

5. Description of systems, equipment and facilities important to safety of NPP. Safety Analysis Report. Technical safety justification of NPP construction and operation, book 5 – Khmel'nitsky NPP unit № 1 : 43-930.203.035.OB05. – 252 p.

6. Nuclear safety analysis of nuclear fuel storage systems for ukrainian NPP with WWER reactors : SNUNEI collection of scientific papers – Sevastopol – 2010. – pp. 14–23.

Надійшла 11.10.2013

Received 11.10.2013

УДК 621.311

Н.В. Буслова, канд. техн. наук, доцент; А.В. Гайдук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕСТИРОВАНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМ ДЕФЕКТОМ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

*Рассмотрен современный метод диагностики кабельных линий электропередачи - метод импульсной рефлектометрии. Проанализирована реакция измеряемой линии с сосредоточенным дефектом на зондирующее воздействие.*

*Цель исследования: увеличение уровня эксплуатационной надежности существующих кабельных линий посредством использования эффективных методов диагностики.*

*Методика реализации: внедрение рефлектометрического оборудования, предназначенного для качественного обслуживания и ремонта кабельных линий.*

*Результаты исследований: представлена математическая модель, позволяющая моделировать процессы в реальных кабельных линиях при их диагностике методом импульсной рефлектометрии.*

*Выводы: использование импульсной рефлектометрии позволяет увеличить срок службы кабельных линий сверх нормативных сроков и с большей экономией затрат обеспечить их техническое обслуживание и ремонт.*

**Ключевые слова:** диагностика, импульсная рефлектометрия, надежность, кабельная линия, техническое обслуживание.

В современных условиях развития промышленности возрастает роль кабельных линий (КЛ) в сетях связи и системах электроснабжения потребителей. К сожалению, в настоящее время часть ведомственных КЛ на 50-80% морально и физически изношены [1], что является одной из главных причин их аварийных отказов. Предприятиям электрических сетей, имеющим разветвленные и разбросанные по всему городу и за его пределами сети связи и электроснабжения, необходимо иметь как универсальное техническое оснащение, так и квалифицированный персонал. В техническом плане в структуре такого предприятия должно быть специализированное подразделение, например, лаборатория, в которой сконцентрировано необходимое для диагностики и испытания оборудование, предназначенное для качественного обслуживания и ремонта любой КЛ передачи: как КЛ электропередачи напряжением 6-10 кВ, так и симметричного или коаксиального кабеля связи (КС). Известно, что запас прочности КЛ рассчитывается на стадии проектирования, а при их изготовлении его величина принимает конкретное значение. Это и определяет уровень надежности работы КЛ в условиях эксплуатации.

Увеличение уровня эксплуатационной надежности КЛ можно достигнуть совершенствованием технологии производства, применением новых изоляционных материалов, конструкций и оболочек кабелей. Создать абсолютно надежное кабельное изделие невозможно. Тем самым, основной задачей при эксплуатации КЛ является сохранение его запаса прочности или поддержание уровня надежности, заложенной заводом-изготовителем на рассчитываемый срок.

В реальных условиях эксплуатации на уровень эксплуатационной надежности КЛ воздействует множество разрушающих факторов, что ведет к снижению их надежности. Для сохранения нормативного ресурса или для повышения эксплуатационной надежности КС и КЛ электропередачи

напряжением 6-10 кВ до требуемого уровня используются различные мероприятия. К ним можно отнести: создание защитных кабельных сооружений (кабельная канализация и траншея, туннели и каналы, кабельные эстакады и шахты и т.д.); повышение квалификации обслуживающего персонала; повышение технической оснащенности служб, занимающихся профилактикой, монтажом и ремонтом КЛ.

Несмотря на это, все перечисленные мероприятия не исключают возможности возникновения отказов КЛ из-за старения изоляции и возможного наличия в них заводских дефектов, так как при серийном производстве и массовом применении кабелей повышается вероятность появления в их изоляции дефектов из-за разного рода ошибок, возникающих в процессе их изготовления, транспортировки, монтажа, во время эксплуатации. Тем самым, чтобы существенно снизить вероятность аварийного повреждения изоляции КЛ электропередачи напряжением 6-10 кВ, используется система контроля их состояния.

