

IEEE Trans. Industry Appl. – 1993. – Vol. 29. – P. 202–208, no. 1. 6. Hartana Y.Y. and Richards G.G. *Constrained neural network-based identification of harmonic sources // IEE Proc. – Gener. Transm. Distr.* – May 1999. – Vol. 146. – P. 325–329. 7. Mark H.S. and Burch R.F. *Applicability of Neural Networks to Industrial and Commercial Power Systems: A Tutorial Overview // IEEE Trans. Ind. Applicat.* – 1997. – Vol. 33. – P. 1355–1361, no. 5.

УДК 621.3.01:537.212.001.2

А.А. Щерба¹, Ю.В. Перетятко²

¹Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев

²НТУУ “Киевский политехнический институт”, г. Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ТВЕРДОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ С ГЕТЕРОГЕННЫМИ МИКРОВКЛЮЧЕНИЯМИ

© Щерба А.А., Перетятко Ю.В., 2007

Розроблено тривимірну цифрову модель для аналізу неоднорідних електричних полів у твердій полімерній ізоляції високовольтних кабелів та самоутримних ізолюваних проводів. Модель розроблено з використанням пакета прикладних програм FEMLAB. На моделі досліджено розподіл напруженості електричного поля в областях твердої поліетиленової ізоляції між мікрровключеннями води та всередині газових мікрровключень. Показано, що напруженість поля може значно зростати у разі зменшення відстані між двома мікрровключеннями. Ще значнішим може бути зростання напруженості у разі виникнення на поверхні включень витягнутих мікрровиступів (так званих триїнгів, або дендритів).

The three-dimensional digital model for the analysis of the nonuniform electric fields in solid polymer insulation of high-voltage cables and self-holding insulated conductors has been developed. The model has been developed using the program package FEMLAB. On model the electric field intensity distribution in the areas of solid polyethylene insulation between water micro-inclusions and inside gas micro-inclusions have been studied. It is shown, that the electric field intensity can increase considerably with decreasing of distance between two micro-inclusions. The intensity growth can be even more considerable at initiation of prolate micro-protrusions (so-called treeings or dendrites) on inclusion surface.

Трудность решения задач моделирования неоднородных электрических полей (ЭП) внутри и вне различных электроэнергетических систем определяется необходимостью учета сложной конфигурации границ раздела сред с различными электрофизическими параметрами [1–3]. Задача моделирования ЭП в высоковольтной твердой полиэтиленовой изоляции еще более усложняется при достижении в ней критических напряженностей электрического поля возле имеющихся внутри жидких и газовых микровключений, что может приводить к возникновению частичных разрядов (ЧР) и изменению конфигурации таких гетерогенных микровключений. Известно аналитическое решение задачи распределения напряженности ЭП внутри диэлектрической среды при наличии в ней одного включения сферической или эллипсоидной формы [4]. Однако при необходимости учета сложной конфигурации включений и границ раздела сред аналитический расчет ЭП в настоящее время не возможен, поэтому для решения таких задач применяются различные конечно-разностные методы моделирования. Для расчета неоднородных ЭП в так называемых замкнутых

областях, в которых возможно задание условий для потенциалов или напряженностей на границах расчетной области, эффективным может быть применение метода конечных элементов и пакета прикладных программ FEMLAB [5].

С применением такого подхода выполнен анализ ЭП в современной сшитой полиэтиленовой изоляции высоковольтных кабелей и самоудерживаемых изолированных проводов (СИП) с учетом микровыступов на токопроводящих жилах и поверхности одиночных гетерогенных включений и показана возможность увеличения напряженности ЭП в единицы-десятки раз в приграничных областях [6–8]. Современные исследования структуры сшитой полиэтиленовой изоляции показывают наличие в ней микровключений разных размеров, конфигураций и на различных расстояниях друг от друга (в том числе и на меньших, чем их размеры) [9]. Последнее обстоятельство может быть причиной дальнейшего повышения напряженности электрического в приграничных областях изоляции, но модели для расчета неоднородных ЭП в твердой полимерной изоляции с микровключениями, находящимися на малых расстояниях, не разработаны.

Поэтому целью работы была разработка трехмерных моделей для анализа распределения напряженности неоднородных электрических полей в диэлектрической среде с гетерогенными микровключениями, имеющими различные электрофизические параметры, размеры, конфигурации и взаимное расположение.

