

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Владимир Владимирович Картавец
Дмитрий Николаевич Афоничев
Юрий Михайлович Помогаев

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Из-за большой размерности задачи оптимизации структуры электрической сети и сложности связей между переменными применяются алгоритмы пошагового решения, выполняющие целенаправленный перебор вариантов. Ряд методов обеспечивает поиск глобального оптимума, но для достижения приемлемого времени решения необходимо существенно упростить функцию затрат линии электропередачи в зависимости от ее параметров. При использовании более строгих связей может быть определен лишь локальный оптимум, но существуют возможности за счет ослабления жесткости алгоритма значительно снизить трудоемкость решения задачи определения оптимальной структуры сети, сохранив при этом (в неявном виде) связь целевой функции с основными параметрами линии: напряжением и сечением проводов. Предварительно оптимальный вариант с заданными параметрами может быть определен путем сравнения между собой нижних границ для соседних подмножеств. При этом деление на подмножества осуществляется последовательно по признаку числа цепей, номинального напряжения, стандартного сечения проводов. После этого отброшенные подмножества должны быть проверены на возможность улучшения предварительно оптимального варианта с целевой функцией. Получено выражение, которое может быть использовано для оценки вариантов структуры сети. Изложена методика оптимизации структуры сети, реализованная в виде ряда программ на вычислительном комплексе и позволяющая учитывать ограничения по надежности в виде правил построения структуры сети. Предусмотрена также возможность решения задачи при наличии небольшого числа замкнутых контуров (до четырех). При этом выполняется расчет балансовых перетоков мощности в соответствии с реактивными сопротивлениями ветвей и выбираются оптимальные параметры проектируемых ветвей с помощью итеративного процесса. Использование такого комплекса для анализа небольших участков сети совместно с моделями более полной системы позволит повысить эффективность проектных решений за счет расширения круга рассматриваемых вариантов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электропередача, электрическая сеть, узел, мощность, затраты, структура.

OPTIMIZATION OF STRUCTURE AND PARAMETERS OF ELECTRIC POWER SUPPLY NETWORKS

Vladimir V. Kartavtsev
Dmitriy N. Afonichev
Yuriy M. Pomogaev

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Due to high dimension of the problem of optimizing the structure of the electrical network and the complexity of the links between variables, step-by-step algorithms are used for performing targeted search of options. A number of methods provide global optimum searching, but to achieve a reasonable amount of solution time it is necessary to simplify significantly cost function of power line depending on its parameters. When using strict couplings, only the local optimum can be determined, but there are opportunities due to the weakening of the algorithm stickiness to reduce significantly the complexity of solving the problem of determining the optimal network structure, having preserved (implicitly) the connection of the efficiency function with the main parameters of the line: i.e. voltage and line conductor cross-section. The best pre-developed option for the network structure with the preset parameters can be determined by comparing the low bounds for neighboring subsets. At the same time, the process of subsets separating is carried out sequentially on the basis of the number of circuits, nominal voltage, and classical line conductor cross-section. After that, the neglected subsets should be checked for the possibility of improving the pre-developed option with the efficiency function. The authors found an expression that can be used at assessment of the network structure options; presented network structure optimization technique implemented in the form of a number of programs of the computer system. These arrangements take into account limitations on reliability in terms of network structure building rules, as well as the problem solution in the presence of a small number of closed circuits (up to four). In this case, the balance power exchange should be

calculated in accordance with the reactive resistance of the arms of a network, and the optimal parameters of the projected arms should be selected by means of an iterative process. The use of such a complex for the analysis of small sections of a network together with the models of a more complete system will improve the efficiency of design solutions by expanding the range of options under consideration.

KEYWORDS: power transmission, electrical network, network node, power, cost, structure.

