

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ НА НАПРЯЖЕНИЕ 330 кВ

А.А.Щерба, член-кор. НАН Украины, А.Д.Подольцев, докт.техн.наук, И.Н.Кучерявая, канд.техн.наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.  
e-mail: sh1ch@ied.org.ua

*В компьютерной среде Matlab/Simulink разработаны программные средства для моделирования переходных электромагнитных процессов в мощной электроэнергетической системе, содержащей сверхвысоковольтную кабельную линию со шито-полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ. Исследованы режимы однофазного и трехфазного короткого замыканий в кабельной линии и уровни перенапряжений на экранах кабелей в узлах их транспозиции. Библ. 6, рис. 11.*

**Ключевые слова:** высоковольтная кабельная линия, шито-полиэтиленовая изоляция, одно- и трехфазное короткое замыкание, транспозиция экранов, компьютерное моделирование.

**Введение.** Прогрессирующая тенденция замены воздушных линий электропередачи высоковольтными кабельными линиями (КЛ) в густонаселенных районах мегаполисов связана с более высоким уровнем надежности поставки электроэнергии потребителям, пониженными эксплуатационными затратами, сведением к минимуму визуального, шумового и электромагнитного загрязнения окружающей среды, а также с возможностью дополнительной застройки высвобождаемой территории.

На сегодняшний день в Украине впервые разработан и находится в стадии реализации проект кабельной линии электропередачи на напряжение 330 кВ (КЛ 330 кВ) с изоляцией из шитого полиэтилена для электроснабжения электросталелитейного комплекса завода "Днепросталь" [3]. Общая длина линии – около 13 км с переходами через пути Приднепровской железной дороги и реку Самара. Около двухсот раз кабельная линия пересекает другие инженерные сооружения – трамвайные пути, водо-, тепло- и газопроводы, воздушные и кабельные линии, линии связи и т.п. Надежность работы КЛ 330 кВ как уникального инженерного сооружения определяется, с одной стороны, высокими техническими характеристиками кабеля с полиэтиленовой изоляцией, на основе которого выполнена линия, с другой стороны, заложенными при ее проектировании схемно-конструктивными решениями (способом соединения экранов (транспозицией), способом их заземления, выбором длины участков транспозиции и др.), а также условиями эксплуатации кабельной линии и выбором средств защиты от перенапряжений и токов короткого замыкания в аварийных режимах работы.

Для решения вопросов безопасной работы КЛ 330 кВ, учитывая отсутствие отечественного опыта эксплуатации таких линий, целесообразно осуществлять оперативное моделирование переходных электромагнитных процессов для различных режимов работы, используя при этом современные вычислительные средства, в частности, пакет Matlab/Simulink.

Целью настоящей работы является разработка в среде Matlab/Simulink программных средств и методики численного расчета переходных электромагнитных процессов в спроектированной КЛ 330 кВ и выполнение анализа уровня напряжений на экранах и токов в жилах кабелей в режиме однофазного и трехфазного короткого замыканий.

**Описание конструкции КЛ 330 кВ и Simulink-модели кабельной линии.** КЛ 330 кВ спроектирована как двухцепная кабельная линия, каждая цепь которой состоит из трех однофазных кабелей с алюминиевой жилой сечением 800 мм<sup>2</sup>. На рис. 1 показана схема соединения экранов кабелей на трассе КЛ 330 кВ: крестиками обозначены места транспозиции экранов, кружками – муфты, соединяющие соседние участки кабелей без транспозиции; на вставке представлено расположение кабелей в двухцепной КЛ. Кабели прокладываются в траншее и располагаются по схеме "треугольник" с расстоянием между центрами жил, равным наружному диаметру кабеля (см. вставку рис. 1).

Кабельная линия протяженностью 13 км разбита на 8 участков, которые пронумерованы на рис. 1 внизу. На участках 1 и 8 экраны кабелей заземлены с одного конца, а для уменьшения напряжения на разземленном конце экрана проложен дополнительный "земляной" провод. На участках 2–4 выполнялась транспозиция экранов кабелей так же, как и на участках 5–7. Длина участка транспозиции (около 2000 м) выбиралась из условия, чтобы в режиме однофазного КЗ напряжение на экране по отношению к земле не превышало 3,5 кВ, что составляет величину 0,7 напряжения испытания экранов, равного 5 кВ.

