

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Игорь Вячеславович Лакомов  
Юрий Михайлович Помогаев

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Рост сельскохозяйственного производства сопровождается масштабным строительством электрических станций и подстанций, сетей высокого и сверхвысокого напряжений, что требует существенного увеличения капитальных затрат и материальных ресурсов на строительство электротехнических объектов. В то же время ежегодный прирост потребляемой мощности приводит к значительным потерям электроэнергии в сетях, что отрицательно влияет на топливно-энергетический баланс. Авторами предпринята попытка решения задачи по проектированию и эксплуатации энергосистем с привлечением экономико-математических и системных методов их исследования с целью снижения затраченных ресурсов на сооружение и эксплуатацию линий электропередач при условии их достаточной работоспособности. Предлагается один из альтернативных путей решения задачи оптимизации основных параметров электропередачи (напряжение, сечение проводов), выбора функционально-экономических связей, объединяющих эти параметры. Определены зоны оптимальных значений параметров и приведен алгоритм их выбора. Выполнена оценка предлагаемых вариантов по абсолютным (объективным) критериям, исключив применение относительных (субъективных) критериев, с приоритетом исключения перерасхода средств относительно оптимального варианта взамен вопроса экономии средств, достигнутой по сравнению с аналогом. В данном случае можно считать, что проектируемая система имеет оптимальные параметры по отношению к минимуму приведенных затрат. В процессе создания проекта реального объекта недостаточно использования лишь одного критерия. К этому можно добавить ограниченность существующих методов оптимизации, учитывающих не все параметры линий электропередачи, и возникающие вследствие этого проблемы внедрения данного метода в практическую работу по проектированию. В работе предпринята попытка определения оптимальных значений технических параметров, которые постоянно изменяются в связи с научно-техническим прогрессом и переменной ценностных характеристик проектируемой системы. В то же время создание моделей оптимизации, учитывающих большинство внутренних и внешних функциональных связей объекта проектирования, дает возможность осуществлять корректировку количественных результатов абсолютной оптимизации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** оптимизация, проектирование, абсолютные и относительные критерии, функциональные связи, математическая и оптимизационная модель, линия электропередачи.

## SELECTING OF THE OPTIMUM PARAMETERS OF ELECTRIC TRANSMISSION LINES

Igor V. Lakomov  
Yuriy M. Pomogaev

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

The growth of agricultural production is accompanied by large-scale construction of power plants and substations, high- and ultra-high voltage networks, which requires a substantial increase in capital expenditures and material resources for the construction of electrical facilities. At the same time, the annual increase in power consumption leads to significant electric power losses in the networks, which adversely affects the fuel and energy balance. The authors have made an attempt to solve the problem of design and operation of power systems employing the economic, mathematical and systematic approaches to their research in order to reduce the amount of resources expended for the construction and operation of power lines provided that their performance is efficient enough. The authors have proposed one of the alternative ways of solving the problem of optimizing the main transmission parameters (voltage and wire cross-section) and choosing the functional and economic links that are common for those parameters. The zones of optimum values of parameters were determined and the algorithm of their choice is described. The authors have evaluated the proposed options upon absolute (objective) criteria excluding the application of relative (subjective) criteria with the priority of eliminating the cost overruns relative to the optimal option instead of cost savings achieved in comparison to the analogue. In this case it can be assumed that the system being designed has the optimal parameters in relation to the minimum of given costs. In the process of creating a project of a real-life object it is not enough to use only one criterion. This can be added to the limitations of the existing optimization methods that take into account not all parameters of transmission lines, and this

results in the problems of implementing this method in practical design work. The authors have made an attempt to determine the optimum values of technical parameters that are constantly changing due to scientific and technological progress and changing of the values of the system being designed. At the same time the creation of optimization models that take into account most of the internal and external functional relationships of the designed object makes it possible to adjust the quantitative results of absolute optimization.

KEY WORDS: optimization, design, absolute and relative criteria, functional relationships, mathematical and optimization model, power line.

