

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕЛЬКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРИ РАЗЛИЧНОМ КОНСТРУКТИВНОМ ИСПОЛНЕНИИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ЗАЗЕМЛЕНИИ НЕЙТРАЛИ

В.В. Бирюков, Л.П. Костюченко

*В статье приведены результаты компьютерных экспериментов по исследованию электромагнитных переходных процессов, возникающих при однофазных замыканиях на землю в воздушных электрических сетях напряжением 10 кВ. Дана сравнительная оценка параметров процессов для сетей, выполненных голыми и защищенными изоляцией проводами при различных режимах заземления нейтрали.*

*Ключевые слова: замыкание, электрическая сеть, имитационная модель, заземление, нейтраль, перенапряжение.*

Особенностью систем сельского электроснабжения является большая протяженность сетей, которые выполняются, преимущественно воздушными линиями (ВЛ) с голыми алюминиевыми проводами. В последнее время, при реконструкции и проектировании новых сетей все чаще применяют в сетях напряжением 6-35 кВ самонесущие изолированные провода (СИП), изоляция которых выполнена из светостойкого термостабилизированного (сшитого) полиэтилена. В соответствии с пунктом 2.4 ПУЭ седьмого издания [1] воздушные сети напряжением ниже 1000 В, выполненные с применением изолированных проводов имеют аббревиатуру ВЛИ. В данной работе эта аббревиатура применена нами к сетям напряжением 10 и 35 кВ, которые выполнены защищенными изоляцией проводами. Параметры таких проводов отличаются от параметров голых алюминиевых проводов, и могут существенно повлиять на характер переходных процессов, особенно при возникновении однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) и в связи с этим на выбор режима заземления нейтрали. В таблице 1 для сравнения приведены основные параметры линий напряжением 10 кВ, выполненных проводами марок АС и защищенными

изоляцией проводами финского производства марок SAX-W, которые по конструкции аналогичны проводам 10 кВ, выпускаемым отечественной промышленностью марки СИП-3. Для сравнения здесь же приведены параметры финских проводов марки SAXKA (три провода в одном жгуте по аналогии с проводами отечественного производства для сетей ниже 1000 В).

Как видно из таблицы наиболее существенно у сетей, выполненных защищенными изоляцией проводами по сравнению с голыми проводами, отличается величина рабочей емкости, которая в зависимости от принятого режима работы нейтралей сети может оказать значительное влияние на величину тока однофазного замыкания на землю.

Традиционно сложилось, что электрические сети напряжением 6 – 35 кВ в нашей стране работают с изолированной или компенсированной нейтралью. Причем компенсация емкостного тока замыкания на землю применяется в большинстве случаев для кабельных сетей, которые используются для питания в основном городских потребителей. Кроме того для сельских электрических сетей в отличие от городских сетей в соответствии

Таблица 1 – Основные параметры проводов на напряжении 10 кВ

Марка провода	АС		SAX-W		SAXKA	
	70	120	70	120	70	120
Сечение, мм <sup>2</sup>	70	120	70	120	70	120
Удельное активное сопротивление $r_0$ , Ом/км	0,46	0,27	0,49	0,29	0,44	0,25
Удельное индуктивное сопротивление $x_0$ , Ом/км	0,341	0,324	0,342	0,325	0,138	0,126
Рабочая емкость линии $c_0$ , мФ/км	0,011	0,0113	0,024	0,0252	0,19	0,23

с их особенностями предусматривается защита от атмосферных перенапряжений и практически они не требуют защиты от коммутационных перенапряжений, однако в связи с широким применением вакуумных выключателей и для сельских сетей этот вопрос стал актуальным.

Целью данной работы является сравнительная оценка кратности коммутационных перенапряжений в сельских электрических сетях, выполненных защищенными проводами и голыми алюминиевыми проводами при различных способах заземления нейтрали, и оценка степени влияния параметров электрических сетей на характер протекания и количественные величины параметров переходных процессов.

