

А.А. МИНЧЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПИ";

С.К. БЕРЕЗКА, зав. лабораторией, НТУ "ХПИ"

ВЫБОР ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Розглянуті основні положення методики вибору граничних значень опору заземлення опор повітряних ліній електропередачі напругою 110 кВ і вище по критерію повного вичерпання комутаційного ресурсу лінійних вимикачів. Дані приклади обчислень з використанням цієї методики.

Рассмотрены основные положения методики выбора предельных значений сопротивления заземления опор воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше по критерию полного исчерпания коммутационного ресурса линейных выключателей. Даны примеры вычислений с использованием этой методики.

The bases of method of choice of maximum values of overhead power lines 110 kV grounding resistance on the criterion of the complete exhausting of interconnect resource of linear switches are considered. The examples of calculations with the use of this method are given.

Постановка проблемы. Нормирование заземления на воздушных линиях (ВЛ) электропередачи напряжением 110 кВ и выше с точки зрения грозозащитной функции, в частности, выбор наибольшего значения сопротивления растеканию заземляющих устройств (ЗУ) опор ВЛ следует производить во взаимосвязи с требуемой надежностью электроснабжения потребителей. Таким практическим критерием надежности в настоящее время может быть принят критерий обеспечения готовности оборудования энергосистемы, которому соответствует нормированная периодичность ремонта линейных выключателей. Этот критерий принятия решения при выборе предельных значений сопротивления заземления опор ВЛ был предложен в работе [1] вместо используемого на протяжении длительного времени правила принятия решения – значения эквивалентного сопротивления земли по трассе ВЛ. В последнем случае имеем достаточно грубую зависимость эквивалентного удельного сопротивления земли и грозозащиты ВЛ. Вместе с тем, совершенствование выбора наибольшего значения сопротивления растеканию ЗУ опор ВЛ напряжением 110 кВ и выше в соответствии с предложенным в [1] критерием принятия решения предполагает уточнение ожидаемого числа грозовых отключений ВЛ за счет аппроксимации расчетного импульса тока молнии, отвечающего физике процесса при ударе молнии в ВЛ, и уточнение наибольших значений

токов однофазных коротких замыканий (КЗ), коммутируемых линейным выключателем при грозовых отключениях, с учетом всех влияющих факторов.

Анализ публикаций. Наиболее полная методика расчета грозозащиты ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения изложена в работе [1]. Совершенствование этой методики путем представления в ней формы волны импульса тока молнии, наиболее полно отвечающей условиям физики процесса при разряде молнии, произведено в работах [2-5]. Кроме того, в работе [1] с использованием критерия обеспечения готовности оборудования энергосистемы выполнен выбор предельных значений сопротивления ЗУ опор ВЛ. В этом выборе принимается [1], что в межремонтный период происходит полное исчерпание коммутационного ресурса выключателя присоединения ВЛ, доленое участие в котором составляют отключения токов КЗ при грозе, причем в качестве расчетного вида принято трехфазное КЗ, а не однофазное КЗ, что следует из процессов поражения молнией ВЛ [6]. Исходя из этого в работе [7] были определены расчетные значения токов однофазных КЗ, коммутируемых линейным выключателем при грозовых отключениях ВЛ, и поставлена задача построения имитационной модели расходования его коммутационного ресурса при варьировании значений сопротивления ЗУ опор.

Цель статьи. Построение имитационной модели расходования коммутационного ресурса линейных выключателей из-за грозовых отключений ВЛ электропередачи напряжением 110 кВ и выше и её испытание для установления предельных значений сопротивления заземления опор ВЛ.