Для более детального анализа электромагнитных процессов в кабельной линии КЛ 330 кВ в данной работе разработана Simulink-модель энергосистемы 350 МВА, 330 кВ с этой кабельной линией. Модель, показанная на рис. 2, содержит следующие основные элементы (слева направо):

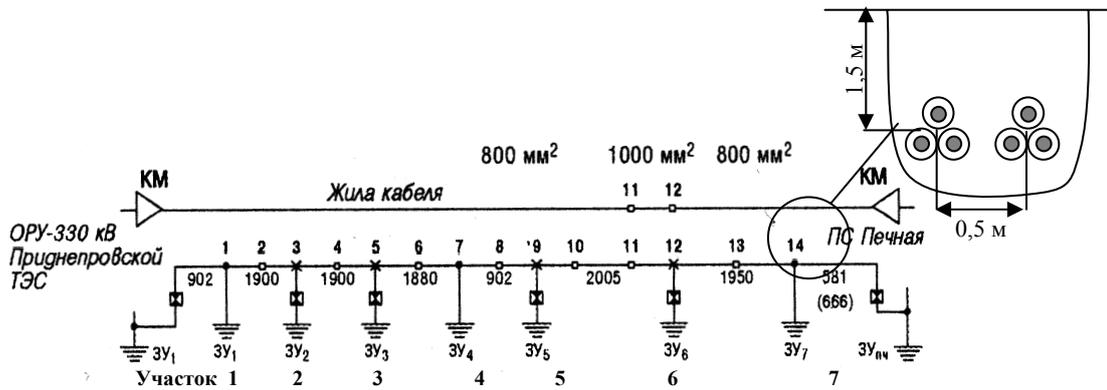


Рис. 1

- источник трехфазного напряжения с глухозаземленной нейтралью (сопротивление заземления 10 Ом) с линейным напряжением 330 кВ;
- трехфазный блок, задающий эквивалентные внутренние параметры источника и линии электропередачи на участке от источника до КЛ;
- непосредственно модель КЛ 330 кВ, которая состоит из 8 участков разной длины (длины участков в метрах показаны на рис. 1), соединенных по схеме транспозиции экранов; каждый из участков моделируется в виде эквивалентного 12-и полюсника (три жилы и три экрана);
- на выходе КЛ расположен блок моделирования одно- или трехфазного КЗ на землю, а также блок активной трехфазной нагрузки, выбираемой так, чтобы номинальный ток в жилах кабелей

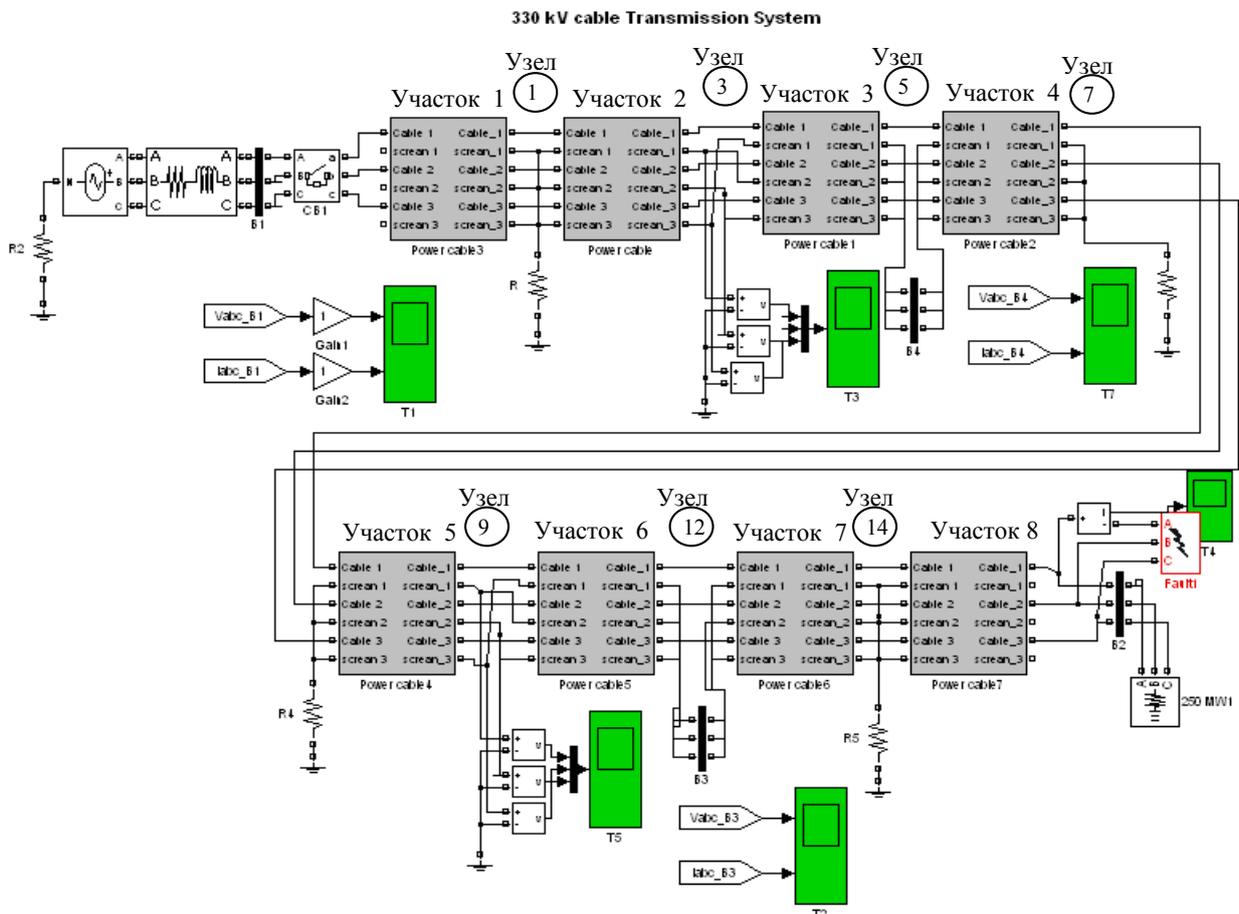


Рис. 2.

