

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ СУШКЕ ЯБЛОК НА ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛКЕ

---

Игорь Вячеславович Лакомов  
Юрий Михайлович Помогаев  
Евгений Александрович Извеков

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Перед сельскохозяйственной промышленностью России стоит важная задача обеспечения населения качественными пищевыми продуктами. Внедрение новейших технологий производства растительных и животных продуктов, применение высокопроизводительной техники позволило существенно увеличить объём и разнообразить ассортимент производимых продуктов питания. Однако качество сельскохозяйственной продукции напрямую зависит от способов её переработки и хранения. Важно не только произвести продукты питания, но и поддерживать их высокое качество в течение длительного времени. К ряду продуктов питания предъявляются повышенные требования по их переработке и хранению. В частности, длительное хранение овощей и фруктов требует наличия специальных хранилищ с искусственным климатом, что представляет собой достаточно сложную задачу как с точки зрения применения современных технических средств, так и больших финансовых затрат. Одним из способов сохранения пищевой продукции является её обезвоживание, то есть сушка, так как порча продукции в основном происходит в процессе гниения, который отсутствует в продуктах, лишённых влаги. В данной работе экспериментально исследовался процесс сушки свежих яблок с применением теплового насоса (ТНУ), представляющего собой холодильную машину, созданную для использования низкопотенциального тепла для нагрева пищевого сырья. Яблоки относятся к термолабильным продуктам, т. е. теряющим свои свойства при высоких температурах сушки. В процессе эксперимента изменялись параметры яблок и сушильного агента в определённом диапазоне с целью построения кривых сушки. Полученные результаты эксперимента были аппроксимированы с помощью экспоненциального уравнения, представлена модель исследуемого процесса и доказана её адекватность реальному процессу с отклонением в несколько процентов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сушка, скорость сушки, кривые кинетики сушки, экспериментальные данные, эмпирическая модель, параметры процесса, коэффициент теплопередачи, допустимые технологические свойства, адекватность модели.

## RESEARCH OF THE PROCESS OF HEAT AND MASS TRANSFER DURING DRYING APPLES ON BELT DRIER

Irog V. Lakomov  
Yuriy M. Pomogaev  
Evgeniy A. Izvekov

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

The Russian agricultural industry faces an important task of providing the population with high-quality food products. Due to introduction of the latest technologies for manufacturing plant and animal products, the use of high-performance equipment it became possible to increase significantly the volume and diversify the range of food products output. However, the quality of agricultural products directly depends on the methods of its processing and storage. It is important not only to produce foodstuff, but also to maintain its high quality for a long time. A number of food products are subject to increased requirements for their processing and storage. In particular, long-term storage of vegetables and fruits requires special storage facilities with an artificial climate, which is quite a difficult task both in terms of the use of modern technical means and large financial costs. One of the ways to preserve food products is its dehydration, i.e. drying, since food spoilage mainly occurs in the process of rotting, which is absent in products devoid of moisture. Thus, the authors experimentally investigated the process of drying fresh apples using a heat pump assembly (HPA), which is a refrigeration machine designed to use low-potential heat for food raw material heating. Apples are thermolabile products, i.e. they lose their properties at high drying temperatures. During the experiment, the parameters of the apples and the drying agent were changed in a certain range in order to develop drying curves. The obtained experimental results were approximated using an exponential equation, a model of the process under study was presented, and its adequacy to the real process with a deviation of several percent was proved.

**KEYWORDS:** drying, drying rate, drying kinetics curves, experimental data, empirical model, process parameters, heat transfer coefficient, permissible technological properties, model adequacy.

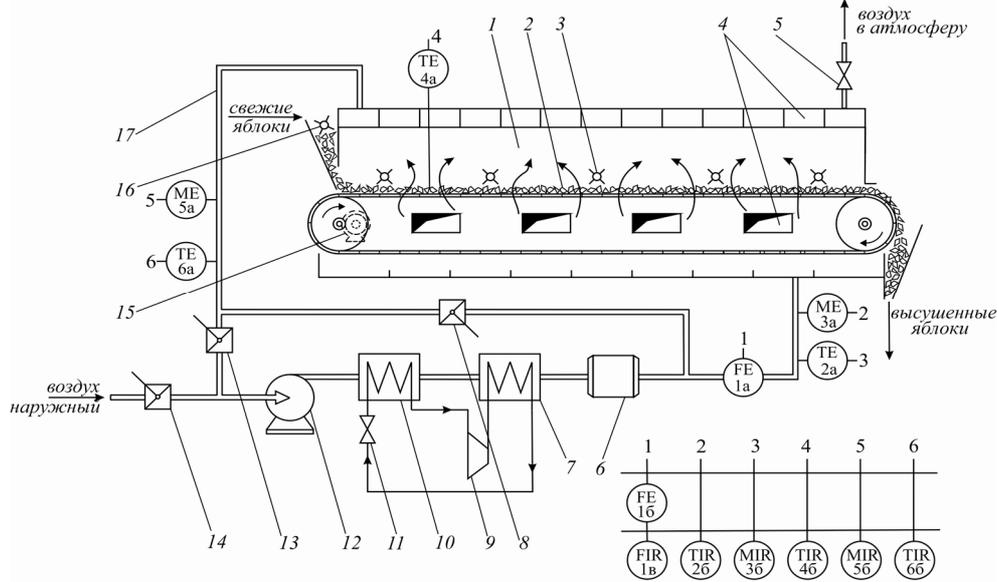
**В** настоящее время проблема использования низкопотенциального тепла в народном хозяйстве приобретает особую актуальность. Это обусловлено невозможностью транспортировать и аккумулировать это тепло без весьма значительных капиталовложений. Основным способом использования такого тепла является применение различных теплонасосных установок.