**К**аждый проект технической системы и его реализация не являются оптимальными, если под оптимумом понимать некоторый предел, отыскиваемый с помощью непрерывных функциональных связей. Средства реализации любого проекта стандартизированы, но всякое развитие – это путь к совершенству, предел при движении к которому недостижим. Совершенствование проектирования технических систем идет по пути к абсолютному оптимуму, где на всех стадиях требуется оценка соответствия системы оптимальному значению, а также верность его нахождения.

Оптимизация проектных решений по абсолютным критериям позволяет сопоставить неоптимальность решений в проектировании из-за стандартизации и унификации с экономией в технологии производства унифицированных объектов. Индивидуальное проектирование позволяет скорее достичь оптимума, а при типовом проектировании происходит значительное отклонение, но при этом улучшаются технологические возможности массового производства. Таким образом, задача по определению требуемой степени унификации является оптимизационной.

Существуют два класса математических моделей, создаваемых на основе указанных формализованных методов: оценочные и оптимизационные [3]. Процесс формирования в отдельности этих классов начался одновременно с проектированием первых линий электропередач.

В процессе ручного проектирования основным методом является оценка и сравнение отдельных вариантов проектирования электротехнических объектов. Анализ большого количества сравниваемых вариантов позволяет выявить лучший по отношению к определенному критерию или группе критериев. Широкое распространение метода вариантного сравнения в проектировании обусловлено возможностью учета конкретных особенностей каждого проектируемого объекта для каждого варианта без выявления сложных функциональных связей между исследуемыми параметрами. Но число возможных вариантов значительно, и выполнить их оценку сложно даже вычислительной технике. Оценочная модель позволяет выбрать лучший вариант только из сравниваемых, а не из возможных. К недостаткам модели можно отнести трудность выбора и обоснования сравниваемых вариантов, среди которых может отсутствовать оптимальный.

Оптимизационная модель предназначена для непосредственного выбора оптимального варианта из всех возможных на основе учета основных связей между параметрами объекта. В настоящее время в проектировании важное значение имеет понятие экономической плотности тока. Простейшая оптимизация сечения проводов линий электропередач по экономическому критерию предложена Кельвином [3]. Оптимизационная модель имеет свои недостатки, так как математически достаточно трудно описать сложную взаимосвязь между параметрами реальной системы.

Таким образом, то что является достоинствами в одном классе моделей, является недостатками в другом. Следовательно, наибольший эффект в процессе проектирования дает совместное применение обеих моделей. Наиболее удачной является комбинация с предварительной оптимизацией параметров системы с выявлением области оптимальных значений, связанных с принятыми погрешностями и допущениями, и сравнение вариантов, попавших в указанную область с использованием оценочной модели [10].

Представим капитальные затраты и издержки в виде непрерывных функций сечения провода и получим уравнение экономической плотности тока, соответствующей минимуму приведенных затрат [4-6]

$$j_{\text{ЭК}} = \sqrt{\frac{k_{\rho}(E_n + P_a)}{3\rho\beta(\tau + k \cdot 8760)}} \quad (1)$$

где  $k_{\rho}$  – удорожание 1 км линии электропередачи при увеличении сечения проводов на  $1 \text{ мм}^2$ , тыс. руб./км·мм<sup>2</sup>;

$E_n$  – нормативный коэффициент капитальных вложений, 1/год;

$P_a$  – годовые отчисления от капитальных затрат на амортизацию и обслуживание линии, 1/год;

$\rho$  – удельное сопротивление алюминия, Ом·мм<sup>2</sup>/км;

$\beta$  – стоимость потерь электроэнергии, тыс. руб./МВт·ч;

$\tau$  – время потерь, ч/год;

$k$  – коэффициент, учитывающий потери на корону.

Изменения отдельных компонентов приведенных затрат в зависимости от сечения провода представлены на рисунке 1.