В качестве объекта исследования рассматривался участок сельской распределительной сети 10 кВ, получающей питание от подстанции «Дрокино» Красноярских электрических сетей. На подстанции установлены два трансформатора типа ТМН – 6300/35/10 со схемой соединения обмоток Y/Δ. Общая протяженность отходящих от шин подстанции воздушных линий напряжением 10 кВ составляет 72 км. Подстанция получает питание по двум воздушным линиям напряжением 35 кВ. Моделировались процессы коммутации и однофазное замыкание в линии 10 кВ с односторонним питанием протяженностью 15 км. В нормальном режиме, нагрузка сети составляет  $1500+j500$  кВА.

Для оценки переходных процессов, происходящих в сети с различным заземле-

нием нейтрали необходимо создание математической модели электромагнитных переходных процессов. Наиболее полно эти процессы описываются системой дифференциальных уравнений. В настоящее время для моделирования таких процессов имеется мощный инструмент моделирования электроэнергетических систем в виде программы MATLAB [2-4]. Программа позволяет, создать имитационную модель сети, что особенно ценно в условиях ограниченных возможностей проведения экспериментов в действующих электрических сетях 10 – 35 кВ. Для создания модели работы сети нами использовался пакет прикладных программ моделирования динамических систем Simulink программы MATLAB.

Схема модели сети представлена на рисунке 1. Модель состоит из трех источников синусоидального напряжения *AC Voltage Source*; воздушной линии электропередачи, которая моделировалась по П-образной схеме замещения линии с сосредоточенными параметрами блоками *Series RLC Branch* с учетом емкостей фаза-земля; ключей *Ideal Switch*, с помощью которых моделировалось отключение трех фаз. Блок *Breaker* – моделирует металлическое замыкание фазы «А» на землю, измерительные блоки *Current Measurement* и *Voltage Measurement* предназначены для измерения тока и напряжения соответственно; с помощью осциллографа *Scope* фиксируются значения параметров в

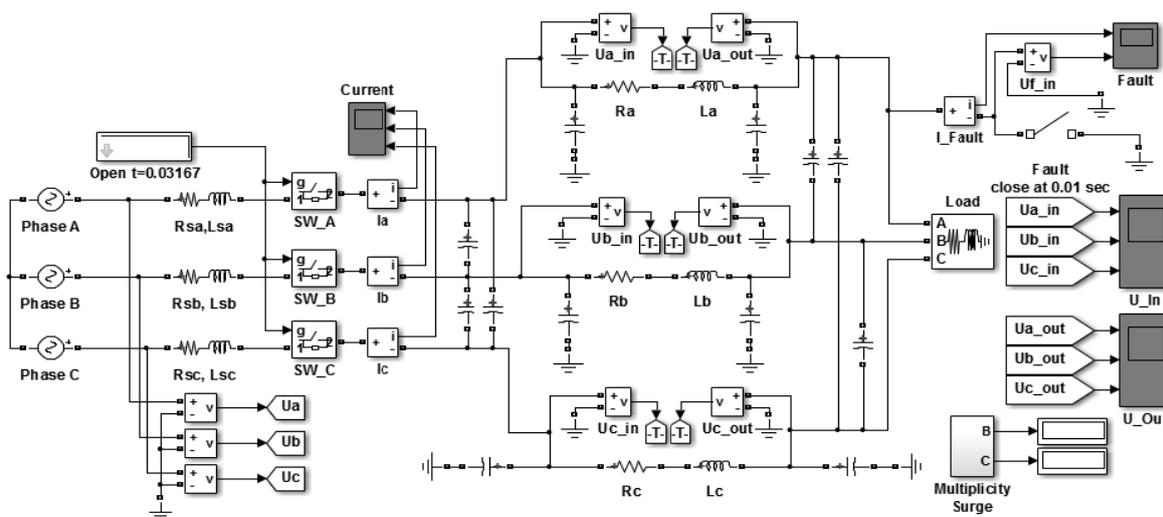


Рисунок 1 – Имитационная модель сети 10 кВ в программе MATLAB приложении Simulink

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕЛКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРИ РАЗЛИЧНОМ КОНСТРУКТИВНОМ ИСПОЛНЕНИИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ЗАЗЕМЛЕНИИ НЕЙТРАЛИ

переходном режиме сети. Блок пользователя *Powergui* определяет модуль и фазу напряжения и тока в установившемся режиме (начальные значения интегрируемых переменных).

