

Виктория Белугина, Татьяна Ломан

Анализ работы дистанционной защиты от коротких замыканий на землю

Наиболее распространенной защитой линий электропередач от всех видов повреждений является дистанционная защита. Однако, при кз на землю через большое переходное сопротивление работа дистанционных измерительных органов не всегда эффективна. Разработанный алгоритм синтезирован по уточненной модели защищаемого объекта в режиме кз на землю. Получены оценки эффективности работы нового и классического алгоритмов дистанционной защиты линии в различных режимах кз на землю и при различных величинах переходного сопротивления в месте коротких замыканий. Результаты анализа показали, что новый алгоритм эффективнее классического.

Keywords: дистанционная защита, от короткие замыкания на землю, эффективность

I. ВВЕДЕНИЕ

В сетях 110-330кВ сложной конфигурации наиболее распространенной защитой линий электропередач от всех видов повреждений является дистанционная защита [1-3]. Дистанционные Измерительные органы (ДИО) оценивают состояние сети по параметрам контролируемого вектора сопротивления. Точность оценок зависит от внутренних и внешних факторов. К внутренним факторам относятся принятые допущения в моделях защищаемого объекта, лежащих в основе синтеза алгоритма ДИО, и неточность задания параметров сети и предаварийного режима, используемых в алгоритме в качестве констант. К внешним факторам относятся параметры аварийного режима, влияющие на работу ДИО, например, переходное сопротивление в месте короткого замыкания (кз), ток нагрузки и другие.

Классический алгоритм ДИО от кз на землю синтезирован по упрощенной модели защищаемого объекта без учета многих факторов [1-9]. Не соответствие моделируемых режимов, лежащих в основе синтеза классических алгоритмов ДИО, и реальных условий аварийного режима приводят к значительным погрешностям расчета вектора сопротивления прямой последовательности линии, особенно, при больших значениях переходного сопротивления в месте кз.

Алгоритмы, основанные на поисковых методах оптимизации [7,8], учитывают возможность наличия переходного сопротивления в месте кз, но для получения точных оценок необходимо задать начальные значения вектора искомым переменных близкими к оптимальным, а также знать граничные условия поиска. При этом вектор искомым параметров должен быть однородным, в противном случае целевая функция не будет иметь глобального минимума.

Проблеме повышения эффективности алгоритмов ДИО от кз на землю посвящена данная работа. Разработанный алгоритм синтезирован по уточненной модели защищаемого объекта в режиме однофазного кз на землю через переходное сопротивление.

Для анализа алгоритмов ДИО использовалась методика [4-6, 9], которая основана на отображении множества случайных значений контролируемого вектора, полученных методом статистических испытаний на плоскости характеристики срабатывания. Методика предназначена для оценки

эффективности функционирования ДИО в различных режимах контролируемого объекта и может быть применена для анализа, синтеза и оптимизации алгоритмов и параметров ДИО в статических и динамических режимах.

Полученные вероятностные оценки работы алгоритмов ДИО при однофазных кз в сети 110кВ представлены на плоскости характеристики срабатывания двухступенчатой дистанционной защиты линии. Такое отображение позволяет анализировать свойства разных алгоритмов и наглядно оценивать эффективность работы ДИО в зависимости от разных факторов.

II. ЗАДАЧИ АНАЛИЗА И КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Работа микропроцессорных ДИО построена на аналого-цифровом преобразовании трехфазной системы токов и напряжений контролируемого объекта. В общем случае алгоритм функционирования ДИО может быть представлен системой неравенств вида [4]

$$\chi[i(nT, S), u(nT, S), S, \Pi] > 0, \quad (1)$$

где

Π - набор параметров (коэффициенты цифровых фильтров, уставки, задающие, например, форму характеристики срабатывания и др.);

\mathcal{X} - набор операторов, задающих арифметические операции над отсчетами $i(nT), u(nT)$ и параметрами Π ;

$i(nT, S), u(nT, S)$ - совокупность отсчетов (результатов аналого-цифрового преобразования) контролируемых токов и напряжений;

S - совокупность параметров энергосистемы, определяющих протекание процессов в контролируемом объекте.