Постановка задачи и описание математической модели. Учитывая, что размеры микровключений в изоляции отличаются на несколько порядков, то вокруг совокупности микровключений возможно формирование замкнутых областей, вне которых перенапряженных областей в изоляции не существует. При такой постановке, как и при решении задач в работах [6–8] целесообразным является применение пакета программ FEMLAB, использующим метод конечных элементов [5]. При моделировании надо уделить внимание выбору расчетной области и размерам сетки. Увеличивая размеры расчетной области – мы усложняем такой расчет, уменьшая расчетную область – мы уменьшаем точность расчетов. Согласно проведенным тестовым задачам нами было определено, что границы расчетной области должны быть удалены от поверхности гетерогенных включений на расстояние в 4–5 раз большее, чем их максимальный размер. При этом неточность численных расчетов не превышает 10 % по сравнению с аналитическими.

Моделирование осуществлялось в объемном фрагменте в виде параллелепипеда полиэтиленовой изоляции с двумя гетерогенными сферическими водяными или газовыми включениями, поверхность которых может иметь микровыступы или микровпадины. Для исследований выбрана область диэлектрической среды, вблизи токопроводящей жилы СИП. Фрагмент изоляции находится в переменном электрическом поле $\dot{U}_0 e^{j\omega t}$, изменяющемся по гармоническому закону с угловой частотой $\omega = 314 \text{ рад/с}$.

Расчеты проводились при следующих допущениях: среды изоляции и включений являются линейными, изотропными и дисперсными; перемещения зарядов в объеме изоляции и влияние ловушек для подвижных зарядов отсутствуют. Квазиэлектростатическое поле в диэлектрической среде в комплексной плоскости описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \dot{E} &= 0, \text{ или } \dot{E} = -\nabla \dot{\phi}, \\ \dot{J}_{tot} &= \sigma \dot{E} + j\omega \varepsilon_0 \dot{\varepsilon}_r \dot{E}, \\ \nabla \cdot \dot{J}_{tot} &= 0, \\ \dot{D} &= \varepsilon_0 \dot{\varepsilon}_r \dot{E}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \dot{E} – напряженность ЭП; \dot{D} – электрическое смещение; \dot{J}_{tot} – плотность полного тока, включая токи проводимости и ток смещения; ε_0 и $\dot{\varepsilon}_r$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума и относительная диэлектрическая проницаемость среды (в общем случае комплексная

величина); σ – электропроводность среды; $\omega = 314 \text{ Гц}$ – угловая частота. В выражении (1) и в последующих выражениях точкой сверху обозначаются комплексные величины.

Как следует из системы уравнений (1), для комплексного значения электрического потенциала $\dot{\phi}$ можно записать уравнение Лапласа

$$-\nabla \cdot (\sigma + j\omega\epsilon_0\dot{\epsilon}_r)\nabla\dot{\phi} = 0. \quad (2)$$

После определения величины $\dot{\phi}$ величину напряженности электрического поля можно определить из уравнения $\dot{E} = -\nabla\dot{\phi}$.

Для различных сред задавались такие электрические параметры:

$$\sigma(x, y, z), \epsilon_r(x, y, z) = \begin{cases} \sigma_1, \epsilon_1 - \text{полиэтилен}, \\ \sigma_2, \epsilon_2 - \text{воздух}, \\ \sigma_3, \epsilon_3 - \text{вода}, \end{cases}$$

где $\epsilon_1 = 2,4$; $\epsilon_2 = 1,0006$; $\epsilon_3 = 80$; $\sigma_1 = 10^{-14} \text{ См}$; $\sigma_2 = 10^{-18} \text{ См}$; $\sigma_3 = 10^{-2} \text{ См}$.

Задача расчета рассматривалась в трехмерной постановке, в системе координат x, y, z с началом координат в центре анализируемой области.

При моделировании принимались следующие граничные условия:

- на нижней границе выполнимо условие $\dot{\phi} = 0$;
- на боковых границах, а также на границе между включением и диэлектрической средой (на поверхности проводящего включения) выполнимо условие $n \cdot E = 0$;
- на верхних границах расчетной области верно уравнение $\phi_1 = U_m e^{j0} = E_{cp} h$.