В стандартном наборе элементов библиотеки Simulink нет блока для определения кратности перенапряжений, поэтому нами был создан блок *Multiplicity Surge* на базе Simulink-элементов, схема блока представлена на рисунке 2. Здесь: блок *MinMax* – предназначен для выбора максимального (минимального) значения из массива сигналов, поступающих на его вход; блок *Memory* – выполняет задержку входного сигнала на один временной такт (шаг интегрирования), служит накопителем максимального мгновенного значения напряжения; блок *Abs* – выполняет вычисление абсолютного значения величины сигнала; блок *Product* – осуществляет вычисление текущих значений сигналов.

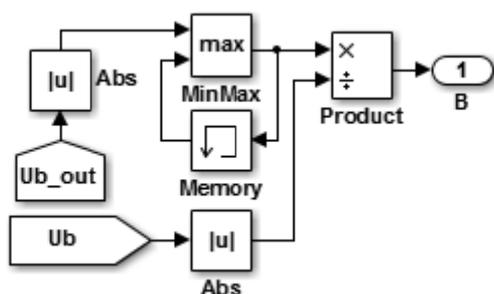


Рисунок 2 – Схема блока Multiplicity Surge

На рисунке 3 показаны расчетные значения параметров установившегося режима сети, полученные с помощью блока *Powergui*, которые полностью совпадают с расчетами установившегося режима, выполненного нами аналитически.

Для анализа величин перенапряжений при коммутациях в рассматриваемой сети при различном исполнении нейтрали на полученной модели проведена серия экспериментов по исследованию величин и характера перенапряжений при отключении линии работающей в режиме однофазного замыкания на землю.

При проведении серии вычислительных экспериментов на имитационной модели, изменялись параметры схемы замещения линии электропередачи в соответствии с каталожными данными проводов для голых и защищенных изоляцией проводов приведенных в таблице 1, вид заземления нейтральной точки сети. Во всех экспериментах использо-

ваны провода с площадью поперечного сечения 70 мм<sup>2</sup>.

```

2 SimPowerSystems Report.
3 generated by powergui,
4
5 Measurements at 50 Hz :
6
7 0.0000e+00 Vrms    0.00°  --> U_Ufa_out
8 5.7735e+03 Vrms    0.00°  --> U_Ua
9 5.7718e+03 Vrms   -0.24°  --> U_Ua_in
10 5.2100e+03 Vrms   -0.39°  --> U_Ua_out
11 5.7735e+03 Vrms  -120.00° --> U_Ub
12 5.7718e+03 Vrms  -120.24° --> U_Ub_in
13 5.2099e+03 Vrms  -120.39° --> U_Ub_out
14 5.7735e+03 Vrms  120.00°  --> U_Uc
15 4.3053e-02 Vrms   89.46°  --> U_Uc1
16 5.7718e+03 Vrms  119.76°  --> U_Uc_in
17 5.2100e+03 Vrms  119.61°  --> U_Uc_out
18 5.2100e+03 Vrms   -0.39°  --> U_Ufa_in
19 5.2100e-04 Arms   -0.39°  --> I_I_Fault
20 8.0229e+01 Arms   -13.49°  --> I_Ia
21 8.0228e+01 Arms  -133.49° --> I_Ib
22 8.0228e+01 Arms   106.51° --> I_Ic
23
24 Sources at 50 Hz :
25
26 5.7735e+03 Vrms    0.00°  --> U_Phase A
27 5.7735e+03 Vrms  -120.00° --> U_Phase B
28 5.7735e+03 Vrms   120.00° --> U_Phase C
    
```

Рисунок 3 – Результаты расчета установившегося режима сети с помощью блока *Powergui*

Работа имитационной модели сети осуществляется следующим образом:

1. В начальный момент времени ( $t_0 = 0$ ) схема работает в нормальном режиме;

2. В момент времени  $t_1 = 1/4T$  (где  $T$  – период промышленной частоты) происходит однофазное замыкание фазы А на землю через блок *Breaker*.