Существующие модели и методы оптимизации развития электрических сетей [1, 3, 9, 10] предполагают строгую формализацию задачи отыскания структуры сети, обеспечивающей минимум суммарных приведенных затрат. При этом ввиду большой размерности задачи и сложности связей между переменными применяются алгоритмы пошагового решения, выполняющие целенаправленный перебор вариантов. Ряд методов (ветвей и границ, динамического программирования и др.) обеспечивает поиск глобального оптимума, но для достижения приемлемого времени решения необходимо существенно упростить функцию затрат линии электропередачи в зависимости от ее параметров. При использовании более строгих связей может быть определен лишь локальный оптимум (градиентные методы, покоординатного спуска и др.) [1, 3, 9, 10]. Однако за счет ослабления жесткости алгоритма существуют возможности значительно снизить трудоемкость решения задачи определения оптимальной структуры сети, сохранив при этом (в неявном виде) связь целевой функции с основными параметрами линии: напряжением и сечением проводов.

В ряде работ [4, 6] показано, что приведенные затраты на электропередачу, включающую воздушную линию (ВЛ) и понижающую подстанцию на ее конце, могут быть представлены в виде

$$Z = a + bU^2 + cF + \frac{d}{U^2F}, \quad (1)$$

где U – напряжение ВЛ, В;

F – сечение проводов фазы, мм².

Обобщенные коэффициенты a, b, c, d модели (1) определяются по формулам:

$$\begin{aligned} a &= A_{ПС} q_{ПС} p_{ПС} + C_{ПС} q_{ПС} p_{ПС} \frac{P}{k_3 \cos \varphi} + A_L l q_L p_L; \\ b &= B_{ПС} q_{ПС} p_{ПС} + B_L l q_L p_L + A_K q_K p T_G \beta^{II} l; \\ c &= C_L l q_L p_L + 3 \lambda_H \eta l; \\ d &= \frac{P^2 l \rho \tau \beta^I}{\cos^2 \varphi}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $A_{ПС}, C_{ПС}, A_L, B_{ПС}, B_L, A_K, C_L$ – коэффициенты аппроксимации стоимости линии, подстанции и потерь на корону [4, 6, 7, 8];

$q_{ПС}, q_L, q_K$ – территориальные коэффициенты стоимости оборудования и потерь на корону;

$p_{ПС}, p_L$ – суммарные коэффициенты годовых отчислений от стоимости ВЛ и подстанции;

l – длина ВЛ;

ρ, η – удельные сопротивление и масса алюминия;

T_G, τ – годовое число часов и время потерь;

β^I, β^{II} – стоимость переменных и постоянных потерь;

λ_H – коэффициент эффективности использования алюминия;

$P, \cos \varphi$ – расчетный максимум нагрузки и коэффициент мощности;

k_3 – средний коэффициент загрузки трансформаторов.

Такая модель затрат построена с учетом аналитических зависимостей стоимости ВЛ и оборудования подстанции, полученных в работах [4, 6, 7, 8]. Она также учитывает нагрузочные потери на корону в зависимости от номинального напряжения линии и дополнительные затраты, отражающие ограниченность ресурсов алюминия.

Выражение (1) описывает затраты на электропередачу с ВЛ типовой конструкции в диапазоне напряжений 35–500 кВ. Оно распространяется и на электропередачи с двухцепными ВЛ, при этом изменяются обобщенные коэффициенты a и b , а также коэффициенты c и d , одинаковые для одноцепных и двухцепных ВЛ, если под F понимать суммарное сечение фазы (в общем случае на две цепи).

Если расчетная нагрузка электропередачи определяется заданным составом потребителей, то оптимальные параметры, соответствующие минимуму функции (1), могут быть определены из выражений:

$$U_0 = \sqrt[3]{\frac{(cd)^{0.5}}{b}}; \quad (3)$$

$$F_0 = \sqrt[3]{\frac{bd}{c^2}}.$$

При этом минимальное значение целевой функции (нижняя граница затрат) определяется как

$$Z_0 = a + 3\sqrt[3]{bcd}. \quad (4)$$

Оптимальные параметры ВЛ из числа дискретных выбираются путем деления всего множества возможных вариантов n на подмножества с определением для каждого из нижней границы целевой функции. Для подмножества вариантов электропередачи, характеризуемого стандартным напряжением U_i , нижняя граница затрат определится

