеристик выключателей, выполняющих коммутации.

Выражения вида (1) для численных значений кратностей перенапряжений при применении к реальным схемам можно рассматривать как оценочные, так как они получены на основе аналитических решений, для простых схем (как правило, однофазных) и для конкретных видов коммутаций (включение, отключение фазы линии, отключение КЗ, отключение ненагруженного трансформатора и т. д.). При переходе к реальным системам к перечисленным факторам добавляется еще ряд факторов, не учитываемых в (2) и усложняющих задачу: более сложные схемы, наличие трех фаз, связанных взаимным влиянием, несимметрия как параметров элементов, так и параметров режима фаз.

Постановка задачи. Степень достоверности результатов моделирования зависит от того, насколько полно и правильно отражены свойства системы и ее элементов в соответствующих математических моделях. Поэтому разработку математических моделей электрических систем с многоместной несимметрией и в переходных режимах представляется целесообразным выполнять на основе уравнений в фазных координатах.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С НЕСИММЕТРИЕЙ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

На кафедре "Передача электрической энергии" НТУ "ХПИ" разработана такая модель [3], в основу которой положены следующие основные положения:

- Уровень декомпозиции. В качестве элементов сети рассматриваются не двухполюсники с параметрами R , L , C , а трехфазные многополюсники, параметрами которых являются матрицы $[R]$, $[L]$, $[C]$, отражающие параметры фаз и их взаимное влияние. Так, для участка трехфазной линии электропередачи уравнения в фазных координатах можно представить в виде

$$\begin{aligned} [L]_{ij}^F \frac{d}{dt} [i]_{ij}^F + [R]_{ij}^F [i]_{ij}^F &= [u]_i^F - [u]_j^F \\ [C]_{i0}^F [u]_i^F + [G]_{i0}^F [u]_i^F &= [i]_{i0}^F \end{aligned} \quad (3)$$

или, в форме Коши

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}[i]_{ij}^F &= [L]_{ij}^{F-1} [\Delta u]_{ij}^F - [L]_{ij}^{F-1} [R]_{ij}^F [i]_{ij}^F \\ \frac{d}{dt}[u]_i^F &= [C]_{i0}^{F-1} [i]_{i0}^F - [C]_{i0}^{F-1} [G]_{i0}^{F-1} [u]_i^F\end{aligned}\quad (4)$$

- Метод численного интегрирования дифференциальных уравнений переходных процессов. Переходные процессы в электрических системах с индуктивными и емкостными элементами характеризуются наличием колебательных составляющих с существенно различающимися постоянными времени, что может приводить к неустойчивости вычислительных процессов. Устойчивость вычислений достигается применением неявных методов интегрирования. Выполнив линейно-разностную аппроксимацию (4) и разрешив относительно токов фаз

$$\begin{aligned}[i]_{ij}^{(k+1)}, [i]_{i0}^{(k+1)}, \text{ получим} \\ [i]_{ij}^{(k+1)} = h([L]_{ij} + h[R]_{ij})^{-1} [\Delta u]_{ij}^{(k+1)} + ([L]_{ij} + h[R]_{ij})^{-1} [L]_{ij} [i]_{ij}^{(k)} \\ [i]_{i0}^{(k+1)} = \frac{1}{h} ([C]_{i0} + h[G]_{i0})^{-1} [u]_{i0}^{(k+1)} - \frac{1}{h} [C]_{i0} [u]_{i0}^{(k)}\end{aligned}\quad (5)$$

или, в более краткой форме,

$$\begin{aligned}[i]_{ij}^{(k+1)} &= [Y]_{ij} [\Delta u]_{ij}^{(k+1)} + [J]_{ij}^{(k)} \\ [i]_{i0}^{(k+1)} &= [Y]_{i0} [\Delta u]_{i0}^{(k+1)} + [J]_{i0}^{(k)},\end{aligned}\quad (6)$$

где $[Y]_{ij}, [Y]_{i0}$ - матрицы, определяемые соответственно продольными и поперечными параметрами участка трехфазной линии, $[J]_{ij}^{(k)}, [J]_{i0}^{(k)}$ - векторы, зависящие от токов индуктивных и напряжений емкостных ветвей, определяемые на предыдущем шаге интегрирования.