Основная часть. Имитационная модель расходования коммутационного ресурса линейных выключателей из-за грозовых отключений ВЛ электропередачи напряжением 110 кВ и выше строится исходя из следующих положений:

1) грозовые отключения ВЛ происходят в результате однофазных КЗ через дугу, имеющих место при прямом ударе молнии (ПУМ) в опору, в трос в середине пролета и при прорывах молнии на провода ВЛ. При выборе мест поражения молнией ВЛ предполагаем, что распределение случайной величины удаления l места КЗ от шин рассматриваемой подстанции (ПС) равномерное. В месте однофазного КЗ при грозовом поражении ВЛ оказывается включенным сопротивление, конечное значение которого определяется учитываемыми влияющими факторами: сопротивлением заземления опор ВЛ, режимом заземления грозозащитного троса, местом поражения молнией ВЛ, сопротивлением дуги;

2) так же равномерно распределены фазы рабочего напряжения $u_{р(ф)}$ для провода ВЛ в момент разряда молнии в ВЛ;

3) общее число ожидаемых отключений ВЛ при ПУМ в опору ВЛ, в трос в середине пролета и при прорывах молнии на провода ВЛ определяется суммированием чисел отключений (в общем случае различных) от перекрытий линейной изоляции отдельных проводов ВЛ. Поэтому достижение критерия полного исчерпания коммутационного ресурса линейного выключателя в межремонтный период устанавливается по одному из полюсов выключателя – тому, для провода ВЛ которого получено наибольшее число ожидаемых грозовых отключений;

4) реальные условия выполнения ВЛ допускают возможности как одно- так и двухкратных устройств автоматического повторного включения (АПВ). Схемы коммутаций подстанций выполняются как с одним выключателем на присоединение ВЛ, так и с двумя. При построении имитационной модели будем исходить с того, что успешность АПВ линий в случае двухкратного цикла равновероятна по циклам. Кроме того, в случае двух выключателей на присоединение ВЛ исходим из положения, что выключатели отключают ток однофазного КЗ не одновременно. Предполагаем равновероятный характер распределения событий отключения тока однофазного КЗ выключателями. При этом выключатель отключившийся первым, коммутирует половину значения тока КЗ, а второй – отключает весь ток КЗ присоединения ВЛ электропередачи. Тогда ток однофазного КЗ, отключаемый каждым выключателем (1 и 2), составит в расчете на одно КЗ

$$I_{1,2} = \frac{I_l/2 + I_l}{2} = 0,75I_l; \quad (1)$$

5) допускаем возможность введения ограничений в части предельных значений сопротивления ЗУ опор ВЛ электропередачи напряжением 110 кВ и выше, которые отображают иные функции, отличные от грозозащитной, заземления на определенном участке длины ВЛ.

Допустимое число КЗ $N_{\text{доп}}$ при их равномерном распределении на ВЛ длиной L определяется по [1] из условия полного использования коммутационного ресурса в межремонтный период, т.е.

$$\int_0^L \frac{N_{\text{доп}}}{L N_0 (I_0/I_l)^\gamma} dl = 1, \quad (2)$$

где N_0 – допустимое без ремонта выключателя количество отключений номинального тока КЗ I_0 ;

I_l – ток КЗ в случае удаления l точки КЗ от шин подстанции;

γ – константа, значение которой определяется исполнением выключателя.

Из выражения (2) значение $N_{\text{доп}}$ при замене $\int_0^L I_l^\gamma dl$ суммой и учёте, что выключателем коммутируется ток однофазного КЗ, будет равно:

$$N_{\text{доп}} = \frac{L N_0 I_0^\gamma}{\sum_{i=1}^n (I_{K,Q1,i}^{(1)})^\gamma l_{\text{ПРОЛ}}}, \quad (3)$$

где $I_{K,Q1,i}^{(1)}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока однофазного КЗ, коммутируемого выключателем присоединения ВЛ к шинам источника питания, при КЗ на i -й опоре;

$l_{\text{ПРОЛ}}$ – длина пролета ВЛ.

Значение тока $I_{K,Q1,i}^{(1)}$ рассчитывается по подпрограмме «ТОКЗ» имитационной модели расходования коммутационного ресурса линейных выключателей из-за грозовых отключений ВЛ.