Общепринятым считается определение $E_{кр}$ по кривым Пашена [3]. Однако такой подход имеет ряд недостатков. Во-первых, закон Пашена применяется для однородных электрических полей и газовой среды постоянного состава. Для полиэтиленовой изоляции, с гетерогенными микровключениями и возникающими частичными разрядами эти условия не выполняются, из-за газообразных выделений при возникновении ЧР и появлении токопроводящей сажи на стенках включений. Во-вторых, не учитывается возможность развития в газовых полостях разрядов по поверхности твердого диэлектрика. Данных для определения $E_{кр}$ по кривым Пашена при наличии водяных включений нет вовсе.

Поэтому для оценки величины напряженности ЭП в расчетной области мы использовали, как и в работах [6-8] коэффициент неоднородности поля, определяемый как

$$k_n = \frac{|\dot{E}_{\max}|}{|\dot{E}_{cp}|}, \quad (3)$$

отношение максимального значения напряженности электрического поля E_{\max} в расчетной области к среднему значению напряженности электрического поля E_{cp} во всей изоляции. При $k_n \geq 3$ поле считается существенно неоднородным [1-3, 6-8, 10].

Расчеты проводились для СИП (при толщине изоляции $\Delta = 1,2 \text{ мм}$). Средняя напряженность электрического поля в полиэтиленовой изоляции для СИП-1 составляет $E_{cp} = 0,2482 \text{ кВ/мм}$ [6]. Предполагалось, что весь расчетный объем изоляции СИП состоит из множества элементарных параллелепипедов, припасованных друг к другу, в каждом из которых поле можно считать однородным.

Анализ полученных результатов. Для проверки достоверности модели был проведен тестовый расчет электрического поля в полиэтиленовой изоляции с одним сферическим включением. Если однородное электрическое поле напряженностью $E_0 = E_{cp}$ возникает в диэлектрической среде ϵ_0 (полиэтиленовой изоляции) с шарообразным включением с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{вк}$, то для напряженности $E_{ш}$ внутри шара верно [4]

$$E_{ш} = \frac{3\varepsilon_{\delta}}{\varepsilon_{вк} + 2\varepsilon_{\delta}} E_0. \quad (4)$$

Внутри непроводящих газовых включений наблюдается повышение напряженности ЭП в 1,25 раза. Если имеются проводящие водяные включения, то напряженность ЭП в изоляции в непосредственной близости от поверхности такого сферического включения увеличивается в 2,7–3 раза (внутри водяного включения она будет практически равна нулю). Таким образом, возникают предпосылки для возникновения частичных разрядов и разрушений полиэтиленовой изоляции возле поверхности проводящих включений. В то же время в непроводящих включениях возникают условия для возникновения ЧР внутри, то есть механизм увеличения размеров таких включений другой.

Согласно выражению (4) и проведенным исследованиям изменение диаметра водяного включения не изменяет величину напряженности ЭП в изоляции в непосредственной близости возле поверхности включения. Но в области изоляции с неизменными координатами при увеличении размеров водяного включения напряженность ЭП также увеличивается. Следовательно, с ростом размера включения снижается общая диэлектрическая прочность изоляции.

На рис. 1 приведено изменение напряженности ЭП в промежутке между двумя сферическими водяными включениями разных диаметров.

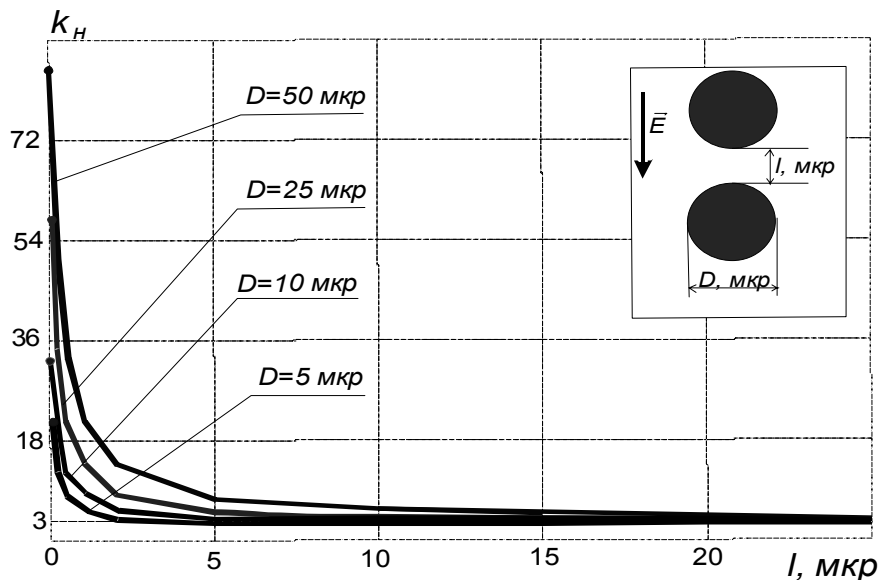


Рис. 1. Изменение напряженности ЭП в полиэтиленовой изоляции между двумя водяными сферическими включениями разных диаметров