составлял 600 А;

— средства визуализации токов и напряжений в основных узлах КЛ, представленные с помощью осциллографов и трехфазных измерителей.

При моделировании КЛ рассматривалась как одноцепная линия. Геометрические размеры кабеля приведены в [3]. Для расчета электромагнитных параметров кабелей в КЛ использовались результаты работ [1, 2, 4–6].

**Включение КЛ в режиме без нагрузки (на холостом ходу).** Компьютерные осциллограммы напряжения и тока на входе КЛ в режиме включения линии без нагрузки показаны на рис. 3, а. Напряжение представлено в относительных единицах в долях от  $U_{\phi, \max} = 330\sqrt{2/3}$  кВ. Как видно из этих осциллограмм, за несколько периодов происходит переходный процесс, в течение которого заряжаются все емкостные и индуктивные элементы линии. Относительное значение броска напряжения при этом составляет 1,8, а бросок тока достигает 800 А при номинальном токе под нагрузкой 600 А (действующее значение). Установившееся значение тока составляет 200 А (амплитудное значение).

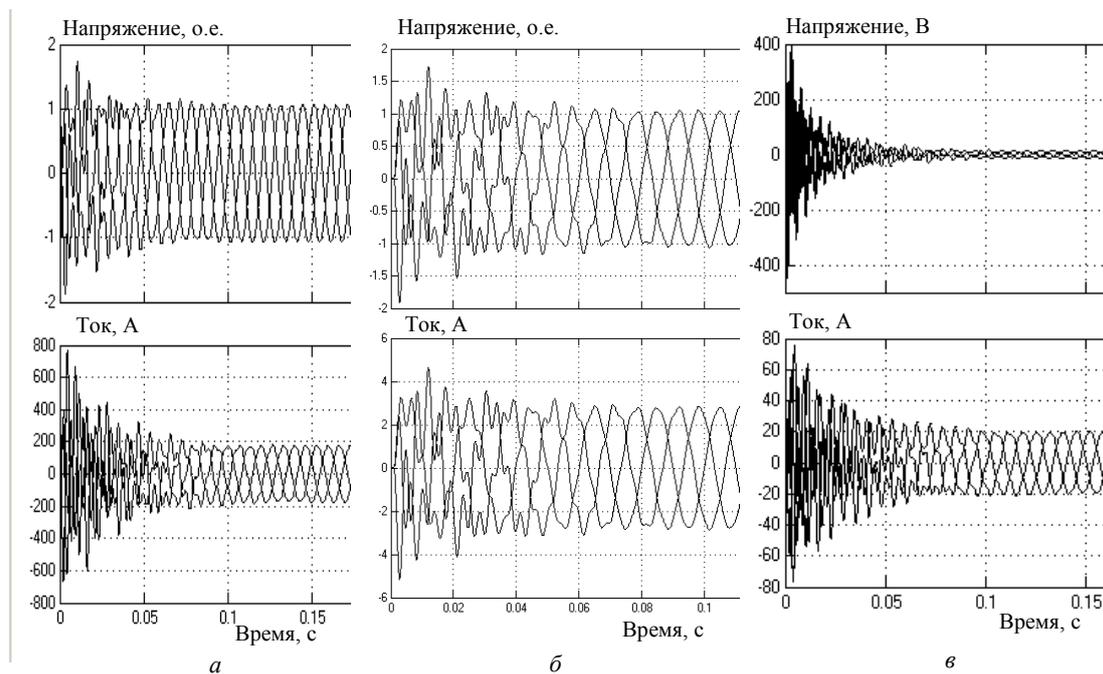


Рис. 3.

Такая довольно большая величина тока представляет собой емкостной ток, который течет по жиле каждого кабеля, затем по его экрану и замыкается на землю.

Компьютерные осциллограммы напряжения и тока на выходе КЛ в режиме включения линии без нагрузки показаны на рис. 3, б. Видно, что напряжение на выходе приблизительно равно напряжению на входе, т.е. емкостной эффект Ферранти, приводящий к повышению напряжения холостого хода на выходе КЛ при заданной длине линии 13 км, практически не проявляется. Величина тока на выходе КЛ составляет несколько ампер, что подтверждает тот факт, что весь ток, поступивший на вход линии, замыкается на землю по емкостным цепям линии.