Переходя к допустимому числу грозовых отключений ВЛ в год в расчете на полюс линейного выключателя $N_{\text{доп,г,полюс}}$ по критерию полного исчерпания коммутационного ресурса линейных выключателей в межремонтный период и учитывая число выключателей (один или два) на присоединение ВЛ в схеме ПС, имеем при однократном АПВ:

$$N_{\text{доп,г,полюс}} = N_0 \beta_\Gamma \frac{L I_0^\gamma}{\sum_{i=1}^n (\chi I_{K,Q1,i}^{(1)})^\gamma l_{\text{ПРОЛ}} T_{\text{ПР}} (2 - k_{\text{АПВ}})}, \quad (4)$$

при двухкратном АПВ:

$$N_{\text{доп,г,полюс}} = N_0 \beta_\Gamma \frac{L I_0^\gamma}{\sum_{i=1}^n (\chi I_{K,Q1,i}^{(1)})^\gamma l_{\text{ПРОЛ}} T_{\text{ПР}} (\sqrt{1 - k_{\text{АПВ}}} + 2 - k_{\text{АПВ}})}, \quad (5)$$

где β_Γ – отношение числа грозовых отключений к общему числу автоматических отключений ВЛ;

$\chi=1$ при одном выключателе и $\chi=0,75$ при двух выключателях на присоединение ВЛ;

$T_{\text{ПР}}$ – средний период планового ремонта выключателей, год;

$k_{\text{АПВ}}$ – коэффициент успешности АПВ при грозовых отключениях.

Дальше переходим от абсолютного числа грозовых отключений ВЛ длиной L , проходящей в районе с числом грозовых часов $N_{\text{Г.ч}}$ в год, к предельному значению удельного числа грозовых отключений (на 100 км и 100 грозовых часов) [1] в расчете на полюс линейного выключателя:

$$n_{\text{Г,ПРЕД,ПОЛЮС}} = N_{\text{ДОП,Г,ПОЛЮС}} \frac{10^4}{N_{\text{Г.ч}} L}, \quad (6)$$

что дает при наличии однократного АПВ:

$$n_{\text{Г,ПРЕД,ПОЛЮС}} = \frac{N_0 \beta_{\text{Г}} I_0^{\gamma} \cdot 10^4}{N_{\text{Г.ч}} \sum_{i=1}^n (\chi I_{\text{К,ОЛ},i}^{(1)})^{\gamma} l_{\text{ПРОЛ}} T_{\text{П.Р}} (2 - k_{\text{АПВ}})} \quad (7)$$

и при двухкратном АПВ соответственно:

$$n_{\text{Г,ПРЕД,ПОЛЮС}} = \frac{N_0 \beta_{\text{Г}} I_0^{\gamma} \cdot 10^4}{N_{\text{Г.ч}} \sum_{i=1}^n (\chi I_{\text{К,ОЛ},i}^{(1)})^{\gamma} l_{\text{ПРОЛ}} T_{\text{П.Р}} (\sqrt{1 - k_{\text{АПВ}}} + 2 - k_{\text{АПВ}})} \quad (8)$$

С учетом опубликованных статистических данных энергосистем успешности АПВ линий электропередачи, принимаем также значения $k_{\text{АПВ}}$ при грозовых отключениях ВЛ: однократное действие $k_{\text{АПВ}} = 0,75$; двухкратное действие (с учетом успешности на первом цикле) $k_{\text{АПВ}} = 0,85$.

Значения удельного числа грозовых отключений ВЛ от обратных перекрытий линейной изоляции при ПУМ в опору $n_{\text{ОП}}$ и в трос в середине пролета $n_{\text{ТР}}$ в зависимости от значений сопротивления заземления опор ВЛ $R_{\text{ЗУ}}$ определяются по усовершенствованной методике [2-5], реализованной в виде подпрограммы «GROZA» имитационной модели расходования коммутационного ресурса линейного выключателя. Вместе с тем, в указанной подпрограмме сохранен тот расчет удельного числа отключений ВЛ от прорыва молнии через тросовую защиту на провода $n_{\text{ТР}}$, который приведен в работе [1]. Составляющая $n_{\text{ТР}}$ в общем удельном числе грозовых отключений ВЛ $n_{\text{Г}}$ незначительна [1] и не зависит от значения сопротивления $R_{\text{ЗУ}}$ опор ВЛ.