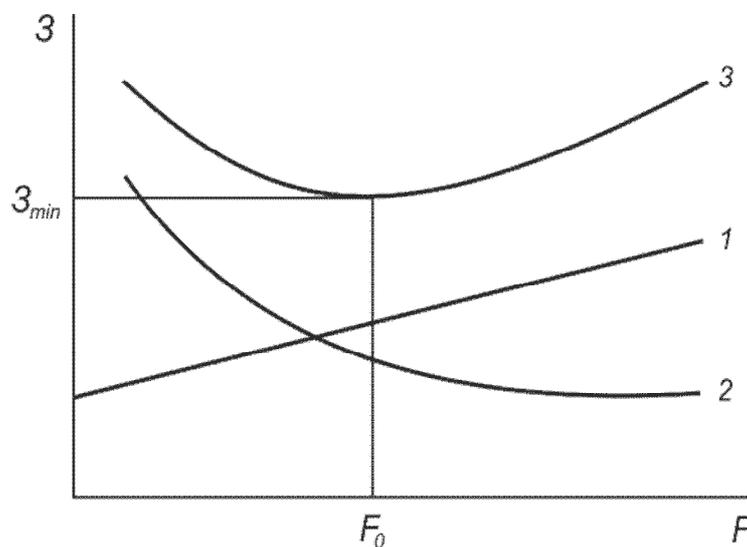


Рис. 1. Приведенные затраты в зависимости от сечения проводов: 1 – затраты на капитальные вложения; 2 – годовые издержки на потери электроэнергии; 3 – суммарные приведенные затраты

Экономичная плотность тока является нормируемой величиной, не зависящей от длины линии передачи, напряжения линии и передаваемой мощности. Для воздушных линий электропередач в зависимости от времени потерь  $\tau$ , стоимости потерь  $\beta$  обычно принимается  $1,0-1,4 \text{ А/мм}^2$ .

С целью отказа от построения аналитических зависимостей стоимости линии и сечения провода был разработан метод экономических интервалов [1, 6]. Уравнение приведенных затрат в этом случае представлено только для стандартных значений сечения провода

$$Z_i = K(F_i)(E_n + P_a) + \frac{P^2 \rho \beta (\tau + k \cdot 8760)}{U^2 I_i \cos^2 \varphi} \quad (2)$$

где  $P$  – передаваемая мощность, Вт;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности.

Для заданных значений напряжений  $U$  и сечений линий электропередачи уравнение приведенных затрат представляется в виде

$$Z_i = a + bP^2 \quad (3)$$

Для каждого из ряда стандартных значений сечений линий электропередач  $F$  существует определенный интервал мощности, в пределах которого приведенные затраты для данного сечения минимальны.

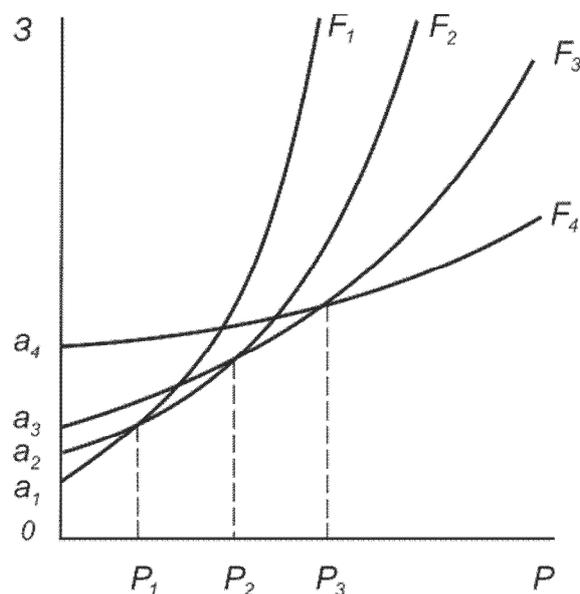


Рис. 2. Экономические интервалы мощности для стандартных сечений проводов

Метод экономических интервалов учитывает существующую унификацию опор, но в то же время какое-либо стандартное сечение может не иметь экономического интервала.

Номинальное напряжение и сечение проводов являются основными параметрами линии электропередач, так как именно эти параметры определяют уровень изоляции, нагрузку на опоры, габариты и стоимость линий и подстанций, потери в них мощности. Поэтому номинальное напряжение считается структурным параметром, но изменение напряжения относительно номинального значения в процессе управления режимами относится к режимным параметрам.