3. Во втором периоде колебаний, когда амплитуда фазы В достигает максимального значения, происходит отключение трех фаз нагруженной линии от источника питания.

В процессе эксплуатации, емкость сети может изменяться в широких пределах, за счет изменения количества подключенных к шинам подстанции фидеров, а также реконструкции сети, эксперименты проведены для эквивалентной емкости сети, выполненной голыми и защищенными изоляцией проводами соответствующей длине линии 72 км.

В сети с компенсированной нейтралью эксперименты проведены для случая расстройки компенсации 10% [5]. Для нейтрали заземленной через резистор, сопротивление высокоомного резистора принято 1000 Ом, а

В.В.БИРЮКОВ, Л.П.КОСТЮЧЕНКО

низкоомного 100 Ом. Кратность перенапряжений определялась по отношению к амплитуде фазного напряжения сети.

Для примера на рисунках 4 – 6 приведены компьютерные осциллограммы изменения напряжения фаз в момент возникновения однофазного замыкания и последующего отключения трех фаз от источника питания для нагруженной линии, а на рисунке 7 осцилло-

грамма напряжений при возникновении перемежающейся дуги.

В таблице 2 приведены значения токов однофазного замыкания на землю для рассматриваемой схемы сети в зависимости от ее конструктивного исполнения и вида заземления нейтрали.

Таблица 2 – Результаты замеров токов однофазного замыкания на землю (А), на имитационной модели сети

№ п.п.	Вид заземления нейтрали	Марка провода		
		АС – 70	SAX-W-70	SAXKA-70
1	Изолированная	1,9	4,2	33,1
2	Низкоомное	35,0	35,1	46,9
3	Высокоомное	6,0	7,0	33,3
4	Компенсированная	0,3	0,6	4,4

Таблица 3 – Кратности перенапряжений в сети в зависимости от типа провода и режима заземления нейтрали

Место измерения и регистрации перенапряжений	Кратность перенапряжений в сети 10 кВ при нейтрали:							
	Изолированная		Компенсированная		Высокоомное заземление		Низкоомное заземление	
	ВЛ	ВЛИ	ВЛ	ВЛИ	ВЛ	ВЛИ	ВЛ	ВЛИ
<b>Однофазное замыкание на землю в конце линии</b>								
На шинах	1,9	1,7	1,77	1,73	1,87	1,7	1,69	1,65
	1,82	1,79	1,69	1,74	1,82	1,79	1,78	1,75
В конце линии	1,93	1,72	1,68	1,75	1,89	1,73	1,72	1,68
	1,82	1,82	1,57	1,76	1,82	1,81	1,78	1,76
<b>Однофазное замыкание на землю в начале линии</b>								
На шинах	2,69	2,34	2,59	2,34	2,55	2,3	2,1	2,07
	2,66	2,27	2,55	2,27	2,49	2,23	1,97	1,97
В конце линии	2,63	2,57	2,57	2,57	2,61	2,52	2,14	2,2
	2,6	2,46	2,42	2,46	2,54	2,4	1,99	2,05
<b>Отключение нагруженной линии при наличии в сети ОЗЗ</b>								
На шинах	2,59	1,61	1,77	1,56	2,51	1,61	2,07	1,57
	2,55	1,7	1,69	1,75	2,45	1,7	1,95	1,66
В конце линии	2,9	1,74	1,68	1,64	2,82	1,74	2,31	1,69
	2,73	1,8	1,57	1,84	2,62	1,8	2,1	1,76
<b>Включение нагруженной линии при наличии в сети ОЗЗ</b>								
На шинах	3,13	1,66	2,71	1,75	3,11	1,65	3,01	1,6
	2,99	1,7	2,19	1,08	2,96	1,71	2,75	1,67
В конце линии	3,44	1,79	2,88	3,1	3,43	1,79	3,31	1,74
	3,23	2,6	2,32	1,27	3,2	2,6	2,97	2,6
<b>Отключение ненагруженных линий при наличии в сети ОЗЗ (в конце линии)</b>								
На шинах	2,63	1,67	1,89	1,71	2,55	1,69	2,1	1,65
	2,6	1,79	1,69	1,74	2,49	1,79	1,97	1,75
В конце линии	2,69	1,74	1,92	1,75	2,61	1,73	2,14	1,68
	2,66	1,82	1,71	1,76	2,55	1,8	1,99	1,76