Задачи анализа ДИО сводятся к оценке оператора χ и параметров Π в условиях заданных значений вектора S при решении неравенства (1)

Совокупность отсчетов динамического режима $i(nT, S), u(nT, S)$ или статического режима $I(S), U(S)$ может рассматриваться как многомерная система случайных величин. Если предположить, что известна функция распределения этой системы случайных величин, а также известна функция потерь L , выражающая (возможно в

денежном выражении), ущерб, вызванный функционированием ДИО, то можно сформулировать задачу синтеза и анализа

$$P^* = \arg \min M[L(I(S), U(S), \Sigma)], \quad (2)$$

$$P^* \in [\Pi_D \Sigma_D],$$

где

M - знак математического ожидания ;

P^* - анализируемые значения параметров;

$\Pi_D \Sigma_D$ - значения параметров Π и структур Σ алгоритмов функционирования при анализе.

К сожалению, решение задачи синтеза и анализа в постановке (2) является практически не реальной из-за сложностей, возникающих при задании функции потерь $L(i, u)$ и функции распределения, необходимой для вычисления математического ожидания потерь.

Получение исходной информации для анализа существенно упрощается в случае ее перевода в класс многокритериальных и принятия в качестве оценок анализа условных вероятностей вида [2]:

1. Вероятность излишнего срабатывания P_{cp} при требовании к несрабатыванию;

2. Вероятность несрабатывания P_o при требовании к срабатыванию.

Связь между критериями P_{cp} и P_o и анализируемыми параметрами описывается многократными интегралами вида:

$$r = \int_{\Omega(\Pi)} ar(\omega) , \quad (3)$$

где

$F(S)$ - условная функция распределения влияющих на функционирование системных параметров S ;

$\Omega(\Pi)$ - область интегрирования, соответствующая выполнению предъявленных к ДИО требований и определяемая алгоритмом функционирования и параметрами алгоритмов.

Вероятностный подход не лишен недостатков, порожденных трудностями получения необходимой статистической информации, с одной стороны, и потерей наглядности и физического смысла причин, вызывающих неправильные действия анализируемых устройств с другой стороны.

Смешанный подход основан на использовании метода Монте Карло для статистического моделирования и на графическом представлении статистических оценок работы ДИО[4]. Это позволяет анализировать влияние физических процессов в контролируемом объекте на эффективность работы защиты.

При формировании статистической модели выделяются влияющие на работу устройства режимные параметры объекта, значения которых при внезапном изменении режимов носят случайный характер, и принимается допущение, что, на малых интервалах изменения переменных, эти параметры имеют равномерный закон распределения. Возможный диапазон изменения каждой переменной представляется как совокупность малых интервалов с использованием равномерного закона распределения случайных параметров на каждом интервале.

III. ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ДИО ОТ КЗ НА ЗЕМЛЮ

Эффективный алгоритм ДИО от кз на землю основан на решении системы уравнений узловых напряжений и токов, а также уравнений граничных условий при однофазном кз на землю через переходное сопротивление. При кз на защищаемой линии вектор напряжения на контролируемых шинах может быть представлен в виде совокупности трех векторов:

$$\dot{U}_{bus,i} = f(\bar{\Pi}_m, \bar{\Pi}_{const}, \bar{\Pi}_fl), \quad (4)$$

где

$\bar{\Pi}_m$ - вектор контролируемых параметров,

$\bar{\Pi}_{const}$ - вектор постоянных параметров,

$\bar{\Pi}_fl$ - вектор неизвестных параметров.

Схема защищаемого объекта представлена на рис 1. Дистанционное реле, установленное на подстанции (п/ст) А, контролирует состояние линии АВ по значениям вектора переменных параметров вида:

$$\bar{\Pi}_{m,i} = f(\dot{I}A_{ph}, \dot{I}A_0, \dot{I}A_1, \dot{U}_{bus,A}).$$

где

$\dot{I}A_{ph}$ - контролируемый защитой линии фазный ток от шин А;

$\dot{I}A_1, \dot{I}A_2, \dot{I}A_0$ - ток прямой, обратной и нулевой последовательности от шин А, контролируемый защитой линии;

$\dot{U}_{bus,A}$ - фазное напряжение на шинах А, контролируемое защитой линии.