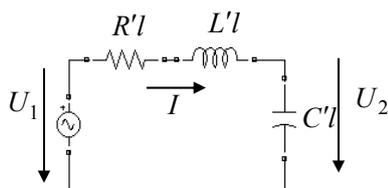


Рис. 4.

Как видно из рис. 3, в, токи и напряжения в экранах кабелей в узле транспозиции 5 (рис. 2) имеют малые значения как в начальный момент времени, так и в установившемся режиме.

Для более детального исследования емкостного эффекта Ферранти применительно к данной кабельной линии рассмотрим упрощенную схему замещения одной ее фазы, показанную на рис. 4. Здесь  $R', L', C'$  – погонные параметры линии (на единицу длины),  $l$  – длина линии. Полагая  $R' = 9 \cdot 10^{-5}$  Ом/м,  $L' = 0,22 \cdot 10^{-5}$  Гн/м,  $C' = 1,6 \cdot 10^{-10}$

Ф/м, исследуем зависимость напряжения на выходе линии  $U_2/U_1$  и тока в линии  $I$  от ее длины в режиме холостого хода. Результаты расчетов показаны на рис. 5. Видно, что возрастание напряжения на

выходе линии  $U_2/U_1$  начинает проявляться при длине линии более 50 км (рис. 5, а). При длине 160 км на промышленной частоте 50 Гц имеет место резонанс, в случае которого кратность напряжения на выходе достигает 8. С ростом длины линии растет величина тока холостого хода (рис. 5, б). При длине, равной 13 км, величина тока составляет около 140 А (действующее значение), что соответствует значению тока, полученному с помощью Simulink-модели (см. рис. 3, а). При длине линии 50 км величина тока становится равной номинальному току под нагрузкой – 600 А. Очевидно, что в этом случае необходимо использовать шунтирующие реакторы, устанавливаемые вдоль линии для компенсации реактивной мощности и снижения напряжения на выходе. В точке резонанса при длине 160 км величина тока значительно превышает предельно допустимые значения по тепловым нагрузкам.

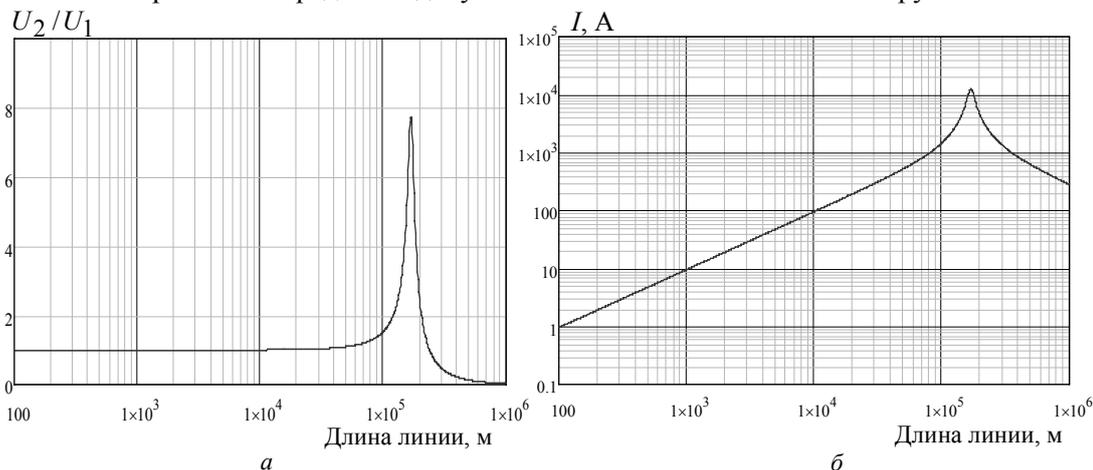


Рис. 5.

**КЛ в режиме однофазного короткого замыкания в нагрузке.** При расчете КЛ в режиме однофазного КЗ полагается, что линия работает на номинальную активную нагрузку с линейным током 600 А, и в момент времени  $t = 0,5$  с в фазе  $A$  нагрузки происходит замыкание на землю через сопротивление 10 Ом, а при  $t = 1$  с цепь размыкается, и система возвращается в нормальный режим работы. Результаты расчетов для этого режима показаны на рис. 6–8: рис. 6 – компьютерные осциллограммы напряжения и тока на входе в КЛ, рис. 7 – осциллограммы напряжения и тока в экранах кабелей в узлах 5 и 12, рис. 8 – осциллограмма напряжения на разземленном экране участка 1 кабельной линии. На основании данных этих рисунков можно заключить следующее.