Сопоставление значений ожидаемого удельного числа отключений ВЛ $n_{\text{Г}}$ для того из проводов (1-й, 2-й или 3-й), для которого это значение получено наибольшим, со значением величины $n_{\text{Г,ПРЕД,ПОЛЮС}}$ (в общем случае эти две величины зависят от сопротивления заземления опор $R_{\text{ЗУ}}$)

дает возможность установить предельное значение сопротивления ЗУ опор.

Проиллюстрируем как промежуточные результаты испытаний имитационной модели расходования коммутационного ресурса линейных выключателей из-за грозовых отключений ВЛ, так и конечные результаты, полученные для тех же расчетных условий. В качестве промежуточных результатов представим ожидаемое удельное число грозовых отключений ВЛ $n_{\text{Г}}$ в зависимости от сопротивления заземления опор $R_{\text{ЗУ}}$, полученные с помощью подпрограммы "GROZA" применительно к ВЛ с $U_{\text{НОМ}} = 110$ кВ. Принято, что на ВЛ применены унифицированные одноцепные или двухцепные железобетонные промежуточные опоры ПБ110-1 или ПБ110-2 соответственно. В числе других исходных данных: линии выполнены проводом АС-120, имеют грозозащитный трос С-70, заземленный по всей длине ВЛ, линейная изоляция осуществлена с помощью 8 изоляторов марки ПС-70Е; в случае одноцепной ВЛ длина пролета составляет 255 м, двухцепной – 220 м.

Промежуточные результаты испытаний имитационной модели представлены на рис. 1 и 2.

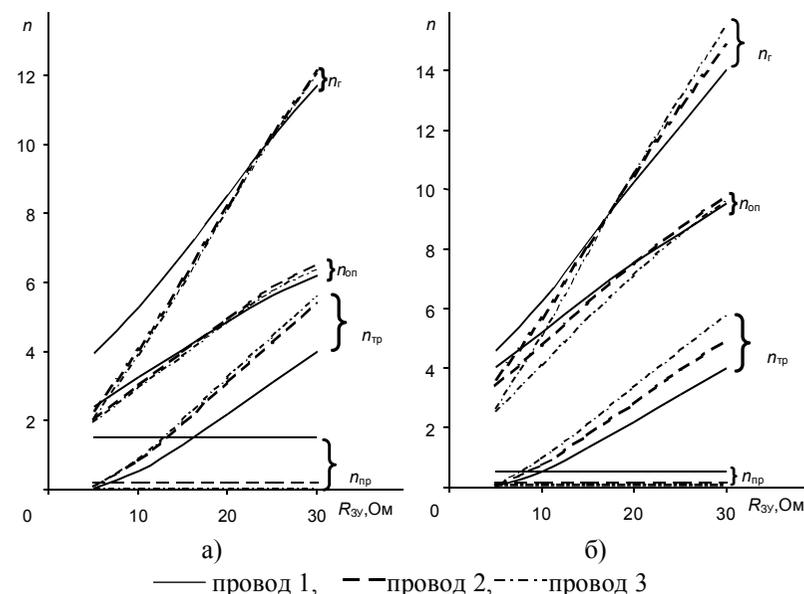


Рис. 1 – Ожидаемое удельное число грозовых отключений $n_{\text{Г}}$ одноцепной (а) и двухцепной (б) ВЛ и его составляющие $n_{\text{ОП}}$, $n_{\text{ТР}}$, $n_{\text{ТР}}$

Анализ полученных промежуточных результатов (см. рис. 1) показывает, что с изменением сопротивления заземления опор ВЛ в

общем случае происходит и изменение провода (1-й, 2-й или 3-й) и полюса выключателя, для которого значение n_{Γ} наибольшее. Это подтверждает правильность принятого ранее положения в части построения имитационной модели о том, что критерий полного исчерпания коммутационного ресурса линейного выключателя в межремонтный период устанавливается по тому из полюсов выключателя, для провода ВЛ которого получено наибольшее число ожидаемых грозových отключений.