Вектор постоянных параметров представляет собой совокупность констант и уставок необходимых для решения системы уравнений алгоритма ДИО. В данном случае принят следующий вектор:

$$\bar{\Pi}_{const} = f(\dot{K}_N, \dot{Z}B, \dot{Z}L, \dot{Z}A, \dot{U}_{EMF}).$$

где $\dot{K}_N = \frac{L \cup L}{3 \cdot \dot{Z}L_i}$ коэффициент компенсации токов нулевой последовательности;

$\dot{Z}L_1, \dot{Z}L_0$ - сопротивления линии прямой и нулевой последовательности, соответственно;

$\dot{Z}B_1$ - сопротивление прямой последовательности системы В;

\dot{U}_{EMF} - неизменное напряжение за сопротивлением системы В или ЕДС генераторов, приведенная к напряжению исследуемой сети.

При кз на землю на линии АВ вектор неизвестных параметров может быть определен следующими координатами:

$$\bar{\Pi}_fl = f(\dot{Z}AF_1, \dot{U}_{bus,B}, \dot{I}F_1, \dot{I}F_0, \dot{I}B_1, \dot{I}B_0, R_{fl}).$$

где

$\dot{Z}AF_1$ - сопротивление участка линии прямой последовательности от шин А до точки кз (F);

$\dot{I}F_0$ - суммарный ток нулевой последовательности в месте кз;

$\dot{I}B_1, \dot{I}B_2, \dot{I}B_0$ ток прямой, обратной и нулевой последовательности от шин В;

$\dot{U}_{bus,B}$ - фазное напряжение на шинах В;
 R_{fl} переходное сопротивление в месте кз.

Математическая модель защищаемого объекта представляется системой комплексных уравнений режима однофазного кз. Для нахождения вектора $\bar{\Pi}_{fl}$ из семи комплексных переменных составляется 7 уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{bus,A} &= \dot{Z}AF_1 * (\dot{I}A_{ph} + \dot{K}_N \cdot 3 \cdot \dot{I}A_0) + \dot{I}EF \cdot R_{fl} \\ \dot{U}_{bus,B} &= (\dot{Z}L_1 - \dot{Z}AF_1) * (\dot{I}B_{ph} + \dot{K}_N \cdot 3 \cdot \dot{I}B_0) + \dot{I}EF \cdot R_{fl} \\ \dot{U}_{bus,B} &= \dot{U}_{EMF} - \dot{Z}B_1 * \dot{I}B_{ph} - \dot{I}B_0 * (\dot{Z}B_0 - \dot{Z}B_1) \\ \dot{I}B_1 &= \dot{I}F_1 - \dot{I}A_1 \\ \dot{I}B_0 &= \dot{I}F_0 - \dot{I}A_0 \\ \dot{I}F_1 &= \dot{K}1_{cur} \cdot \dot{I}A_1 \\ \dot{I}F_0 &= \dot{K}0_{cur} \cdot \dot{I}A_0 \end{aligned} \right\} (5)$$

где

$$\dot{I}EF = 3 \cdot \dot{I}F_0;$$

$$\dot{K}1_{cur} = \frac{\dot{Z}B_1 + (\dot{Z}L_1 - \dot{Z}AF_1)}{\dot{Z}B_1 + \dot{Z}L_1 + \dot{Z}A_1} - \text{коэффициент}$$

токораспределения в схеме прямой последовательности;

$$\dot{K}0_{cur} = \dot{K}1_{cur} * \frac{\dot{I}A_1}{\dot{I}A_0} - \text{коэффициент токораспределения в}$$

схеме нулевой последовательности;

$$\dot{K}_N = \frac{\dot{Z}0_L - \dot{Z}1_L}{3 \cdot \dot{Z}1_L} - \text{коэффициент компенсации токов}$$

нулевой последовательностей;

$\dot{I}A_1, \dot{I}A_2, \dot{I}A_0$ - ток прямой, обратной и нулевой последовательности от шин А, контролируемый защитой линии;

$\dot{I}B_1, \dot{I}B_2, \dot{I}B_0$ ток прямой, обратной и нулевой последовательности от шин В.