- Величина тока однофазного КЗ в фазе  $A$  достигает амплитудного значения 4 кА при броске тока в начальный момент 5 кА (рис. 6). Величина напряжения в этой фазе при этом несколько снижается

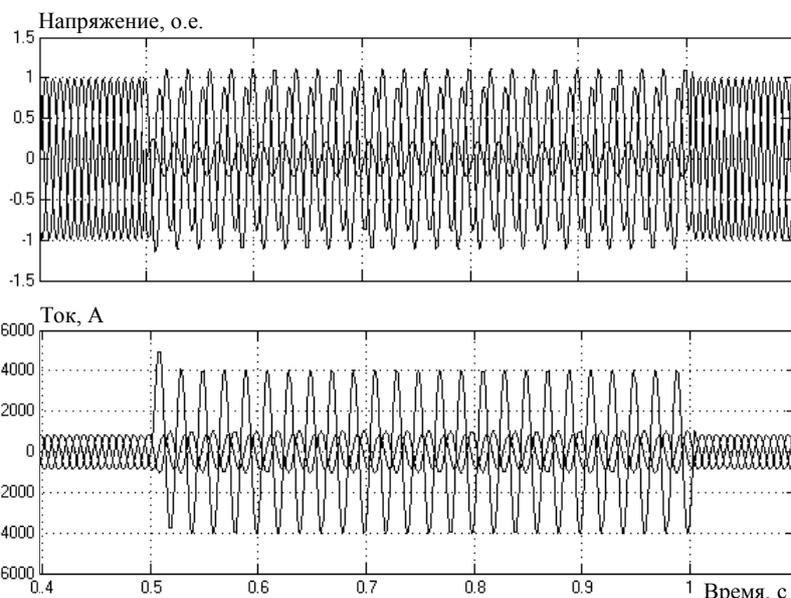


Рис. 6.

из-за падения напряжения на источнике и подводящей линии.

- Напряжение на экранах кабелей в узлах их транспозиции согласно рис. 7 не превышает предельно-допустимого значения, составляющего 3,5 кВ [3].

- Величина токов в экранах кабелей в узле 12 выше, чем токов в узле 5, что связано с разной длиной участков транспозиции 5, 6 и 7 (обозначения участков и узлов даны на рис. 2). Именно различие длин участков обуславливает неполную компенсацию токов в экранах из-за их транспозиции.

- На участках кабелей на входе и выходе линии (участки 1 и 8), экраны кабелей заземлены

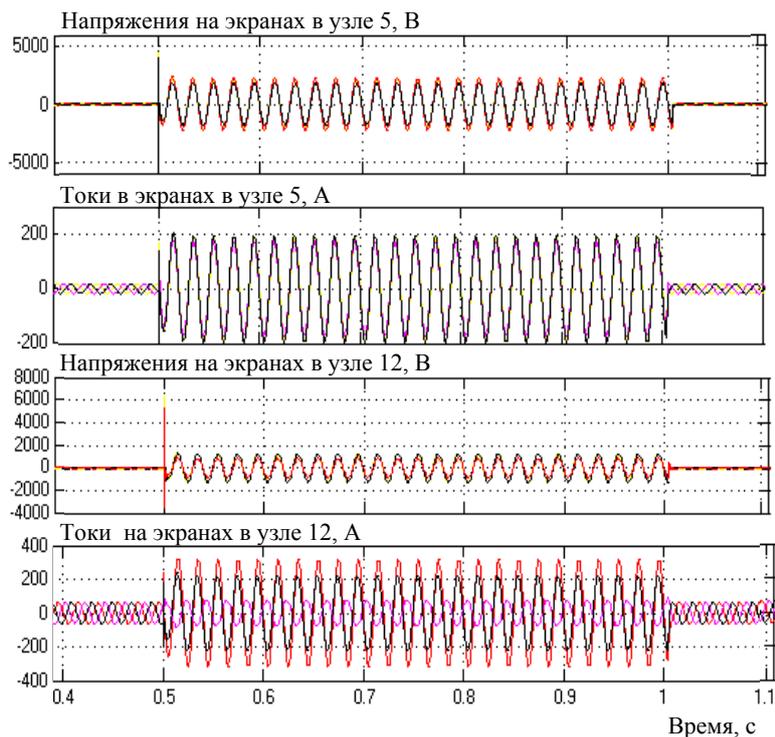


Рис. 7

каются. Результаты расчетов для этого режима показаны на рис. 9–11: рис. 9 – компьютерные осциллограммы напряжения и тока на входе в КЛ, рис. 10 – осциллограммы напряжения и тока в экранах кабелей в узлах 5 и 12, рис. 11 – осциллограмма напряжения на разземленном экране участка I кабельной линии. Эти данные позволяют заключить следующее.

- Режим трехфазного КЗ характеризуется более высокими значениями токов в жилах кабелей, чем при однофазном КЗ (рис. 9, б), которые равны приблизительно 5 кА, при броске тока в первый момент – 7,5 кА.

- Величина напряжения на входе линии в момент КЗ имеет значительную высокочастотную составляющую и за доли секунды напряжение снижается практически до нуля (рис. 9, а). Возникновение такого высокочастотного напряжения может приводить к ускоренному старению полимерной изоляции кабеля на входе (в силу того, что роль полупроводящих слоев в кабеле при таком высокочастотном напряжении резко снижается), а также к возможному повреждению оборудования, размещенного на входе кабельной линии (реакторов, трансформаторов и др.). Для защиты от такого вида воздействия могут использоваться RC-цепочки, устанавливаемые на входе КЛ.