Задача выбора номинального напряжения электропередачи, связанного с ее техническими характеристиками и технико-экономическими показателями, является комплексной, требующей учета многих факторов. Она всегда была предметом многих исследований, и со временем методы ее решения совершенствовались. Отсутствие четкой оптимизационной модели напряжения ставит задачу разработки эмпирического уравнения для приблизительного определения напряжения электропередачи.

Согласно формуле Вейкерта [9]

$$U = 3\sqrt{S} + 0,5l \quad (4)$$

оптимальное значение напряжения электропередачи в большей степени зависит от ее длины, чем от передаваемой мощности.

Эмпирическим уравнением для выбора оптимального напряжения служит формула Стилла [3]

$$U = 4,34\sqrt{l+16P}, \quad (5)$$

преобразованная Никогосовым [3]

$$U = 16\sqrt[4]{Pl}, \quad (6)$$

а также уравнение Залесского [3]

$$U = \sqrt{P(100+15\sqrt{l})}. \quad (7)$$

Анализ всех перечисленных уравнений позволяет сделать вывод, что для некоторых пар значений мощность – длина оптимальные значения напряжений совпадают

со стандартным. Точки, попадающие в промежутки между кривыми, не дают возможность определить оптимальное стандартное напряжение, поскольку неизвестны исходные данные и зависимости, положенные в основу уравнений (4-7).

Из уравнения (4) можно сделать вывод, что оптимальное значение напряжения мало зависит от мощности и определяется длиной линии электропередачи. И напротив, напряжение по уравнению (5) определяется в основном передаваемой мощностью. В первом случае имеем ограничение по длине линии электропередач каждого класса напряжений, во втором – ограничение по величине передаваемой мощности. Расчеты по уравнению (6) позволяют получить усредненные значения уравнений (4-5), в данном случае оптимальное значение напряжения определяется в одинаковой мере уровнем передаваемой мощности и длиной линии. Из уравнения (7) можно понять, что для коротких линий электропередач влияние их длин на величины напряжений наиболее существенно. При увеличении протяженности линии более значима величина передаваемой мощности.

Найдем те области стандартных напряжений, которые удовлетворяют перечисленным выше предположениям. Для получения границ областей напряжений примем, что в точках на линии границы оптимальное значение напряжения равно среднеквадратичному соседних стандартных напряжений. В этом случае на основании уравнения (4) получим границу зон в виде

$$\sqrt{U_1 U_2} = 3\sqrt{S} + 0,5l, \quad (8)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – соседние стандартные значения напряжений.

Зоны различных классов напряжений, построенные по уравнениям (4-7), представлены на рисунке 3 с выделенными общими областями для каждого из них.