Контролируемый вектор сопротивления прямой последовательности от места установки защиты до точки кз определяется на основе решения системы уравнений (5) и может быть представлен в следующем виде:

$$\dot{Z}1_{AF} = \frac{\dot{F}1(\bar{\Pi}_{m,i}, \bar{\Pi}_{const})}{\dot{F}2(\bar{\Pi}_{m,i}, \bar{\Pi}_{const})}, \quad (6)$$

Функции $\dot{F}1(\bar{\Pi}_{m,i}, \bar{\Pi}_{const})$ и $\dot{F}2(\bar{\Pi}_{m,i}, \bar{\Pi}_{const})$ вычисляются по известным параметрам передачи и значениям контролируемых параметров по следующим выражениям.

$$\begin{aligned} \dot{F}1 &= (\dot{U}_{bus,A} - \dot{U}_{base} - \dot{Z}B_1 * \dot{I}A_{ph} - \dot{Z}L_1 * (\dot{I}A_{ph} + \dot{K}_N \cdot 3 \cdot \dot{I}A_0) - \\ &- \dot{I}A_0 * (\dot{Z}B_0 - \dot{Z}B_1)) * (\dot{Z}B_1 - \dot{Z}L_1) + 3 * \dot{I}A_1 * \dot{Z}B_1 * (\dot{Z}A_1 + \dot{Z}L_1 + \dot{Z}B_1) + \\ &+ \dot{Z}L_1 (3 \dot{I}A_1 + \dot{K}_N \cdot 3 \cdot \dot{I}A_1) * (\dot{Z}A_1 + \dot{Z}L_1 + \dot{Z}B_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{F}2 &= (\dot{U}_{bus,A} - \dot{U}_{base} - \dot{Z}B_1 * \dot{I}A_{ph} - (\dot{Z}B_0 - \dot{Z}B_1) * \dot{I}A_0 - \\ &- \dot{Z}L_1 * (\dot{I}A_{ph} + \dot{K}_N \cdot 3 \cdot \dot{I}A_0)) + \\ &+ (\dot{Z}A_1 + \dot{Z}L_1 + \dot{Z}B_1) * (3 \dot{I}A_1 + \dot{K}_N \cdot 3 \cdot \dot{I}A_1) \end{aligned}$$

Работа алгоритма ДИО от кз на землю, использующего выражение (6), не зависит от величины переходного сопротивления в месте кз на землю.

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОНТРОЛИРУЕМОГО ОБЪЕКТА И ЗАЩИТЫ

Программа анализа алгоритмов ДИО основана на совместном моделировании режимов контролируемого объекта и работы ДИО при вероятностных значениях вектора параметров системы S и на получении вероятностных оценок контролируемых параметров, которые имеют цветное представление на плоскости характеристики срабатывания. Токи и напряжения контролируемого объекта замерыемые защитой могут быть представлены следующими функциями:

$$\underline{I}(S) = \theta 1(\varphi, \delta, L_f, R_f); \quad \underline{U}(S) = \theta 2(\varphi, \delta, L_f, R_f) \quad (7)$$

где S - вектор режимных параметров $\varphi, \delta, L_f, R_f, E$;

φ - угол сопротивления системы;

δ - угол между векторами напряжений по концам линии;

L_f - расстояние до кз;

R_f - переходное сопротивление в месте кз.

Для получения вероятностных оценок о функционировании ДИО контролируемый вектор сопротивления многократно пересчитывается по случайным значениям векторов токов $\underline{I}(S)$ и напряжений $\underline{U}(S)$ для каждого рассматриваемого режима энергосистемы. При этом на экране дисплея образуется множество точек, отображающих оценки контролируемого сопротивления на плоскости, где одновременно отображаются и характеристики срабатывания ДИО. Используя цветное отображение отдельных областей, соответствующих разным диапазонам изменения характерных режимных параметров вектора S получаем возможность анализа свойств и оценки эффективности функционирования ДИО в различных режимах контролируемого объекта. Это помогает понять причины излишних срабатываний или отказов моделируемых ДИО и принять рациональное решение по выбору характеристик срабатывания и уставок защиты для любого алгоритма ДИО.

Классический алгоритм ДИО контролирует вектор сопротивления прямой последовательности по значениям токов и напряжений, замеряемых со стороны подстанции А и использует выражение вида

$$\dot{Z}_{1m} = \frac{\dot{U}_{A_{ph}}}{\dot{I}_{A_{ph}} + \dot{K}_N \cdot \dot{I}_{EF,A}}, \quad (8)$$

где

$$\dot{K}_N = \frac{\dot{Z}_{0L} - \dot{Z}_{1L}}{3 \cdot \dot{Z}_{1L}}$$

коэффициент компенсации токов нулевой

последовательности;