$$Z_{i0} = a + bU_i^2 + cF + \frac{2\sqrt{cd}}{U_i}. \quad (5)$$

Оптимальное сечение этого подмножества составит

$$F_{i0} = \frac{1}{U_i} \sqrt{\frac{d}{c}}. \quad (6)$$

Предварительно оптимальный вариант с параметрами n , U_i , F_j может быть определен путем сравнения между собой нижних границ для соседних подмножеств. При этом деление на подмножества осуществляется последовательно по признаку числа цепей, номинального напряжения, стандартного сечения проводов. После этого отброшенные подмножества должны быть проверены на возможность улучшения предварительно оптимального варианта с целевой функцией Z_{ij} .

С этой целью функция Z_{ij} сравнивается с нижней границей для проверяемого подмножества Z_0

$$Z_{ij} > Z_0. \quad (7)$$

Указанная процедура соответствует алгоритму поиска оптимального варианта методом ветвей и границ.

Вариант развития сети для подключения нескольких новых нагрузочных узлов характеризуется целевой функцией затрат на сеть

$$Z_0 = \sum_{k=1}^m Z_k, \quad (8)$$

где m – число новых ветвей сети;

Z_k – затраты на k -ю ветвь.

Считая, что для каждой ветви могут быть выбраны оптимальные параметры и значение Z_k определяется согласно выражению (8), получим выражение для нижней границы затрат на сеть

$$Z_{C0} = \sum_{k=1}^m Z_{k0}. \quad (9)$$

Можно предположить, что все величины, определяющие обобщенные коэффициенты модели (2), кроме передаваемой мощности и длины, являются достаточно стабильными характеристиками.

Для удобства введем новые обобщенные коэффициенты, учитывающие связь нижней границы затрат с P и l (при этом учтем, что для ВЛ, входящих в разветвленную сеть, нагрузка подстанции на приемном конце P_H и переток мощности по ВЛ P_L могут быть различны):

$$\begin{aligned} C_1 &= A_{пс} q_{пс} P_{пс}; \\ C_2 &= \frac{C_{пс} q_{пс} P_{пс}}{k_3 \cos \varphi}; \\ C_3 &= A_L q_L P_L; \\ C_4 &= \sqrt{\frac{P \tau \beta'}{\cos^2 \varphi} [C_L q_L P_L + 3 \lambda_H \eta] [B_L q_L P_L + A_K q_K T_G \beta'']}; \\ C_5 &= \frac{B_{пс} q_{пс} P_{пс}}{B_L q_L P_L + A_K q_K T_G \beta''}. \end{aligned} \quad (10)$$

С учетом выражений (10) определим:

а) значение нижней границы целевой функции затрат на ветвь

$$Z_{k0} = C_1 + C_2 P_{Hk} + C_3 l_k + C_4 \sqrt{P_{Hk}^2 l_{Hk}^2 (l_k + C_5)}; \quad (11)$$

б) значение нижней границы затрат на сеть, состоящей из m ветвей

$$Z_{C0} = m C_1 + C_2 \sum_{k=1}^m P_{Hk} + C_3 \sum_{k=1}^m l_k + C_4 \sum_{k=1}^m \sqrt{P_{Hk}^2 l_{Hk}^2 (l_k + C_5)}. \quad (12)$$

Полученные выражения могут быть использованы для оценки вариантов структуры сети. Второе слагаемое выражения (12) определяется суммарной нагрузкой узлов, поэтому является постоянным для всех вариантов; первое – зависит от числа новых линий и при одинаковом m также постоянно. Основные различия нижних границ затрат по вариантам обусловлены неодинаковыми перетоками мощности и длиной отдельных линий. Физически нижняя граница в данном случае равна затратам на сеть рассматриваемой структуры, если согласно выражению (3) считать, что параметры всех ее ветвей оптимальны. При переходе к дискретным значениям параметров затраты на сеть возрастают по сравнению с нижней границей. Это превышение может быть разным для различных вариантов структуры сети, поэтому такая оценка является предварительной. Однако если есть предварительно оптимальный вариант с дискретными параметрами, то по значению нижней границы других вариантов структуры могут быть отброшены заведомо бесперспективные из них.