- Метод формирования систем дифференциальных уравнений. При включении в модель системы как индуктивных, так и емкостных элементов уравнения переходных процессов становятся интегродифференциальными, задачи составления уравнений и представления их в конечно-разностной форме усложняются. Преодоление сложности этого этапа моделирования обеспечивается тем, что в дискретной форме представляются сначала дифференциальные уравнения трехфазных многополюсников, а затем выполняется формирование системы конечно-разностных уравнений на шаге.

Составив уравнения баланса токов для всех независимых трехфазных узлов сети, получим систему уравнений

$$\begin{aligned}[y_{11}][u_1]^{k+1} + [y_{12}][u_2]^{k+1} + \dots + [y_{1i}][u_i]^{k+1} + \dots + [y_{1n}][u_n]^{k+1} &= [j_1]^k \\ [y_{21}][u_1]^{k+1} + [y_{22}][u_2]^{k+1} + \dots + [y_{2i}][u_i]^{k+1} + \dots + [y_{2n}][u_n]^{k+1} &= [j_2]^k \\ \dots &\dots \\ [y_{i1}][u_1]^{k+1} + [y_{i2}][u_2]^{k+1} + \dots + [y_{ii}][u_i]^{k+1} + \dots + [y_{in}][u_n]^{k+1} &= [j_i]^k \\ \dots &\dots \\ [y_{n1}][u_1]^{k+1} + [y_{n2}][u_2]^{k+1} + \dots + [y_{ni}][u_i]^{k+1} + \dots + [y_{nn}][u_n]^{k+1} &= [j_n]^k\end{aligned}\quad (7)$$

Элементы вектора-столбца $[J]^k$ в правой части полученной системы уравнений зависят от токов индуктивных и напряжений емкостных элементов на предыдущем (к-м) интервале времени и изменяются от шага к шагу. Элементы блоков матрицы $[y_{ij}]$ определяются параметрами R, L, G, C элементов системы и при постоянном шаге интегрирования остаются неиз-

менными. Решение системы (8) позволяет по параметрам режима схемы на предыдущем шаге определить параметры режима на очередном интервале времени.

- При математическом моделировании сложных систем трудоемкость работы по подготовке данных, расчету параметров элементов в фазных координатах, составлению систем уравнений соизмерима с трудоемкостью решения систем уравнений. Поэтому формализованные процедуры разработаны не только для решения систем дифференциальных уравнений, но и для расчета параметров элементов и формирования систем уравнений.

Расчет переходного процесса при использовании неявных методов и представлении трехфазных элементов на шаге интегрирования дискретными моделями (7) позволяет свести решение системы дифференциальных уравнений к многократному формированию и решению системы алгебраических уравнений.

Разработанная модель реализована в виде программы ANFAZ2 на языке программирования DELPHI для ПЭВМ, и предназначена для моделирования электромагнитных переходных процессов в электрических сетях уравнениями в фазных координатах. Программа позволяет на основе метода фазных координат выполнять расчеты переходных процессов при симметричных и несимметричных коммутациях в электрических сетях произвольной конфигурации и с несимметричными элементами с представлением результатов расчета как в графической (в виде кривых изменения токов и напряжений), так и в численной (в виде массивов) форме, как в точке повреждения, так и в любых других элементах электрической сети (токи в ветвях схемы), напряжения, емкостные и индуктивные токи в узлах.

С применением разработанной программы. выполнено исследование электромагнитных переходных процессов и сопровождающих их перенапряжений при коммутациях ВЛ 750 кВ Курская АЭС – ПС Североукраинская. Расчетная схема электропередачи, принятая в расчетах, представлена на рис. 1. Для определения напряжений в промежуточных точках ВЛ, она разбита на 24 участка длиной 8.1 км.