Определение предельного значения сопротивления заземления опор ВЛ с использованием имитационной модели расходования коммутационного ресурса выключателя вследствие грозových отключений произведем для рассмотренных случаев ВЛ с $U_{НОМ} = 110$ кВ, дополнив их вариантами исходных данных в части эквивалентных сопротивлений, характеризующих электрическую сеть (реальную сеть 110 кВ АК «Харьковоблэнерго» и «Донецкoblэнерго»), а также конструктивных и эксплуатационных характеристик линейных выключателей и присоединений ВЛ, коммутируемых ими. В обоих рассматриваемых случаях грозозащитный трос заземлен на каждой опоре ВЛ. Учтено, что на ПС «Барабашова – 110 кВ» и «Майская – 330 кВ» установлены масляные многообъемные выключатели типов У-110-2000-40У1 и У-110-2000-50 соответственно, для которых $I_0 = 40$ и 50 кА, $N_0 = 5$, $T_{П.Р} = 8$ лет. Кроме того, известно, что длины ВЛ 110 кВ «Барабашова – Поршень – ХЭЛЗ – Серп и Молот» и «Майская – Дружковка» равны 5,3 и 19,5 км соответственно; последняя из них двухцепная, каждая оснащена однократным АПВ. Результаты испытаний имитационной модели расходования коммутационного ресурса линейных выключателей указанных выше ВЛ приведены на рис. 2.

Анализ полученных результатов показывает, что предельные значения сопротивления ЗУ опор рассмотренных ВЛ по критерию полного исчерпания коммутационного ресурса в межремонтный период составляет:

ВЛ 110 кВ «Барабашова – Поршень – ХЭЛЗ – Серп и Молот» $R_{ЗУ} > 30$ Ом,
 ВЛ 110 кВ «Майская – Дружковка» $R_{ЗУ} = 8$ Ом.

Сохранив исходные данные проведенного испытания имитационной модели расходования коммутационного ресурса выключателя, которые представляли реальную сеть 110 кВ АК "Харьковобэнерго" и "Донецкoblэнерго", исследуем влияние длины ВЛ на выбор предельно допустимого значения сопротивления ЗУ опор. Будем варьировать длиной каждой из рассмотренных ранее ВЛ и поскольку при этом исходные данные уже не будут соответствовать конкретным условиям электрической сети 110 кВ, назовём эти варианты испытания имитационной модели соответственно «Барабашова – VAR» и «Майская – VAR». Результаты испытаний представлены на рис 3.

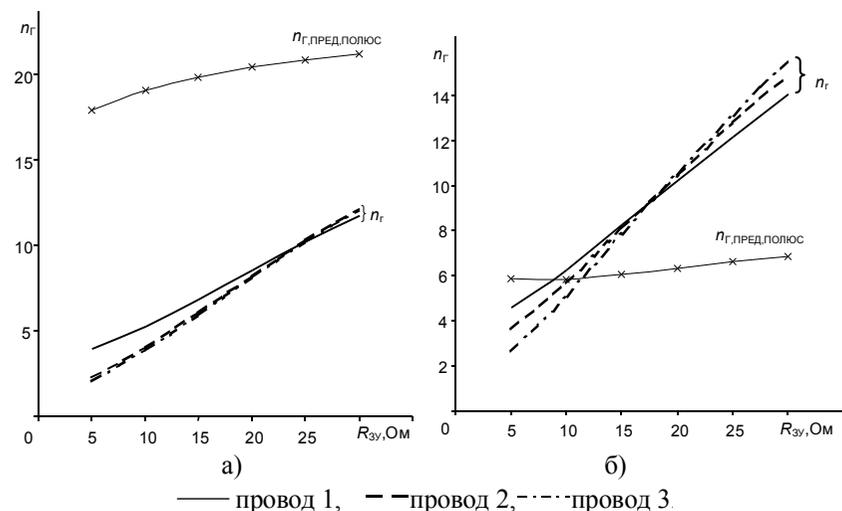


Рис. 2 – Определение предельного значения $R_{ЗУ}$ по условию $n_{\Gamma} = n_{\Gamma, \text{пред.полюс}}$ для ВЛ 110 кВ «Барабашова – Поршень – ХЭЛЗ – Серп и Молот» (а) и «Майская – Дружковка» (б)