Анализ результатов расчета, приведенных на рис. 1, можно говорить об увеличении напряженности ЭП в полиэтиленовой изоляции между такими включениями и об увеличении величин перенапряженной области всей изоляции, что приводит к повышению вероятности возникновения в ЧР и объединения совокупности водяных включений в одно. Можно также сделать вывод, что изменение напряженности ЭП в промежутке между двумя водяными сферическими включениями происходит по экспоненциальному закону. При этом на расстоянии l больше радиуса сферы R включение можно рассматривать как одиночное, то есть при $l > R$ коэффициент $k_n \approx 3$.

Проведен расчет напряженности ЭП в полиэтиленовой изоляции при изменении расстояния между двумя сферическими водяными и газовыми включениями диаметром 25 мкн. Полученные результаты показали, что напряженность ЭП на поверхности водяного включения может превышать среднее значение напряженности ЭП в изоляции в 3,6 раза. При малых диаметрах

дендритов внутри них также может возникнуть напряженность ЭП. Оба механизма увеличивают вероятность возникновения ЧР и дендритов. Диаметр рассматриваемого дендрита меньше диаметра включения в 25 раз, поэтому два включения с дендритом на одном из них можно рассматривать как игла–плоскость, а два включения с дендритами на каждом – как игла–игла. Дендриты могут возникать и “прорасти” на поверхности одного включения и на двух включениях, но они возникают в изоляции вне водяных включений, или внутри газовых включений, электрическая прочность среды которых гораздо меньше, чем электрическая прочность полиэтилена.

Результаты расчета распределения напряженности ЭП в полиэтиленовой изоляции при возникновении в ней двух водяных включений: одно правильной сферической формы, второе – с имеющимся дендритом диаметром $d=2$ мкм, прорастающим вглубь изоляции (то для случая игла–плоскость), приведены на рис. 2.

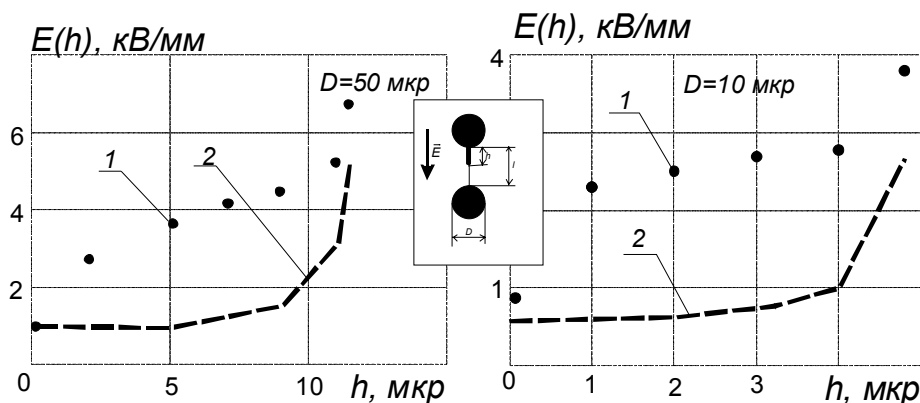


Рис. 2. Напряженности ЭП в изоляции возле острия дендрита и внутри дендрита при двух водяных включениях и различной длине дендрита на одном из них

На рис. 3 приведены результаты расчета распределения напряженности ЭП в полиэтиленовой изоляции возле острия дендритов при двух водяных включениях с различными длинами дендритов (то для случая игла–игла).