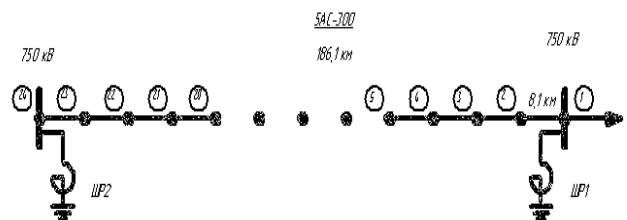


Рис. 1. Расчетная схема электропередачи

Характер переходных процессов и сопровождающих их перенапряжений при рассмотренных коммутациях (включении ВЛ на холостой ход, отключении фазы, ОАПВ) иллюстрируют цифрограммы, представленные на рис. 2 – 5.

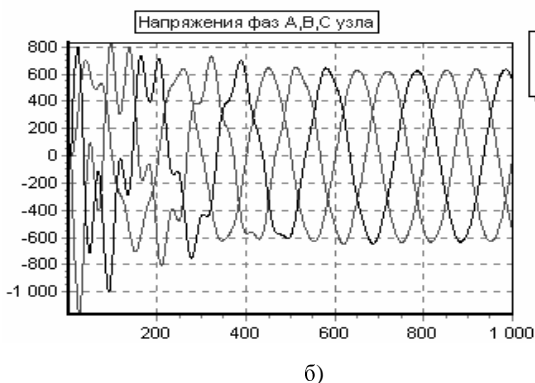
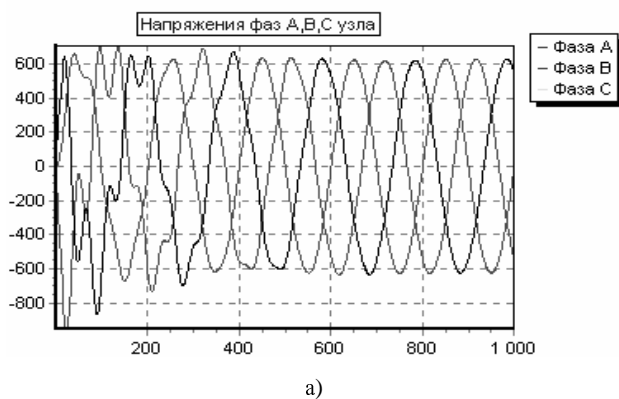


Рис. 2. Напряжения фаз в начале (а) и конце (б) ВЛ при включении на XX

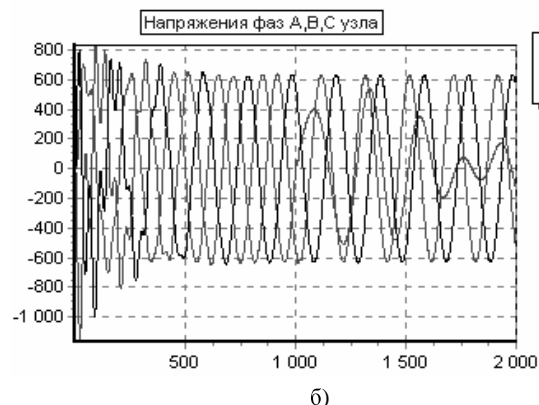
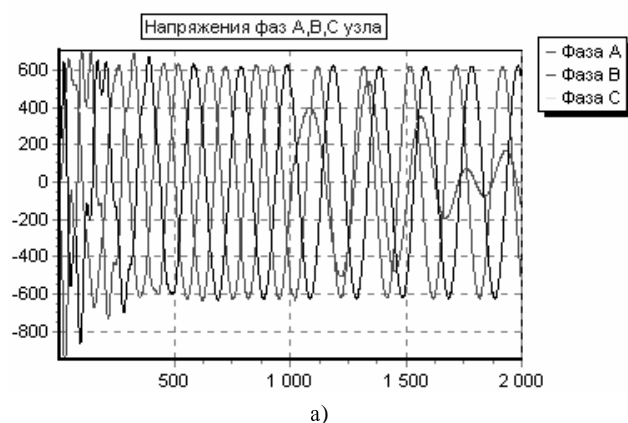