$\dot{Z}_{L1}, \dot{Z}_{L0}$ - сопротивления линии прямой и нулевой

последовательности, соответственно;

$$\dot{I}_{EF,A} = 3 \cdot \dot{I}_{A0}$$

$\dot{I}_{A0}, \dot{I}_{A_{ph}}$

ток прямой, обратной и нулевой последовательности от шин А, контролируемый защитой линии;

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В этом разделе представлены результаты компьютерного моделирования работы алгоритмов ДИО от кз на землю в сети 110кВ, представленной на рис. 1. Рассматривалась работа дистанционной защиты линии W, установленной на подстанции А, при кз на землю через переходное сопротивление в первой и второй зонах защиты. Предполагалось, что первая зона охватывает 85% линии, а вторая зона охватывает 120% линии.

Исследуемая модель системы содержит защищаемую линию АВ длиной 100км с удельными параметрами активного $R1=0.2\text{Om/km}$; $R0=0.4\text{Om/km}$ и реактивного $X1=0.4\text{Om/km}$; $X0=1.2\text{Om/km}$ сопротивлений и системы со следующими значениями индуктивных сопротивлений: $XА=100\text{Om}$, $XВ=200\text{Om}$.

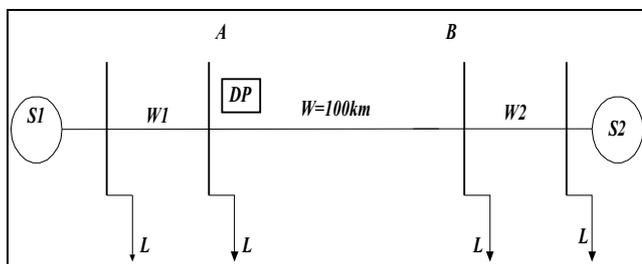


Рис.1. Схема электрической системы для анализа алгоритмов ДИО

Исследовалась эффективность работы алгоритмов ДИО в режимах однофазных кз при изменении величины переходного сопротивления в месте кз в следующем диапазоне $0 < R_f < 50\Omega$.

Цифровая дистанционная защита имеет четырехугольную характеристику срабатывания. По оси реактивного сопротивления характеристику ограничивает прямая параллельная оси R. Это обеспечивает компенсацию влияния тока нагрузки на замер сопротивления при к.з. на землю. Уставки области срабатывания в реактивном направлении независимы для каждой отдельной зоны. Прямая линия, ограничивающая область срабатывания ДЗ по оси активного сопротивления, параллельная вектору сопротивления линии. Это означает, что угол наклона этой стороны характеристики к оси R равен углу линии φ_L . Уставки области срабатывания в направлении активного сопротивления независимы для каждой отдельной зоны. Направленная характеристика во втором квадранте с осью X

составляет угол 25^0 . Соответственно в четвертом квадранте с осью R составляет угол 15^0 .

На рис.2 показана комплексная плоскость характеристики срабатывания и множество значений вектора сопротивления, вычисленных по классическому алгоритму ДИО (8) при однофазных кз в первой (рис.2а) и второй (рис.2б) зонах дистанционной защиты линии W, и, окрашенных в зависимости от величины переходного сопротивления в месте кз. Цветное отображение вектора сопротивления иллюстрирует влияние переходного сопротивления в месте кз на работу алгоритма ДИО. Начиная от вектора сопротивления линии цветные области точек соответствуют различным диапазонам изменения величины переходного сопротивления в месте кз:

$0 < R_f > 5\Omega$; $5 < R_f > 10\Omega$; $10 < R_f > 20\Omega$; $20 < R_f > 30\Omega$.

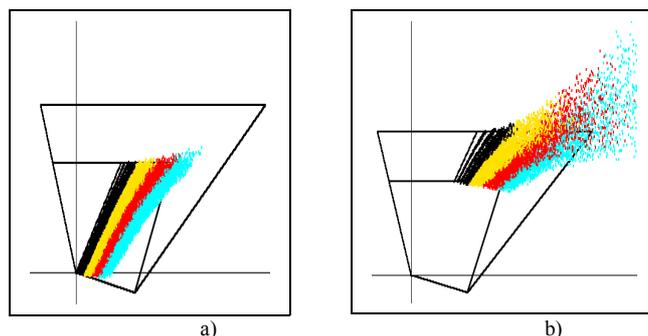


Рис.2. Характеристики срабатывания ДИО и статистические оценки работы классического алгоритма (8) при однофазном кз : а) в первой зоне защиты линии АВ; б) в второй зоне защиты линии АВ.