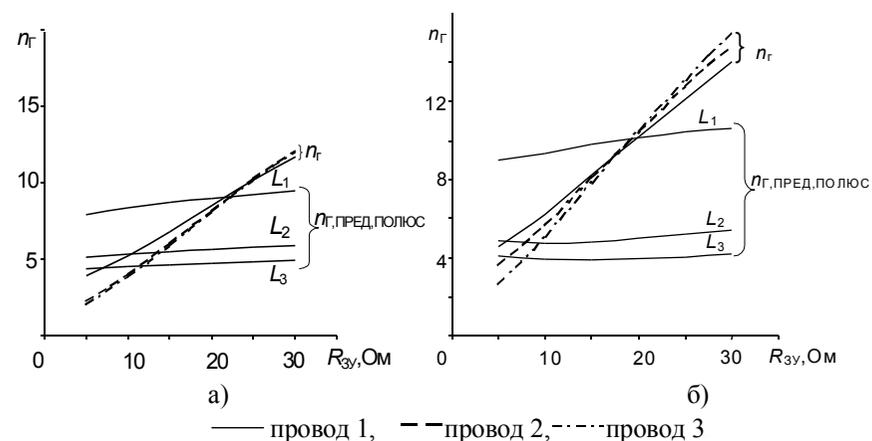


Рис. 3 – Результаты испытания имитационной модели для варианта «Барабашова – VAR» (а – $L_1 = 15$ км, $L_2 = 35$ км, $L_3 = 55$ км) и «Майская – VAR» (б – $L_1 = 10$ км, $L_2 = 30$ км, $L_3 = 50$ км)

Выводы. Исследования с использованием имитационной модели (см. рис. 3) позволили получить количественную оценку подтверждения того очевидного положения, что по критерию надежности при прочих равных исходных условиях увеличение длины ВЛ сопровождается снижением предельного значения сопротивления заземления опор.

Следует также отметить, что при известных условиях присоединения ВЛ к шинам питания (число и тип выключателя, кратность АПВ, длина ВЛ и другие влияющие факторы) выбор значения сопротивления ЗУ опор при условии $R_{3у} > R_{3у} \Big| n_{Г} = n_{Г,пред,полос}$

означает расходование ресурса линейных выключателей из-за грозовых отключений ВЛ за время меньшее, чем средний период планового ремонта выключателей $T_{П.Р.}$ и наоборот, при условии $R_{3у} < R_{3у} \Big| n_{Г} = n_{Г,пред,полос}$ коммутационный ресурс линейных

выключателей из-за грозовых отключений ВЛ за период $T_{П.Р.}$ израсходован не будет.

Список литературы: 1. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений, РД 153-34.3-35.125-99. – М.: РАО «ЕЭС России», 1999. – 184 с. 2. Гуль В.И. Моделирование грозовых перекрытий на воздушных линиях электропередачи с использованием метода статистических испытаний / В.И. Гуль, С.К. Березка // Энергетика и электрификация. – 2007. – №6. – С. 35–39. 3. Березка С.К. Модель волны тока молнии при расчетах грозоупорности воздушных линий электропередачи / С.К. Березка, А.А. Минченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”, випуск 11 (186), Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – С. 41-43. 4. Березка С.К. Удосконалення моделювання грозозахисту повітряних ліній електропередавання напругою 110 кВ та вище / С.К. Березка, А.А. Минченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції, ч. II, 01-03 червня 2011. – Харків, НТУ “ХПІ”. – 2011. – С. 195. 5. Березка С.К. Усовершенствованная математическая модель грозозащиты воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше и результаты её испытаний / С.К. Березка, А.А. Минченко // Вісник НТУ “ХПІ”. 36. наук. праць. Тем. вип.: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Харків, НТУ “ХПІ”. – 2011. – вип. 41. – С. 23-28. 6. Костенко М.В. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов / Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, К.П. Кадомская и др. / Под ред. М.В. Костенко – М.: Высшая школа, 1973. – 528 с. 7. Минченко А.А. Определение расчетных значений токов однофазных коротких замыканий, коммутируемых линейным выключателем при грозовых отключениях воздушной линии / А.А. Минченко, С.К. Березка // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №1. – С. 39-45.

Поступила в редколлегию 12.03.2012