Примечание: В таблице приведены значения кратностей перенапряжений возникающих в линии электропередачи в неповрежденных фазах «В» – верхняя строка и «С» – нижняя строка.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕЛКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРИ РАЗЛИЧНОМ КОНСТРУКТИВНОМ ИСПОЛНЕНИИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ЗАЗЕМЛЕНИИ НЕЙТРАЛИ

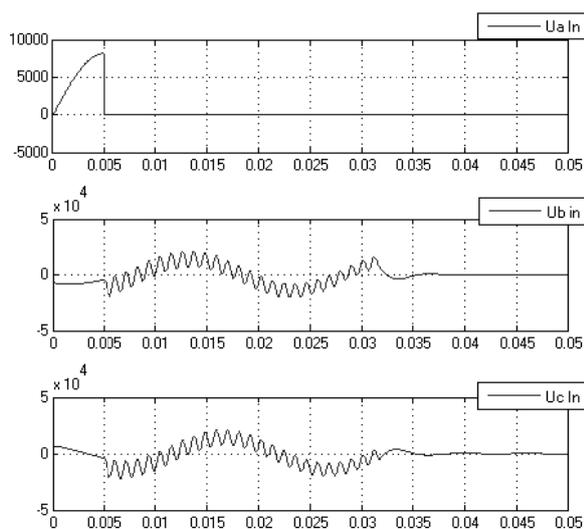


Рисунок 4 – Осциллограммы напряжений в начале нагруженной линии, выполненной голыми проводами в сети с изолированной нейтралью при ОЗЗ на шинах

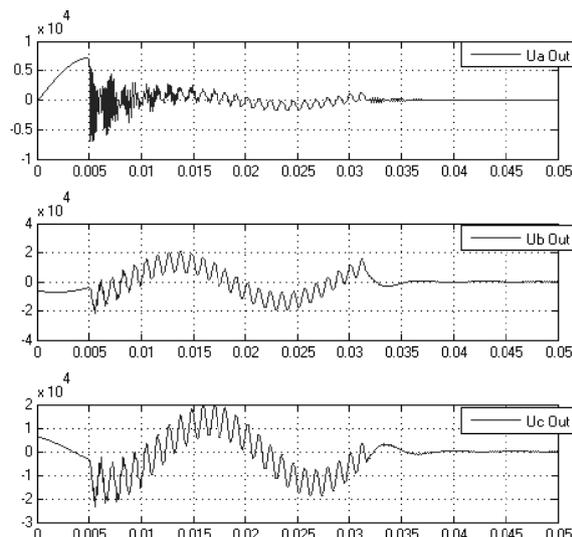


Рисунок 5 – Осциллограммы напряжений в конце нагруженной линии, выполненной голыми проводами в сети с изолированной нейтралью при ОЗЗ на шинах

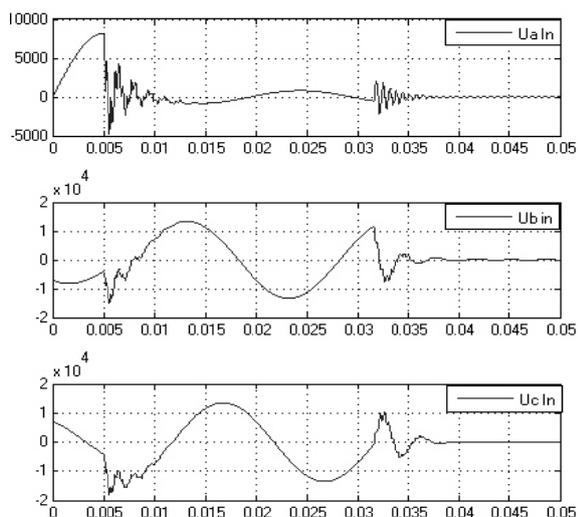


Рисунок 6 – Осциллограммы напряжений в начале нагруженной линии, выполненной изолированными проводами в сети с высокоомным заземлением нейтрали при ОЗЗ в конце линии