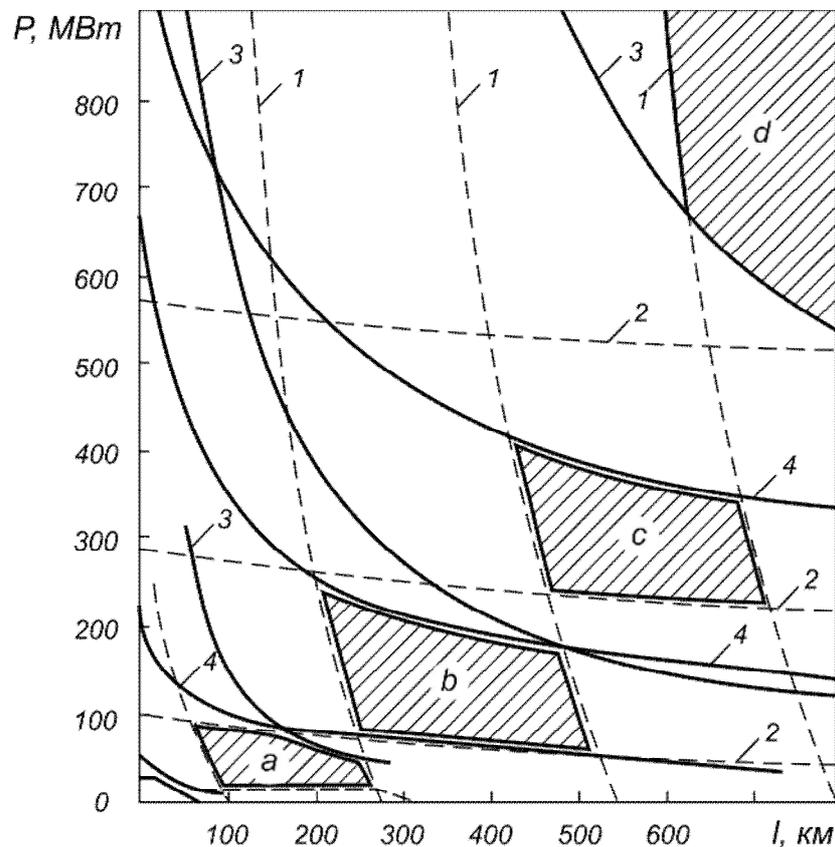


Рис. 3. Области применения номинальных напряжений электропередачи: 1, 2, 3 и 4 – граничные кривые соответственно по уравнению (4), (5), (6) и (7)

Рекомендации уравнений совпадают в области *a* для напряжения 110 кВ, в области *b* – для 220 кВ, в области *c* – для 330 кВ, в области *d* – для 500 кВ.

Принять решение о применении одного из уравнений для конкретной задачи очень сложно, результаты, которые они дают, резко отличаются. Разница может составлять несколько классов напряжений. Отсутствие гибкости, доступа к внутренним связям, позволяющим конкретизировать итоговый результат, является основным недостатком рассмотренных эмпирических уравнений.

При проектировании выбор номинального напряжения основывается на сравнении рассматриваемых вариантов с различными напряжениями одновременно с выбором схемы электрической сети. Это позволяет сравнить варианты с различными конфигурациями сети, номинальными напряжениями отдельных линий, уровнем надежности электроснабжения, степенью резервирования энергетических систем [7].

Основным критерием при сравнении вариантов является минимум приведенных затрат на сооружение и эксплуатацию линий электропередачи. Сравнимые варианты должны удовлетворять всем техническим требованиям и ограничениям для конкретной задачи, т.е. быть сопоставимыми.

Для различных значений передаваемых мощностей и длин линий электропередачи существуют экономические зоны номинальных напряжений, которые были получены в результате многократных расчетов приведенных затрат. Границы зон представляют собой линии одинаковой экономичности соседних номинальных напряжений [4, 8]. Вид и характер этих зон показан на рисунке 4.

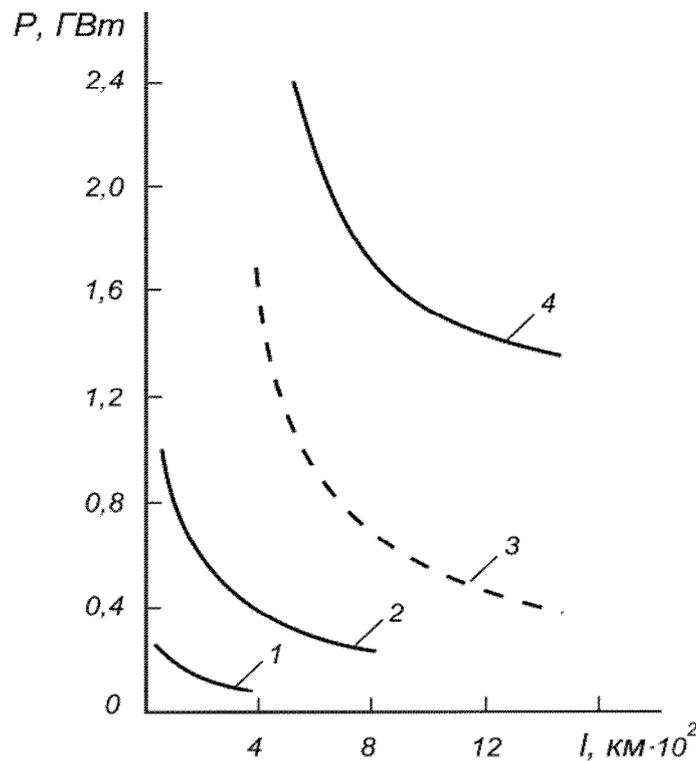


Рис. 4. Экономические зоны напряжений:  
1, 2, 3 и 4 – границы равной экономичности соответственно  
110 и 220 кВ; 220 и 500 кВ; 330 и 750 кВ; 500 и 1150 кВ

Выбор оптимального напряжения можно осуществить и другим способом. Если пренебречь существующими стандартами напряжений и считать, что оно меняется непрерывно, то выявляется закономерность в случае изменения капитальных затрат и издержек при изменении напряжения.