- Несмотря на большие значения токов в жилах в режиме трехфазного КЗ, напряжение на экранах кабелей в узлах их транспозиции характеризуется меньшими значениями, чем при однофазном КЗ (рис. 10). Это связано с близким расположением трех кабелей и наличием сильной индуктивной связи экранов со всеми тремя жилами.

- На участках кабелей на входе и выходе линии (участки I и 8), заземленных только с одного конца, возникающее в этом режиме напряжение также значительно меньше, чем при однофазном КЗ –

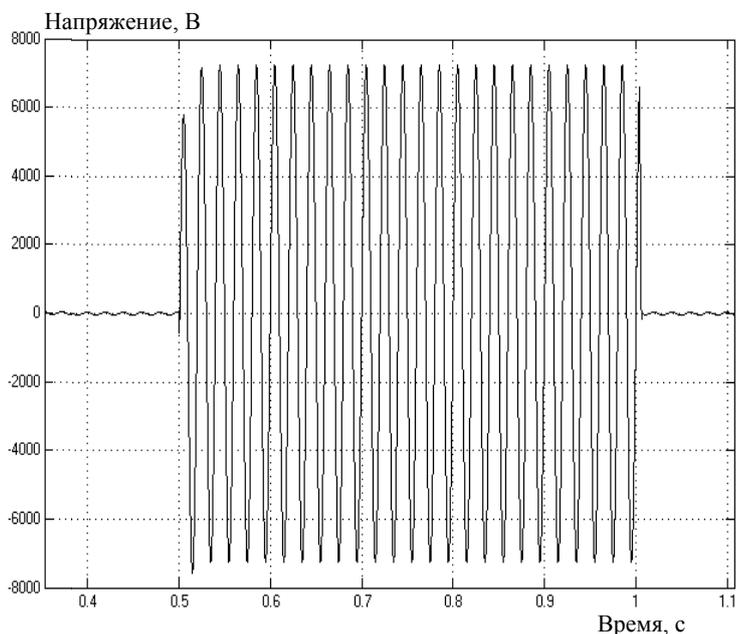


Рис. 8

только с одного конца. При этом на другом разземленном конце экранов возникает опасное перенапряжение, которое согласно данным рис. 8 составляет 7,3 кВ при допустимом значении 3,5 кВ. Для снижения этого напряжения в кабельном проекте используется дополнительно проложенный "земляной" провод. Эффективность применения такого конструктивного решения требует дополнительного исследования, которое может быть проведено с помощью разработанной программы.

**КЛ в режиме трехфазного короткого замыкания в нагрузке.** При расчете КЛ в режиме трехфазного КЗ полагается, что линия работает на номинальную активную нагрузку с линейным током 600 А, в момент  $t = 0,5$  с фазы А, В и С нагрузки замыкаются на землю, каждая через сопротивление 10 Ом, а в момент времени  $t = 1$  с цепи размы-