Если анализировать статистику отказов КЛ электропередачи различных напряжений и степень их влияния на возникающие убытки, то наибольшие убытки возникают при отказах КЛ электропередачи напряжением 6-10 кВ, на которые приходится более 70 % всех нарушений электроснабжения потребителей [2].

Одним из вариантов решения этой проблемы является замена КЛ, выработавших свой ресурс, но замена всех КЛ в течение двух или трех лет потребует больших финансовых затрат. Следовательно, замену необходимо производить постепенно в течение 10-15 лет. Тогда возникает вопрос о надежности существующих КЛ, их ресурсе для дальнейшей работы.

Выходом из этого положения является совершенствование методов диагностики, которые позволят классифицировать КЛ по их остаточному ресурсу и создать план постепенной замены старых кабелей, что может реально увеличить срок службы КЛ сверх нормативных сроков и с большей экономией затрат обеспечит их техническое обслуживание и ремонт.

Одним из таких методов является рассматриваемый метод импульсной рефлектометрии.

Импульсная рефлектометрия – это область измерительной техники, которая основывается на получении информации об измеряемой линии по анализу её реакции на зондирующее (возмущающее) воздействие. Импульсная рефлектометрия может быть применена как для силовых кабелей всех типов, так и для волоконно-оптических кабелей связи. Метод импульсной рефлектометрии позволяет определить зону повреждения (в пределах погрешности измерения) и применить отдельные трассовые методы на небольших участках трассы, что позволяет существенно сократить время точного определения места дефекта.

Составим математическую модель обобщенной кабельной линии с сосредоточенным дефектом[3].

Рассмотрим двухпроводную линию с распределенными параметрами  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$  длиной  $l$ , разомкнутой на конце. На расстоянии  $l_1$ , от начала линии существует некоторый дефект, имеющий сосредоточенный характер, который описывается четырехполосником с известными А-параметрами. В некоторый момент времени, принимаемый нами за нулевой отсчет, на входе линии начинает действовать источник ЭДС, описываемый функцией  $p(t)$ , его внутреннее сопротивление равно волновому (рис.1)

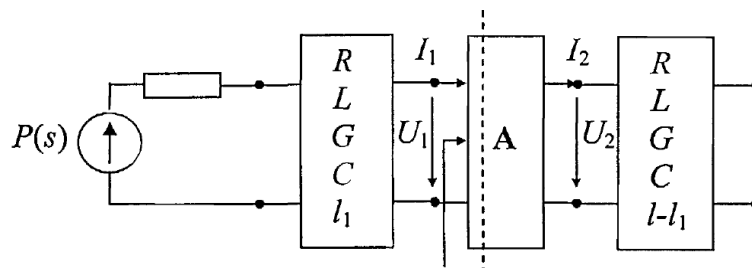


Рис. 1. Исследуемая двухпроводная линия

Необходимо определить закон, по которому в данной линии будут распространяться волны напряжения и тока, при условии отсутствия таковых волн до начала действия источника ЭДС. Решение задачи моделирования процесса распространения импульсного сигнала по КЛ с сосредоточенной неоднородностью разобьем на две подзадачи:

1. Определение волн напряжения  $u_1(x,t)$  и тока  $i_1(x,t)$ , распространяющихся на участке линии  $0 \leq x < l_1$  вследствие действия источника ЭДС, их отражения при набегании на четырехполосник и отражения преломленной четырехполосником волны от разомкнутого конца линии.

2. Определение волн напряжения  $u_2(x,t)$  и тока  $i_2(x,t)$ , распространяющихся на участке линии  $l_1 \leq x \leq l$ , вследствие проникновения волн  $u_1(x,t)$  и  $i_1(x,t)$  через четырехполосник и отражения от разомкнутого конца линии.