Рис. 3. Напряжения фаз в начале (а) и конце (б) ВЛ на XX при отключении фазы

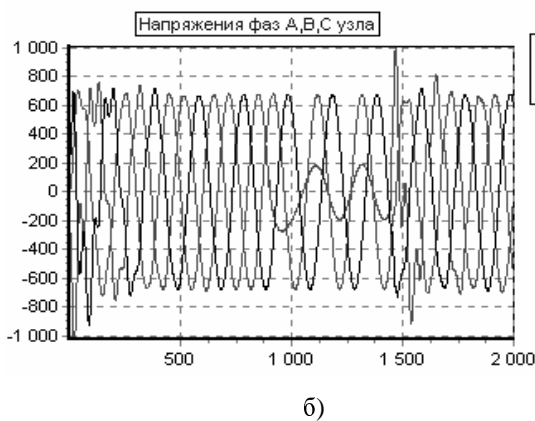
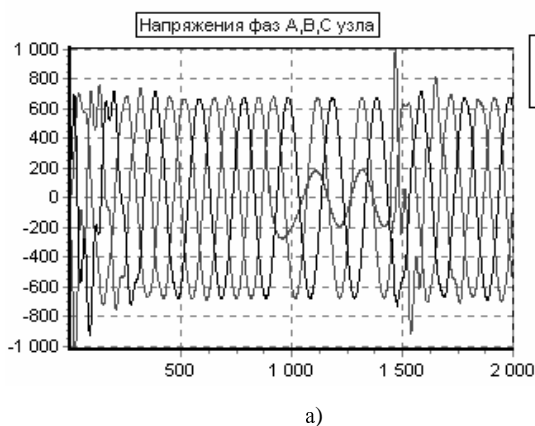


Рис. 4. Напряжения фаз в начале (а) и конце (б) ВЛ при ОАПВ (P=150 мВт)

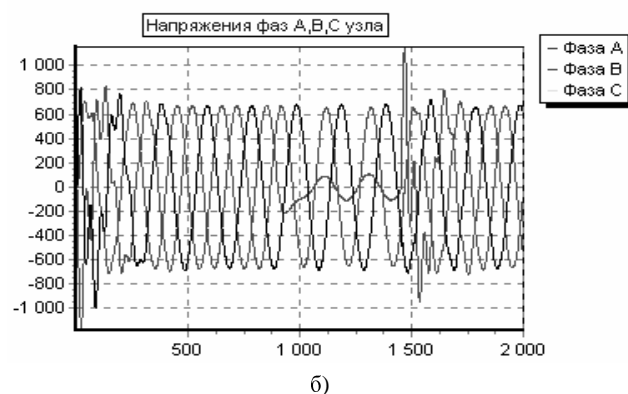
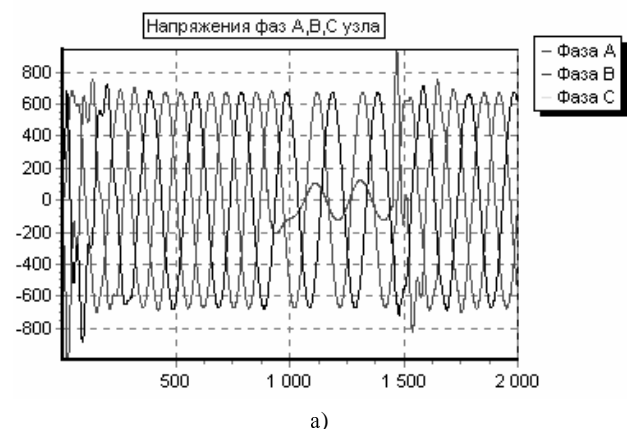