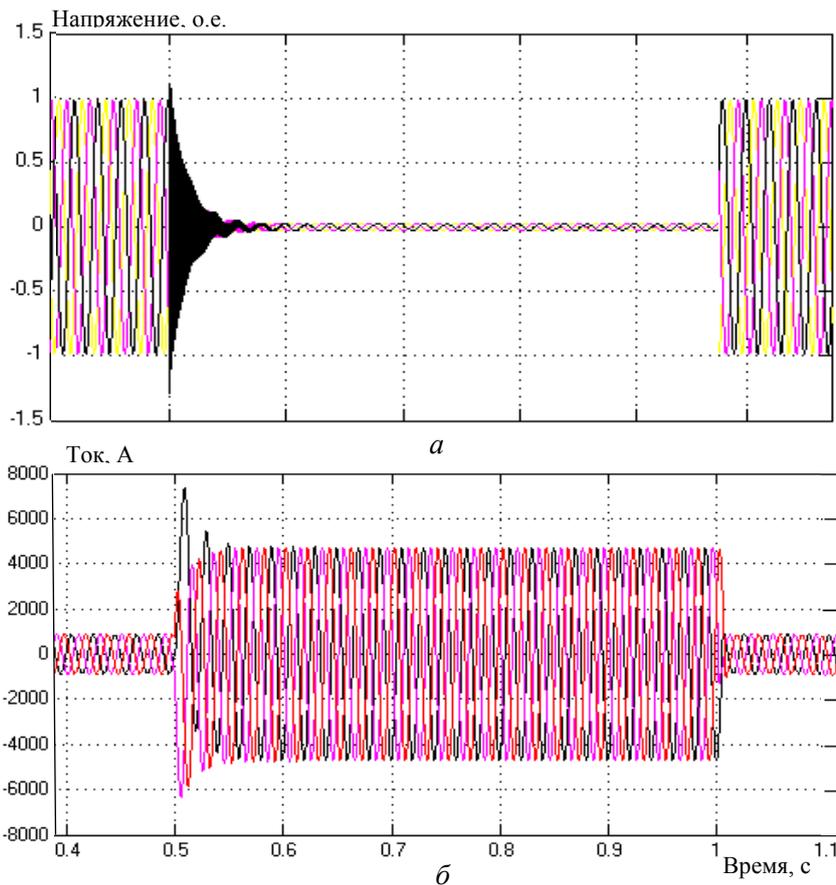


Рис. 9

сшито-полиэтиленовой изоляцией. Проведены расчеты конкретной кабельной линии на 330 кВ протяженностью 13 км, впервые проложенной в Украине для электроснабжения электросталелитейного комплекса завода "Днепросталь". Основные выводы работы сводятся к следующему.

Из сравнения режимов однофазного и трехфазного короткого замыканий следует, что хотя токи в жилах кабелей в режиме трехфазного КЗ выше, чем в режиме однофазного КЗ, напряжения на экранах кабелей в зоне транспозиции выше при однофазном КЗ. При длине участков транспозиции около 2000 м величина этого напряжения не превышает допустимого значения 3,5 кВ.

На участках кабелей, расположенных в начале и в конце линии и имеющих заземленные экраны только с одного конца, в режиме однофазного КЗ возникают опасные перенапряжения до 7,3 кВ, которые превышают допустимые значения. Для снижения этих перенапряжений в реализованном кабельном проекте используется дополнительно проложенный "земляной" провод, эффективность применения которого требует проведения дополнительных исследований.

В режиме трехфазного КЗ на входе кабельной линии на жилах кабелей возникают опасные высокочастотные напряжения, которые могут приводить к ускоренному ста-

это видно из сравнения рис. 8 и 11. Из сравнительного анализа режимов однофазного и трехфазного КЗ следует, что с точки зрения выбора длины участков транспозиции экранов кабелей, необходимо рассматривать как более опасный режим однофазного КЗ. Для ограничения перенапряжений на экранах кабелей в обоих режимах КЗ необходимо в узлах транспозиции экранов устанавливать нелинейные ограничители перенапряжения (ОПН). Моделирование переходных процессов с учетом ОПН, а также расчет энергии, которая рассеивается в них в различных режимах работы энергосистемы, также могут быть выполнены с помощью данной программы.

**Заключение.** В компьютерной среде Matlab/Simulink разработаны программные средства для моделирования переходных электромагнитных процессов в мощной электроэнергетической системе, содержащей сверхвысокоточную кабельную линию со