Решение будет иметь следующий вид:

$$u(x,t) = \begin{cases} u_1(x,t), & \text{при } 0 \leq x < l_1 \\ u_2(x,t), & \text{при } l_1 \leq x \leq l \end{cases} \quad (1)$$

$$i(x,t) = \begin{cases} i_1(x,t), & \text{при } 0 \leq x < l_1 \\ i_2(x,t), & \text{при } l_1 \leq x \leq l \end{cases}$$

Запишем в операторной форме граничные условия для  $U_1(x,s)$ ,  $I_1(x,s)$ , учитывая, что внутреннее сопротивление источника  $P(s)$  принято равным волновому, то есть  $Z_H(s) = Z_B(s)$ . Для этого в схеме, представленной на рис.1, заменим участок линии  $l_1 \leq x \leq l$  эквивалентным четырехполюсником  $A_{\text{ЭКВ2}}$ , рис. 2.

$$U_1(0,s) + Z_B(s)I_1(0,s) = P(s), \quad (2)$$

$$U_1(l_1,s) = Z_{\text{BX}}(s)I_1(l_1,s)$$

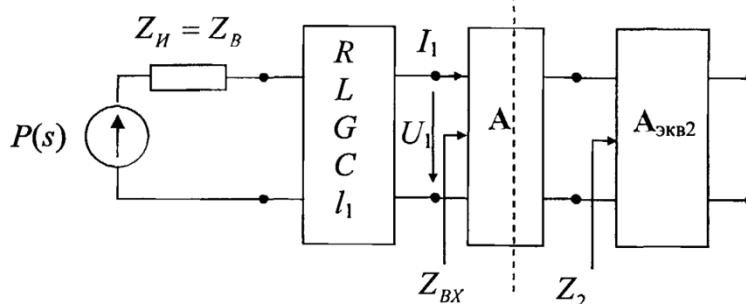


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения (для участка  $l_1 \leq x \leq l$ )

$Z_{\text{BX}}(s)$  можно выразить через известные А-параметры и  $Z_B(s)$

$$Z_{\text{BX}}(s) = \frac{A_{11}Z_2(s) + A_{12}}{A_{21}Z_2(s) + A_{22}}, \quad (3)$$

где  $Z_2(s)$  - входное сопротивление четырехполюсника  $A_{\text{ЭКВ2}}$ , которое определяется из следующего выражения:

$$Z_2(s) = Z_B(s) \frac{Z_{H2}(s) + Z_B(s)th\Gamma(l-l_1)}{Z_B(s) + Z_{H2}(s)th\Gamma(l-l_1)} \quad (4)$$

Так как по условию задачи линия на конце разомкнута,

$$Z_2(s) = \lim_{Z_{H2}(s) \rightarrow \infty} Z_B(s) \frac{Z_{H2}(s) + Z_B(s)th\Gamma(l-l_1)}{Z_B(s) + Z_{H2}(s)th\Gamma(l-l_1)} = \frac{Z_B(s)}{th\Gamma(l-l_1)} \quad (5)$$

Значения для  $U_1(x,s)$ ,  $I_1(x,s)$  с учетом (3) подставим в (2):

$$C_1(s) + C_2 - C_1(s) + C_2 = P(s),$$

$$C_1(s)e^{\Gamma(s)l_1} + C_2e^{-\Gamma(s)l_1} = \frac{A_{11}Z_B(s) + A_{12}}{A_{21}Z_B(s) + A_{22}} \left( \frac{-C_1(s)e^{\Gamma(s)l_1} + C_2e^{-\Gamma(s)l_1}}{Z_B(s)} \right) \quad (6)$$

Получим решение:

$$\begin{cases} U_1(x,s) = \frac{P(s)}{2} (e^{-\Gamma(s)x} + k_{\text{omp}} e^{\Gamma(s)(x-2l_1)}), \\ I_1(x,s) = \frac{P(s)}{2Z_B(s)} (e^{-\Gamma(s)x} - k_{\text{omp}} e^{\Gamma(s)(x-2l_1)}) \end{cases} \quad (7)$$