Рост капитальных затрат обусловлен тем, что при повышении напряжения необходимо увеличивать изоляционные промежутки, что приводит к увеличению габаритов опор (что, в свою очередь, сказывается на отчислениях в бюджет за пользование землей), расхода металла и изоляционных материалов, возрастанию сложности монтажных работ. При этом издержки из-за устранения потерь электроэнергии снижаются. В этом случае оптимальное напряжение можно определить аналитически, построив математическую модель в виде зависимости приведенных затрат от напряжения и рассчитав минимум этой функции. После определения нестандартного значения напряжения находим ближайшее стандартное напряжение и определяем перерасход приведенных затрат, связанный со стандартизацией [2]. Чтобы упростить получение аналитического решения, требуется ограничить количество факторов, влияющих на выбор напряжения.

Аналогичные проблемы возникают и при выборе других параметров электропередачи. При этом задачи выбора оптимального напряжения и выбора сечения проводов электропередачи имеют существенные различия и, соответственно, различный подход к решению каждой из задач.

### Библиографический список

1. Блок В.М. Выбор оптимальных сечений проводов и кабелей по кривым экономических интервалов / В.М. Блок // Электричество. – 1975. – № 1. – С. 41-45.
2. Бережной А.В. О технико-экономической методике предварительного выбора номинального напряжения электропередачи с учетом ее надежности / А.В. Бережной // Электричество. – 1970. – № 8. – С. 27-31.
3. Веников В.А. Теория подобия и моделирования: применительно к задачам электроэнергетики : монография / В.А. Веников, Г.В. Веников. – Москва : URSS, 2014. – 406 с.
4. Веников В.А. Электрические системы. Электрические сети : учебник для вузов / В.А. Веников. – Москва : Высшая школа, 1998. – 511 с.
5. Веников В.А. Электрические системы. Режимы работы электрических систем и сетей : монография / В.А. Веников. – Москва : Энергия, 1975. – 309 с.
6. Картавцев В.В. Моделирование режима распределительной электрической сети с учетом трансформаторных ветвей / В.В. Картавцев, И.В. Лакомов, Ю.М. Помогаев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. – 2017. – № 2 (34). – С. 64-69.
7. Помогаев Ю.М. Диагностика изоляции электрооборудования / Ю.М. Помогаев, В.В. Картавцев, И.В. Лакомов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – Вып. 1 (48). – С. 98-104.
8. Рокотян С.С. Проектирование электрической части воздушных линий электропередачи 330-500 кВ : монография / С.С. Рокотян, Н.А. Мельников, А.Н. Шерендис. – Москва : Энергия, 1974. – 309 с.
9. Федоров А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий : учебник для вузов / А.А. Федоров. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
10. Шнелль Р.В. Многоуровневый синтез проектных вариантов электрических систем / Р.В. Шнелль, Е.Н. Митрофанов // Электричество. – 1976. – № 1. – С. 57-60.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Игорь Вячеславович Лакомов – кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации сельского хозяйства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 253-63-02, E-mail: lakomov1960@yandex.ru.

Юрий Михайлович Помогаев – кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации сельского хозяйства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 253-63-02, E-mail: pomoyurij@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию 06.09.2017

Дата принятия к печати 26.09.2017

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Igor V. Lakomov – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrification in Farming, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(473) 253-63-02, E-mail: lakomov1960@yandex.ru.

Yuriy M. Pomogaev – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrification in Farming, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(473) 253-63-02, E-mail: pomoyurij@yandex.ru.

Date of receipt 06.09.2017

Date of admittance 26.09.2017