Рис. 5. Напряжения фаз в начале (а) и конце (б) ВЛ при ОАПВ (P=300 мВт)

На цифrogramмах напряжения фаз (кВ) представлены в зависимости от номера шага интегрирования, шаг интегрирования $h=0.0001$ с. Перенапряжения в цикле ОАПВ зависят от параметров ШР и электропередачи, от передаваемой мощности и параметров режима электропередачи в момент повторного включения. В расчетах электромагнитных переходных процессов, возникающих в цикле ОАПВ исследуемой электропередачи, варьировались передаваемая мощность и время бестоковой паузы.

Программа позволяет не только исследовать характер изменения мгновенных значений напряжений и токов $u(t)$, $i(t)$ в элементах сети, но и воспроизводить волновые процессы в электропередаче. На рис. 6 представлены цифrogramмы распространения волн напряжения фаз по участкам ВЛ (24 участка) с шагом по времени 0.0001 с. при включении ВЛ, из которых видно, что максимальные напряжения переходного процесса наступают в момент наложения падающей и отраженной волн в конце ВЛ.

ВЫВОДЫ

Приведенные результаты расчетов электромагнитных переходных процессов при рассмотренных вариантах коммутаций ВЛ показывают, что:

- разработанная модель электромагнитных переходных процессов в электрических системах, основанная на использовании дискретных узловых уравнений в фазных координатах и неявных методов численного интегрирования, позволяет моделировать переходные процессы при симметричных и несимметричных, одноместных и многоместных коммутациях и повреждениях в электрических сетях произвольной конфигурации;

- электромагнитные переходные процессы в электропередачах 750 кВ могут приводить к перенапряжениям, превышающим допустимые значения для электрооборудования ПС (силовых трансформаторов, шунтирующих реакторов), что может служить одной из причин высокой аварийности ШР;

- при включении ВЛ 750 кВ КАЭС-Североукраинская на холостой ход кратности перенапряжений в конце линии составляют 1.63-1.75;

- при отключении ненагруженной фазы перенапряжения в конце ВЛ имеют величину 1.63-1.64, под нагрузкой ($P=150$ мВт) – 1.31;

- перенапряжения в цикле ОАПВ зависят от передаваемой мощности и при $P=150$ мВт составляют 1.63, при $P=300$ мВт – 1.878;

- на ПС Североукраинская реакторное присоединение защищено разрядником с пробивным напряжением $2,1U_{\phi}$. Таким образом, разрядник РВМК-750 не срабатывает при перенапряжениях $1,878U_{\phi}$ в цикле ОАПВ, и изоляция шунтирующего реактора попадает под влияние перенапряжения $1,878U_{\phi}$, что может служить одной из причин аварийности ШР;

- для ограничения перенапряжений на шунтирующем реакторе целесообразно заменить защитные аппараты в цепях шунтирующих реакторов с РВМК-750 на ОПН-750, так как ограничитель перенапряжений ОПН-750 имеет уровень ограничения перенапряжений $1,8U_{\phi}$ вместо $2,1U_{\phi}$ у РВМК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов И.М. Богатенков, Г.М.. Иманов, В.Е. Кизеветтер и др.; Под ред. Г.С. Кучинского. – СПб: Изд. ПЭИПК 1998. – 700 с.: ил.;
2. Богатенков И.М., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Коммутационные перенапряжения / Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Электрические станции и сети. – 1990. – Том 16. – 114 с.
3. Веприк Ю.Н. Дискретная математическая модель электромагнитных переходных процессов в электрической сети // Вестник ХПИ. – 1992. – № 286. – С. 17-20.

Поступила 28.04.2009

Веприк Юрий Николаевич, к.т.н.,
Минченко Анатолий Андреевич, к.т.н.
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ",
кафедра "Передача электрической энергии"
тел. (057) 707-62-46