Рассмотрим пример оценки вариантов структуры сети по нижней границе затрат. На рисунке 1 показаны исходные данные, которыми являются нагрузки подключаемых узлов сети 2, 3, 4, а также расстояния между ними и источником питания 1 (узел 1).

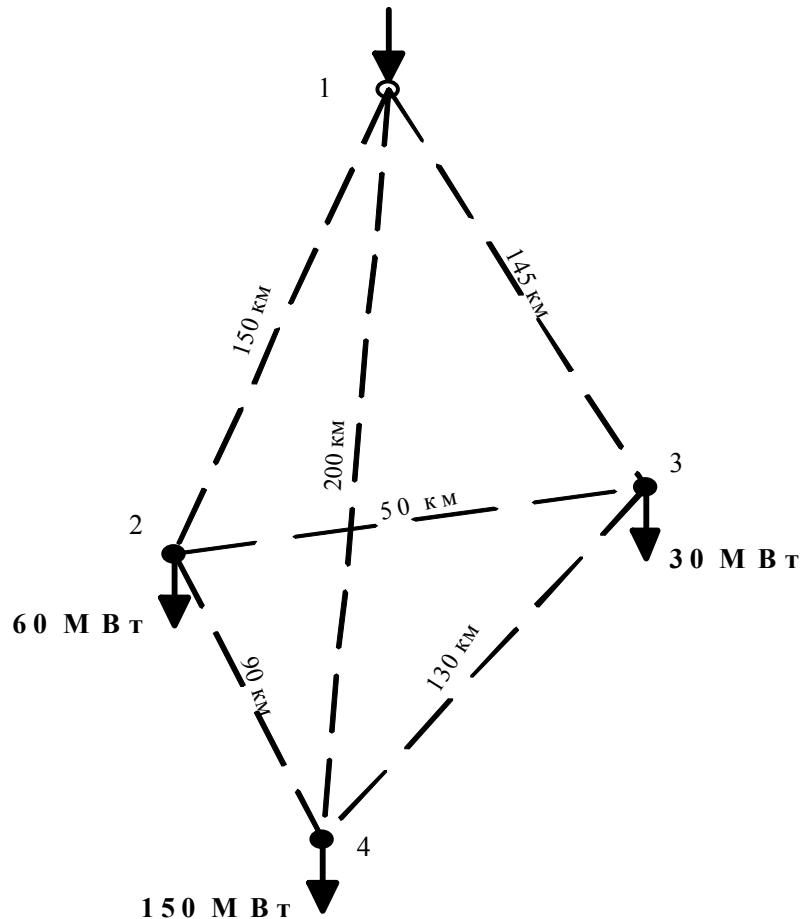


Рис. 1. Исходная конфигурация сети: 1 – источник питания; 2, 3, 4 – узлы нагрузки

Варианты структуры сети представлены на рисунке 2, где указаны перетоки мощности в ветвях. Результаты оценки по нижней границе затрат приведены в таблице. Лучшим является первый вариант с нижней границей $Z_{c0} = 426\,720$ тыс. руб. в год.

Оптимальные параметры ветвей, найденные по описанному алгоритму, составляют:

- 1–2 – двухцепная ВЛ-220 кВ, $F_{12} = 2(1 \times 400)$ мм²;
- 2–3 – одноцепная ВЛ-110 кВ, $F_{23} = 185$ мм²;
- 2–4 – одноцепная ВЛ-220 кВ $F_{24} = (1 \times 400)$ мм².

Значение целевой функции затрат на сеть с учетом этих дискретных параметров составляет $Z_c = 460\,200$ тыс. руб. в год. Оно меньше нижней границы для других вариантов структуры сети, поэтому заранее можно сказать, что их дальнейший анализ не приведет к лучшему варианту. Переход к дискретным параметрам может только увеличить целевую функцию по сравнению с нижней границей. Расчеты проведены при среднем времени потерь $\tau = 4000$ ч, $\cos \varphi = 0,9$, стоимости потерь $\beta' = 2,9$ руб./кВт·ч. Соответствующую оценку можно получить и для других значений величин, пересчитав обобщенные коэффициенты модели (рис. 2, табл.).