На рис.3 показана комплексная плоскость характеристики срабатывания и множество значений вектора сопротивления, вычисленных по разработанному алгоритму ДИО (6) при однофазных кз в первой и второй зонах дистанционной защиты линии W в случаях изменения переходного сопротивления в диапазоне: $0 < R_f > 50\Omega$.

Разработанный алгоритм ДИО от кз на землю обеспечивает эффективную работу во всех режимах кз.

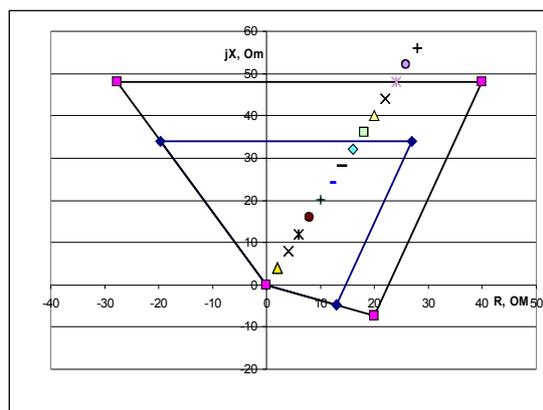


Рис.3. Характеристика срабатывания ДИО и оценки работы алгоритма (6) при однофазном кз в первой зоне и второй зоне защиты линии АВ

VI. ВЫВОДЫ

1. Разработанный алгоритм ДИО синтезирован по уточненной математической модели защищаемого объекта в режиме однофазного кз.

2. Полученные вероятностные оценки работы алгоритмов ДИО на плоскости характеристики срабатывания двухступенчатой дистанционной защиты линии позволяют анализировать свойства разных алгоритмов и оценивать эффективность работы в зависимости от разных факторов.

3. Результаты исследования показали, что эффективность разработанного алгоритма ДИО не зависит от величины переходного сопротивления в месте кз.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Эта работа выполнена при содействии Европейского социального фонда в рамках проекта «Поддержка развития докторантуры РТУ» Национальной программы «Содействие осуществлению программ докторантуры и исследований после неё».

ЛИТЕРАТУРА

[1] Application Guide on Protection of Complex Transmission Network Configurations. CIGRE, 1991.

- [2] В.Л. Фабрикант, *Дистанционная защита*, Москва, 1978, 215с
 [3] *SIPROTEC 7A522 Distance Protection*, Manual, SIEMENS AG, 1999.
 [4] T.Loman, A.Sauhatas, A.Voinovska, Statistical analysis of digital distance protection// Intern.Conf. IEEE Power Tech '99 Budapest, Hungarija, 1999.
 [5] T.Loman, A.Sauhatas, A.Voinovska, Estimations of Distance Protection Efficiency// 9th Intern.Conf. APE'99, Gdansk, Poland, 1999.
 [6] T.Loman, A.Sauhatas, Analysis of Distance Measuring Units Operation// 4th Intern.Conference CPS2000 Bratislava, Slovak Republik, 2000.
 [7] T.Loman, A.Voinovska, New algorithm of distance relay // The 5th International Conf. CP&HS, May 21-22., 2002, Zlín, Chesk. Republic.
 [8] T.Loman, R. Koemecs, V. Belugina, *The Digital Distance Relays on the base of the Optimization Methods*, RSEE'2004, University of Oradea, Oradea, Romania, 2004.
 [9] А. С. Саухатас, Т.Ломан, *Оценка эффективности дистанционных измерительных органов* // ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА, темтичний випуск "ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ", Частина 3 // НАН України, ВИДЦЛЕННЯ ФІЗИКО ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГЕТИКИ, Київ, 2002, С.102-105.

ADDRESSES OF AUTHORS

Viktorija Belugina, M.sc.ing, post-graduate student of Riga Technical University, Institute of Power Engineering
 Address: Kronvalda bulv., 1, Riga, LV-1010, Latvia

Tatjana Loman, Dr.sc.ing., Asoc. Professor of Riga Technical University, Institute of Power Engineering
 Address: Kronvalda bulv., 1, Riga, LV-1010, Latvia
 E-mail: loman@eef.rtu.lv