Запишем в операторной форме граничные условия для  $U_2(x,s)$ ,  $I_2(x,s)$

$$U_1(l_1,s) = A_{11}U_2(l_1,s) + A_{12}I_2(l_1,s), \quad (8)$$

$$I_2(l_1,s) = 0$$

Значения для  $U_2(x,s)$ ,  $I_2(x,s)$  подставим в (8), получим:

$$\frac{P(s)}{2} e^{-\Gamma(s)l_1} (k_{omp} + 1) = A_{11} [C_1(s)e^{\Gamma(s)l_1} + C_2e^{-\Gamma(s)l_1}] + \frac{A_{12}}{Z_B(s)} [-C_1(s)e^{\Gamma(s)l_1} + C_2e^{-\Gamma(s)l_1}] \quad (9)$$

$$C_2(s) = C_1(s)e^{2\Gamma(s)l}$$

Как следствие, получим выражения для волн напряжения и тока:

$$\begin{cases} U_2(x,s) = \frac{P(s)(k_{omp} + 1)Z_B(s)(e^{\Gamma(s)(x-2l)} + e^{-\Gamma(s)x})}{2[(A_{11}Z_B(s) - A_{12})e^{2\Gamma(s)(l_1-l)} + A_{11}Z_B(s) + A_{12}]} \\ I_2(x,s) = \frac{P(s)(k_{omp} + 1)(e^{-\Gamma(s)x} - e^{\Gamma(s)(x-2l)})}{2[(A_{11}Z_B(s) - A_{12})e^{2\Gamma(s)(l_1-l)} + A_{11}Z_B(s) + A_{12}]} \end{cases} \quad (10)$$

В результате в операторной форме общее решение будет выражаться следующим образом:

$$U(x,s) = \begin{cases} U_1(x,s), & \text{при } 0 \leq x < l_1 \\ U_2(x,s), & \text{при } l_1 \leq x \leq l \end{cases} \quad (11)$$

$$I(x,s) = \begin{cases} I_1(x,s), & \text{при } 0 \leq x < l_1 \\ I_2(x,s), & \text{при } l_1 \leq x \leq l \end{cases}$$

Если принять, что  $p(t)$  представляет собой импульс величиной  $K$  и длительностью  $\tau$ , описываемый следующим выражением:

$$p(t) = K[1(t) - 1(t - \tau)] \quad (12)$$

где  $1(t)$  – единичная функция Хевисайда.

Представленное решение будет моделировать процесс тестирования КЛ методом импульсной рефлектометрии[4].

#### Выводы

Разработанная математическая модель обобщенной кабельной линии передачи с сосредоточенной неоднородностью, представленной в виде четырехполюсника, позволяет моделировать процессы в реальных кабельных линиях передачи при их диагностике методом импульсной рефлектометрии.

При этом использование данной модели позволяет реально увеличить срок службы КЛ сверх нормативных сроков и с большей экономией затрат обеспечить их техническое обслуживание и ремонт.

#### Список литературы

1. Техническое перевооружение российских электрических сетей. Сколько это может стоить? / Боков Г.С. // Новости электротехники.- 2002.- № 2(14).- <http://www.news.elteh.ru/arh/> (14.07.2005).
2. Руководство по электрическим измерениям линий магистральной и внутризоновой сетей связи.- М.: Связь, 1986.
3. Гершман Б.И., Стукалин Ю.А. Измерения на междугородних линиях связи. М.: Радио связь 1984.- 169 с
4. Лебедев Г.М. Диагностика изоляции кабельных линий 6-10 кВ методом высокочастотной рефлектометрии //Электрика.- 2005,- № 5.- С. 39-41

УДК 621.311

Н.В. Буслова, канд. техн. наук, доцент; О.В. Гайдук

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ТЕСТУВАННЯ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ З ЗОСЕРЕДЖЕНИМ ДЕФЕКТОМ МЕТОДОМ ІМПУЛЬСНОЇ РЕФЛЕКТОМЕТРІЇ