Описанная методика реализована в виде ряда программ на вычислительном комплексе. Работа в диалоговом режиме позволяет передать ЭВМ расчеты обобщенных коэффициентов, значений нижней границы целевой функции для подмножества вариантов, формализованные операции по выбору оптимальных дискретных параметров, оставляя за оператором принятие решений по глубине анализа различных структур и вопросы согласования оптимальных вариантов на разных временных уровнях [2, 5].

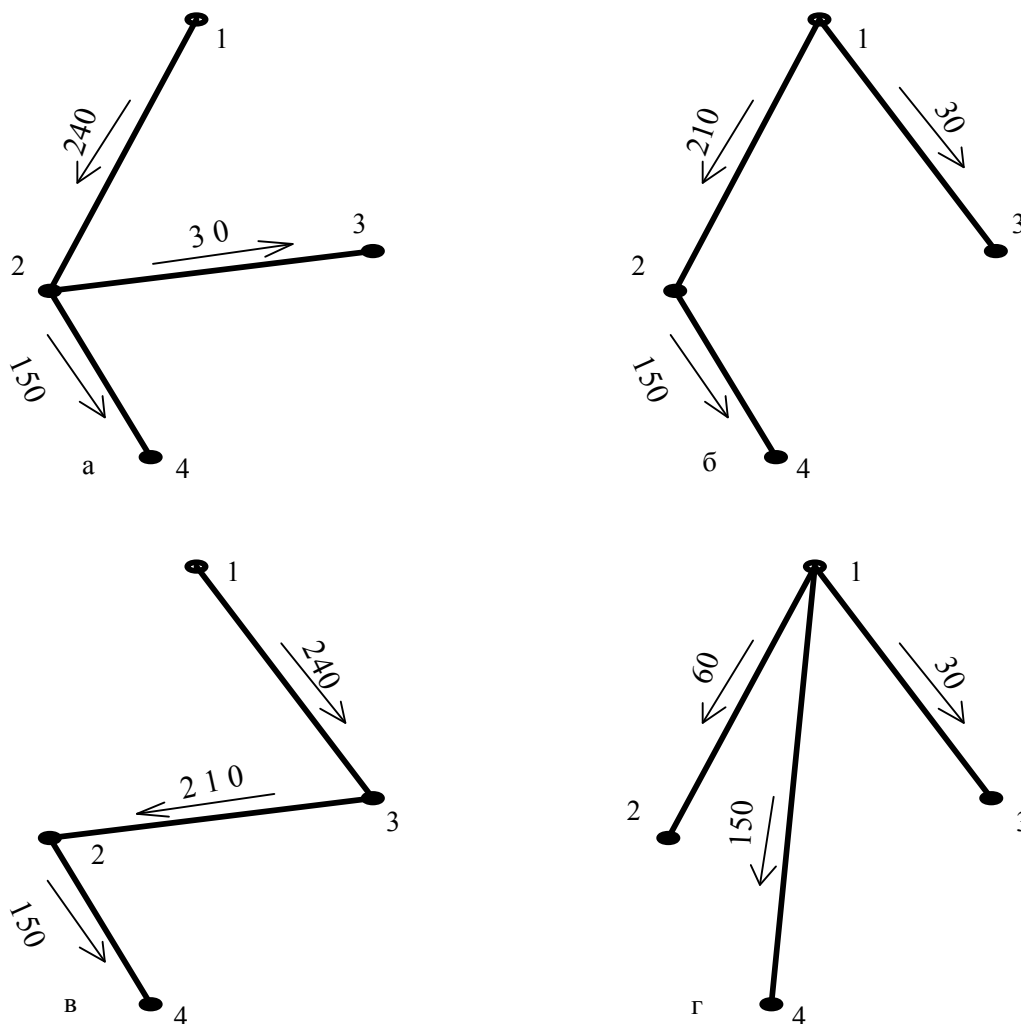


Рис. 2. Варианты структуры сети

Результаты оценки структуры сети в соответствии с вариантами, представленными на рисунке 2