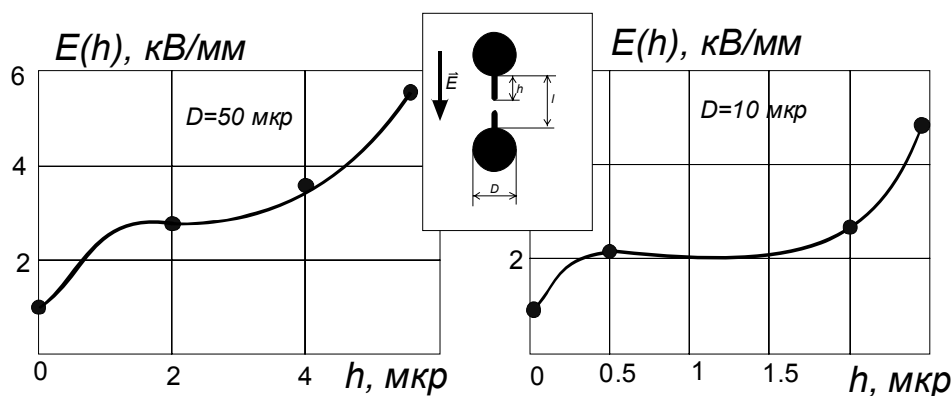


Рис. 3. Напряженности ЭП в изоляции возле острия дендрита при двух водяных включениях с различными длинами дендритов

На рис. 4 приведены результаты расчета распределения напряженности ЭП в полиэтиленовой изоляции при двух включениях, одно из которых имеет впадину, глубина которой может изменяться.

Установлено, что проращение канала дендрита не влияет на распределение напряженности электрического поля внутри включения, но интенсивность электрического поля внутри каналов дендрита усиливается с его проращением, как следствие наличия в этой области максимального

значения плотности тока проводимости. Это связано с тем, что ток смещения в изоляции протекает через малую поверхность дендрита. Анализ также показал, что максимальное увеличение напряженности электрического поля возникает в изоляции при возникновении дендритов в обоих близко расположенных водяных включениях (случай игла – игла). В таком случае при диаметре дендритов менее 2 мкм напряженность поля может возрасти в несколько раз по сравнению с напряженностью поля в этой же области, но при наличии одного водяного включения. Увеличение напряженности электрического поля может произойти и при возникновении на поверхности водяного включения впадины (см. рис. 4). Наибольшее увеличение напряженности ЭП проявляется возле края впадины, то есть в области с наибольшим изломом границы раздела разных сред.

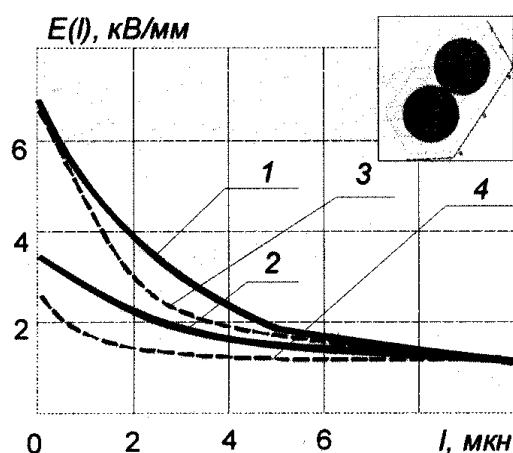


Рис. 4. Распределение напряженности ЭП в промежутке между водяными включениями, одно из которых имеет впадину, глубина которой может изменяться:

- 1 – $D=10$ мкм и 2 – $D=50$ мкм – для края углубления
 3 – $D=10$ мкм и 4 – $D=50$ мкм – для средней точки

Прораствание дендритов как от одного включения, так и двух, усиливает ионизационные процессы в промежуточной среде, увеличивают вероятность возникновения частичных разрядов и объединения двух включений в одно типа “гантели”. Следует отметить, что электрофизические параметры канала, объединяющего два включения, могут отличаться от параметров включений. Максимальная плотность токов в таком канале будет приводить к увеличению его сечения, выравнивая, таким образом, различия свойств канала и сферических включений.

Выводы. 1. Разработана трехмерная модель численного расчета напряженности электрического поля в диэлектрической среде (высоковольтной полиэтиленовой изоляции), имеющей совокупность близко расположенных жидких (водяных) включений, которые могут иметь сложную форму, изменяющуюся при возникновении критических напряженностей на их поверхности.