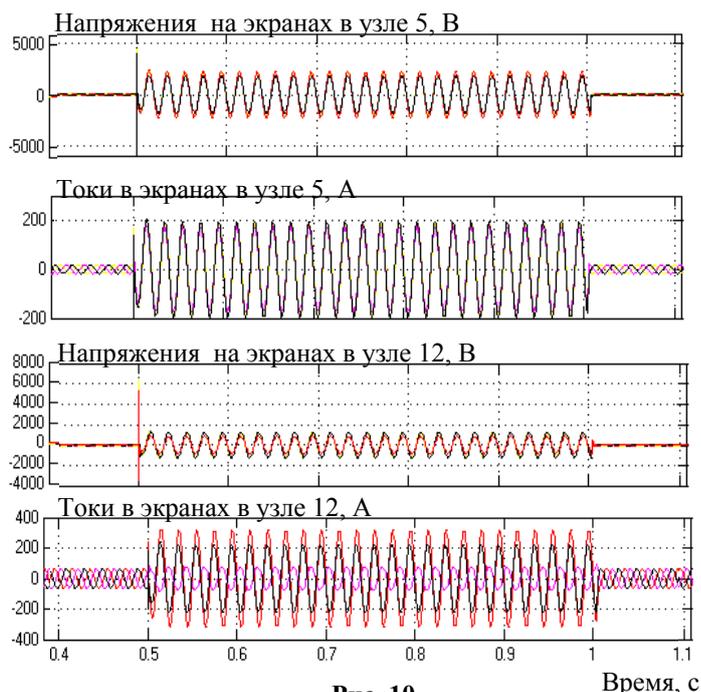


Рис. 10

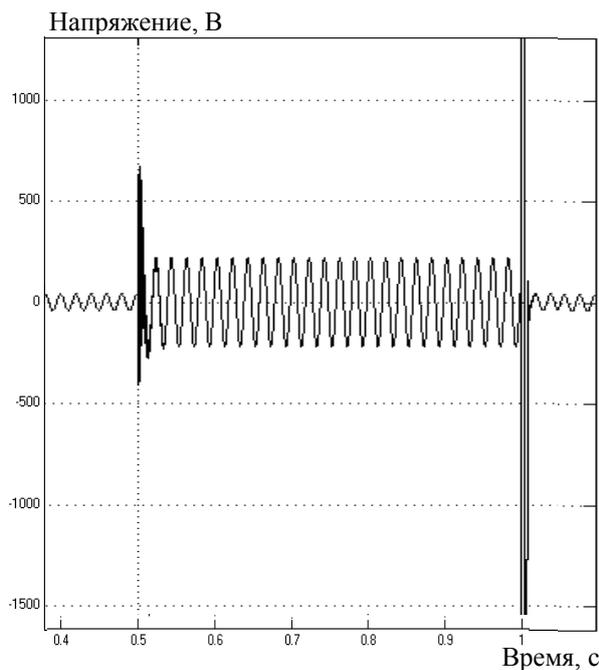


Рис. 11

4. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Золотарев В.М. Импульсный ток в полиэтиленовой изоляции с воздушным включением при возникновении частичного разряда // Техн. электродинамика. – 2009. – № 2. – С. 7–12.
5. Tleis N. Power systems modelling and fault analysis. – Elsevier, 2008. – 367 p.
6. Wedepohl L.M. Wilcox D. J. Transient analysis of underground power-transmission system – system model and wave propagation characteristics // Proceedings of IEE. – 1973. – Vol. 120. – No. 2. – Pp. 253–260.

УДК 621.315.2:004.94

#### ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ У КАБЕЛЬНІЙ ЛІНІЇ З ПОЛІЕТИЛЕНОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ НА НАПРУГУ 330 кВ

А.А.Щерба, член-кор. НАН України, О.Д.Подольцев, докт.техн.наук, І.М.Кучерява, канд.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

У комп'ютерному середовищі Matlab/Simulink розроблено програмні засоби для моделювання перехідних електромагнітних процесів у потужній електроенергетичній системі, що містить надвисоковольтну кабельну лінію із зшито-поліетиленовою ізоляцією на напругу 330 кВ. Досліджено режими однофазного і трифазного короткого замикання в кабельній лінії та рівні перенапружень на екранах кабелів у вузлах їхніх транспозицій. Бібл. 6, рис. 11.

**Ключові слова:** високовольтна кабельна лінія, зшито-поліетиленова ізоляція, одно- і трифазне коротке замикання, транспозиція екранів, комп'ютерне моделювання.

#### ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN 330 KV CABLE LINE WITH POLYETHYLENE INSULATION

A.A.Shcherba, O.D.Podoltsev, I.M.Kucheriava,

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

In computing environment of Matlab/Simulink, the software for modeling of transient electromagnetic processes in high-powered energy system that contains extra-high voltage (330 kV) cable line with cross-linked polyethylene insulation is developed. The working conditions of single-phase and three-phase sort circuit in the cable line as well as the overvoltages in cable screens that take place in screen transposition nodes are studied. References 6, figures 11.

**Key words:** high-voltage cable line, cross-linked polyethylene insulation, single-phase and three-phase short circuit, transposition of screens, computer modeling.

1. Zolotarev V.M., Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriava I.N. Analysis of high-frequency processes in a cable of 330 kV with a segmented cable cord at initiation of partial discharges in a cable insulation // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – № 2. – Pp. 3–11. (Rus)
2. Kadomskaja K.P. Electromagnetic processes in high-voltage cable line. – Novosibirsk: Izdatelstvo NGTU, 1997. – 141 p. (Rus)
3. Liakh V.V., Molchanov V.M., Sudakova I.V. 330 kV cable line – a new stage in development of power networks in Ukraine // Elektricheskie seti i sistemy. – 2009. – № 3. – Pp. 16–21. (Rus)
4. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Zolotarev V.M. Pulse current in polyethylene insulation with air inclusion at initiation of partial discharge // Tekhnichna elektrodynamika. – 2009. – № 2. – Pp. 7–12. (Rus)
5. Tleis N. Power systems modelling and fault analysis. – Elsevier, 2008. – 367 p.
6. Wedepohl L.M. Wilcox D.J. Transient analysis of underground power-transmission system – system model and wave propagation characteristics // Proceedings of IEE. – 1973. – Vol. 120. – No. 2. – Pp. 253–260.

Надійшла 15.06.2012

Received 15.06.2012

ренію ізоляції кабелю, а також к поврєдженню оборування, размещенного на входе кабельной линии. Для защиты от такого вида воздействия могут использоваться RC-цепочки.

Разработанные программные средства позволяют анализировать различные режимы работы сложных энергетических систем с кабельными линиями, а на этапе их проектирования выбирать как рациональные схемно-конструктивные решения, так и необходимое оборудование для защиты линии в аварийных режимах работы.

1. Золотарев В.М., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Анализ высокочастотных процессов в кабеле на напряжение 330 кВ с сегментированной жилой при возникновении частичных разрядов в его изоляции // Техн. электродинамика. – 2010. – № 2. – С. 3–11.

2. Кадомская К.П. Электромагнитные процессы в кабельных линиях высокого напряжения. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1997. – 141 с.

3. Лях В.В., Молчанов В.М., Судакова И.В. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины // Электрические сети и системы. – 2009. – № 3. – С. 16–21.