Структура сети	2, а			2, б			2, в			2, г		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ветвь k	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
l_k , км	150	50	90	150	145	90	145	50	90	150	200	145
P_k , МВт	240	30	150	240	30	150	240	210	150	60	150	30
Z_{C0} , руб./год	426 720			464 280			497 520			466 560		

Разработанный метод позволяет учитывать ограничения по надежности в виде правил построения структуры сети. Предусмотрена также возможность решения задачи при наличии небольшого числа замкнутых контуров (до четырех). При этом выполняется расчет балансовых перетоков мощности в соответствии с реактивными сопротивлениями ветвей, и выбираются оптимальные параметры проектируемых ветвей с помощью итеративного процесса. Использование такого комплекса для анализа небольших участков сети совместно с моделями более полной системы позволит повысить эффективность проектных решений за счет расширения диапазона рассматриваемых вариантов.

Выводы

1. Предложенная математическая модель позволяет формализовать процесс выбора оптимальных параметров отдельной электропередачи с заданной нагрузкой.
2. Усовершенствованная методика решения сетевой задачи, связанной с оценкой вариантов сети по нижней границе целевой функции затрат, дает возможность разработать методику синтеза оптимальной структуры сложных электрических сетей.

Библиографический список

1. Абраменко И.Г. Компьютерные технологии в автоматизированных системах управления электроснабжения / И.Г. Абраменко, А.И. Кузнецов. – Харьков : ХНАГХ, 2008. – 143 с.
2. Арзамасцев Д.А. Модели и методы оптимизации развития энергосистем / Д.А. Арзамасцев, А.В. Липес, А.Л. Мызин. – Свердловск : Уральский политехнический институт, 1976. – 148 с.
3. Афоничев Д.Н. Особенности автоматизации проектирования систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей / Д.Н. Афоничев, С.Н. Пиляев, И.А. Кекух // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – № 3. – С. 152–158.
4. Герасименко А.А. Передача и распределение электроэнергии / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – Ростов на Дону : Феникс, 2008. – 715 с.
5. Картавец В.В. Моделирование режима распределительной электрической сети с учетом трансформаторных ветвей / В.В. Картавец, И.В. Лакомов, Ю.М. Помогаев // Вестник Рязанского государственного аграрно-технологического университета. – 2017. – № 2 (34). – С. 64–69.
6. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения / Г.Н. Ополева. – Москва : ИД «ФОРУМ» – ИНФРА-М, 2008. – 480 с.
7. Понявин Н.С. Оценка влияния регулирования мощности средств компенсации реактивной мощности на режимы работы электрической сети / Н.С. Понявин, Е.А. Извеков // Молодежный вектор развития аграрной науки : матер. 69-й студенческой научной конференции. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. – Ч. 1. – С. 136–141.
8. Фролов Ю.М. Основы электроснабжения / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. – Санкт-Петербург : Лань, 2012. – 432 с.
9. Шнелль Р.В. Выбор основных параметров высоковольтных электропередач / Р.В. Шнелль, П.В. Воропаев, В.В. Картавец. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 1984. – 106 с.
10. Щербачев О.В. Применение цифровых вычислительных машин в электроэнергетике / О.В. Щербачев, А.Н. Зейлигер, К.П. Кадомская. – Ленинград : Энергия, 1980. – 240 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Владимир Владимирович Картавец – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8 (473) 224-39-39 (доб. 3320), e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Дмитрий Николаевич Афоничев – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8 (473) 224-39-39 (доб. 3320), e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Юрий Михайлович Помогаев – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) (доб. 3320), e-mail: pomoyurij@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию 12.09.2018

Дата принятия к печати 22.09.2018

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Vladimir V. Kartavtsev – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 224-39-39 (internal 3320), e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Dmitriy N. Afonichev – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 224-39-39 (internal 3320), e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Yuriy M. Pomogaev – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(473) 224-39-39 (internal 3320), e-mail: pomoyurij@yandex.ru.

Received September 12, 2018

Accepted September 22, 2018