2. Показано, что при близком расположении двух водяных включений с малыми размерами (меньше 50 мкм, то есть меньше принятых критических размеров) в микрообластях полиэтиленовой изоляции возникает резкое возрастание напряженности электрического поля. Таким образом, появление частичных разрядов и пробой изоляционного промежутка между включениями с их объединением в одно включение возможен даже при малых средних напряженностях поля в изоляции (< 1 кВ/мм). Такой механизм объясняет возникновение частичных разрядов даже при малых напряженностях ЭП.

3. Максимальное увеличение напряженности электрического поля возникает в полиэтиленовой изоляции при возникновении на поверхности водяных включений электродендритов. В таком случае при диаметре дендритов менее 2 мкм напряженность поля может возрасти в несколько раз (по сравнению с напряженностью поля в этой же области, но при наличии одного водяного включения).

4. Возникновение в полиэтиленовой изоляции дендритов с радиусами на порядок меньшими их длины может создавать на острие дендритов области с локальными напряжениями электрического поля в 10–100 раз большими, чем средние значения.

5. Наличие в полиэтиленовой изоляции полых проводящих дендритов создает предпосылки для развития в ней частичных разрядов, а возникновение непроводящих включений создает предпосылки для развития частичных разрядов в таких включениях.

1. Щерба А.А., Резинкина М.М. *Моделирование и анализ электрических полей энергетических объектов методом конечных объемов.* – К.: Наук. думка, 2007. – 386 с. 2. Кучинский Г.С. *Частичные разряды в высоковольтных конструкциях.* – Л.: Энергия, 1979. – 233 с. 3. *Техніка і електрофізика високих напруг.* / За ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. – Харків: Торнадо, 2005. – 930 с. 4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Электродинамика сплошных сред.* – М.: Наука, 1980. – 560 с. 5. *FEMLAB User's Guide and Introduction. FEMLAB 2.3. COMSOL, Inc.* – 1994–2002. – 436 p. 6. Щерба А.А., Перетятко Ю.В. *Моделирование и анализ электрического поля в полимерной изоляции самонесущих изолированных проводов при наличии в ней объемных и поверхностных дефектов* // *Техн. електродинаміка. Тем. вип.: Силова електроніка та енергоефективність.* – 2007. – Ч. 1. – С. 108–112. 7. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. и др. *Математическое моделирование и численный расчет неоднородных электрических полей, удельных потерь и плотности поверхностных зарядов в полиэтиленовой модифицированной изоляции высоковольтных силовых кабелей* // *Техн. електродинаміка. Тем. вип.: Силова електроніка та енергоефективність.* – 2006. – Ч. 2. – С. 85–89. 8. Щерба А.А., Перетятко Ю.В. *Трехмерное моделирование электрического поля в неоднородной полиэтиленовой изоляции высоковольтных кабелей* // *Импульсные процессы в механике сплошных сред.: Матер. VII Междунар. научн. шк.-семина. (21–25 авг. 2007 г.).* – Николаев, 2007. – С. 95–98. 9. Шувалов М.Ю., Ромашкин А.В., Овсиенко В.Л. *Анализ дефектов в изоляции силовых высоковольтных кабелей методами видеомикроскопии и микроэксперимента* // *Электричество.* – 2000. – № 5. – С. 49–57. 10. Резинкина М.М., Щерба А.А., Перетятко Ю.В. *Трехмерное моделирование неоднородных электрических полей в открытых областях с применением метода поглощающих граничных условий* // *Техн. електродинаміка.* – 2007. – № 5. – С. 9–12.

УДК 621.311 : 681.3

О.Ф. Буткевич, О.В. Кириленко

Институт электродинамики НАН Украины, м. Київ

ПЕРШОЧЕРГОВІ ЗАВДАННЯ ПРОБЛЕМНО-ОРІЄНТОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ РЕЖИМІВ ОЕС УКРАЇНИ

© Буткевич О.Ф., Кириленко О.В., 2007

Розглянуто підстави для створення проблемно-орієнтованої системи моніторингу режимів ОЕС України та її першочергові завдання, пов'язані з оцінюванням рівня безпеки поточних режимів, запропоновано способи їх розв'язання.

The grounds for design of problem-oriented monitoring system dealing with Ukrainian Interconnected Power System operational conditions are considered. The top-priority problems regarding the estimation of safety level for current operational conditions are examined, and the ways of their solution are offered.

Підстави для створення сучасної системи моніторингу режимів ОЕС України. Відповідно до Плану дій щодо реалізації пріоритетних положень програми інтеграції України до Євро-