*Розглянуто сучасний метод діагностики кабельних ліній електропередачі – метод імпульсної рефлектометрії. Проаналізовано реакцію вимірюваної лінії з зосередженим дефектом на вплив зондуючого імпульсу.*

*Мета дослідження: збільшення рівня експлуатаційної надійності існуючих кабельних ліній за допомогою використання ефективних методів діагностики.*

*Методика реалізації: впровадження рефлектометричного обладнання, призначеного для якісного обслуговування та ремонту кабельних ліній.*

*Результати досліджень: представлена математична модель, яка дозволяє моделювати процеси в реальних кабельних лініях при їх діагностуванні методом імпульсної рефлектометрії.*

*Висновки: використання імпульсної рефлектометрії дозволяє збільшити нормативний строк служби кабельних ліній, а також з більшою економією затрат забезпечити їх технічне обслуговування і ремонт*

**Ключові слова:** діагностика, імпульсна рефлектометрія, надійність, кабельна лінія, технічне обслуговування.

N. Buslova, A. Gaiduk

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

### MATHEMATICAL MODEL OF TESTING CABEL LINE WITH LUMPD FAULT BY IMPULSE REFLECTOMETRY METHOD

*The modern method of diagnosing cable lines - impulse reflectometry method is discussed. The response of the measured line with the lumpd fault on the monitoring pulse has been analyzed.*

*The objective of work is to increase the level of operational reliability of existing cable lines by using effective diagnostic methods.*

*Method of implementation: it is necessary to introduce the reflectometry equipment for quality service and maintenance of cable lines.*

*Results: a mathematical model that can simulate processes of diagnostic of real cable lines by impulse reflectometry has been presented.*

*Conclusions: the use of impulse reflectometry can increase the lifetime of cable lines over regulatory deadlines and also can reduce maintenance and repairs costs.*

**Keywords:** diagnostic, impulse reflectometry, reliability, cable line, maintenance.

1. Technical reequipment of Russian electrical networks. How much does it cost? / G. Bokov // News of electrical engineering. - 2002. - № 2 (14). - [Http://www.news.elteh.ru/arh/](http://www.news.elteh.ru/arh/) (14.07.2005).

2. Manual electrical measurements trunk lines and intra-communication networks. - M.: Communications, 1986

3. B. Gershman, A. Stukalin Measurements on long distance links. M.: Radio communication in 1984. - 169 p.

4. Lebedev Diagnostics insulation 6-10 kV cable lines using high-frequency domain reflectometry // Electric. - 2005, - № 5. - p. 39-41.

Надійшла 25.10.2013

Received 25.10.2013

УДК 621.311.001.57(063)

О.О. Закладний, канд. техн. наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

### МОДЕЛЬ ДІАГНОСТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

*У статті наведено модель діагностування параметрів процесу енергоспоживання асинхронного електропривода, а також результати дослідження впливу величини механічного навантаження та зниження якості напруги живлення на енергетичні характеристики асинхронних двигунів нової промислової серії 5А.*

**Ключові слова:** енергоспоживання, енергоефективність, асинхронний двигун, діагностування, коефіцієнт потужності.

**Вступ.** Одним з актуальних завдань енергозбереження є підвищення енергоефективності електромеханічних систем з асинхронним електроприводом (АЕП), оскільки оснащені ним машини і установки є одними з найбільш енергоємних споживачів електроенергії. Однак енергоефективність АЕП практично не оцінюється. Контроль обладнання АЕП не був постійним і безперервним та відбувався за фактом, а не в реальному часі, коли неефективне споживання електроенергії мало місце значний проміжок часу. Перспективним підходом методології енергоменеджменту є впровадження постійно діючого моніторингу та діагностування енергоефективності й технічного стану АЕП для оперативного реагування на погіршення його стану і порушення технологічного режиму [1,2].

**Аналіз попередніх досліджень.** Основною причиною низької енергоефективності АЕП та виникнення аварій є неврахування впливу якості напруги живлення та режиму навантаження, недостатній обсяг інформації про технічний стан, відсутність ефективного безперервного захисту