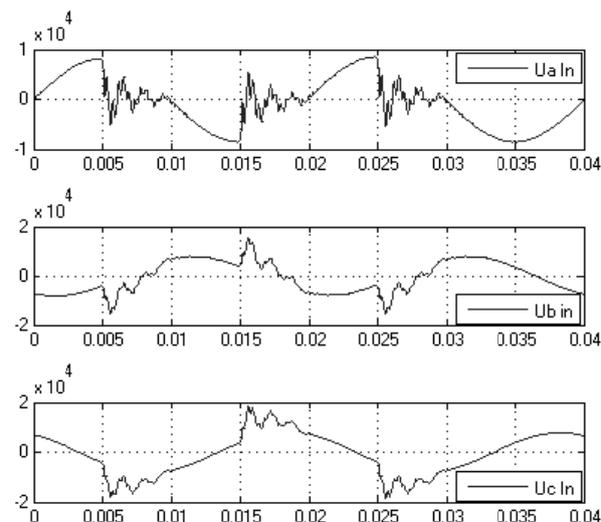


Рисунок 7 – Осциллограммы напряжений в начале нагруженной линии, выполненной изолированными проводами в сети с изолированной нейтралью при ОЗЗ и повторном зажигании дуги в конце линии

Выводы:

1. При глухих однофазных замыканиях на землю наиболее существенное влияние на уровни перенапряжений и величину емкостных токов на землю оказывает начальная фаза напряжения – чем ближе к амплитудному значению напряжение поврежденной фазы к моменту замыкания на землю, тем выше перенапряжения в сети и емкостный ток в месте однофазного замыкания на землю.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4 2012

2. В сети с резистивным заземлением нейтрали величина перенапряжений ниже, чем в сети с изолированной и компенсированной нейтралью, а величины токов однофазного замыкания в сети с изолированной нейтралью и высокоомным заземлением нейтрали практически одинаковы (таблица 2). Поэтому в сетях с применением защищенных изоляцией проводов целесообразно применять резистивное заземление нейтрали.

3. Как показали исследования, проведенные на модели, токи однофазного замыкания в сети 10 кВ с изолированной нейтралью, выполненной защищенными изоляцией проводами, превышают токи в сети с проводами АС в 2,2 раза (при проводах SAX-W-70) и в 17,4 раз (при проводах SAXKA-70). Это обстоятельство приводит к необходимости применять средства ограничения тока замыкания или исключать возможность работы сети с замкнутой на землю фазой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок – ПУЭ [Текст]. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.
2. Дьяконов, В.П. MATLAB и Simulink в электроэнергетике. Справочник [Текст]. / В.П. Дьяконов, А.А. Пеньков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 816 с.
3. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink [Текст]. / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. – 288 с.

4. Костюченко, Л.П. Имитационное моделирование систем сельского электроснабжения в программе MATLAB: учеб. пособие [Текст]. / Л.П. Костюченко. Краснояр. гос. аграр. ун-т.– Красноярск 2012, – 215 с.

5. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учебное пособие [Текст] / Р.А. Вайнштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 118 с.

**Бирюков Василий Викторович**, аспирант, каф. «Электроснабжение сельского хозяйства», ФГБОУ ВПО Красноярский государственный аграрный университет, тел. 8(391) 227-10-62, E-mail: [esn@kgau.ru](mailto:esn@kgau.ru)

**Костюченко Лидия Петровна**, доц., каф. «Электроснабжение сельского хозяйства», ФГБОУ ВПО Красноярский государственный аграрный университет, тел. 8(391) 227-10-62, E-mail: [esn@kgau.ru](mailto:esn@kgau.ru)