Сушка сельскохозяйственной продукции является одним из энергоёмких процессов в сельском хозяйстве. Основным энергоносителем для сушки служит жидкое топливо, газ и электроэнергия. Затраты топлива на сушку в настоящее время весьма высоки, что приводит к повышению стоимости готовой продукции.

Перед сельскохозяйственной промышленностью России стоит важная задача обеспечения населения качественными пищевыми продуктами. Внедрение новейших технологий производства растительных и животных продуктов, применение высокопроизводительной техники позволили существенно увеличить объём и разнообразить ассортимент производимых продуктов питания. Однако качество сельскохозяйственной продукции напрямую зависит от способов её переработки и хранения. Важно не только произвести продукты питания, но и поддерживать их высокое качество в течение длительного времени. К ряду продуктов питания предъявляются повышенные требования по их переработке и хранению. В частности, длительное хранение овощей и фруктов требует наличия специальных хранилищ с искусственным климатом, что представляет собой достаточно сложную задачу как с точки зрения применения современных технических средств, так и больших финансовых затрат. Одним из способов сохранения пищевой продукции является её обезвоживание, то есть сушка, так как порча продукции в основном происходит в процессе гниения, который отсутствует в продуктах, лишённых влаги.

Представлены результаты этапа экспериментальных исследований процесса сушки свежих яблок с применением теплового насоса (ТНУ), представляющего собой холодильную машину, созданную для использования низкопотенциального тепла для нагрева пищевого сырья.

Анализ процесса сушки яблок с применением низкопотенциального тепла (в качестве источника используется теплонасосная установка) проводили на специально переоборудованной для этого типовой ленточной сушилке ЛС 1,2-6НК-01 (рис. 1) [6].



**Рис. 1.** Сушильная установка измельчённых яблок с применением теплового насоса:

- 1 – область сушки; 2 – металлическая сетка транспортёра; 3 – ворошители;
- 4 – полости для потоков воздуха; 5 – задвижка; 6 – электрический нагреватель; 7 – конденсатор теплового насоса; 8, 13, 14 – регулирующие заслонки; 9 – компрессор; 10 – испаритель;
- 11 – терморегулирующий вентиль; 12 – центробежный вентилятор с электроприводом;
- 15 – электропривод ленточного транспортера; 16 – лопастной питатель; 17 – линия рециркуляции

Экспериментальная установка представляет собой сушильную камеру 1, ленточный транспортёр для яблок 2, выполненный в виде замкнутой металлической сетки, устройство для перемешивания слоя яблок 3, воздухораспределительные короба 4 с воздухопроводом 17 для обеспечения равномерного подвода воздуха к яблокам, лопастный питатель 16 для загрузки свежих яблок на сушку, электрокалорифер 6, тепловой насос (ТН) с конденсатором 7, компрессор 9, испаритель 10, терморегулирующий вентиль 11, вентилятор 12, электродвигатель с редуктором ленточного транспортера 15, жалюзийные заслонки 8, 13, 14, задвижку 5. Экспериментальная установка имеет датчики и вторичные приборы для управления процессом сушки и контроля над изменяемыми параметрами процесса сушки яблок.

Обработка результатов эксперимента по сушке резаных яблок показала отсутствие периода постоянной скорости сушки, следовательно, весь процесс происходит в периоде падающей скорости сушки [3, 11].

На рисунке 2 показаны кривые кинетики сушки, полученные в результате эксперимента, а также кривые скорости сушки, полученные аналитически. Анализ графического материала позволяет сделать вывод, что процесс сушки яблок на ленточной сушилке с применением ТНСУ происходит только во втором периоде (рис. 2) [4].

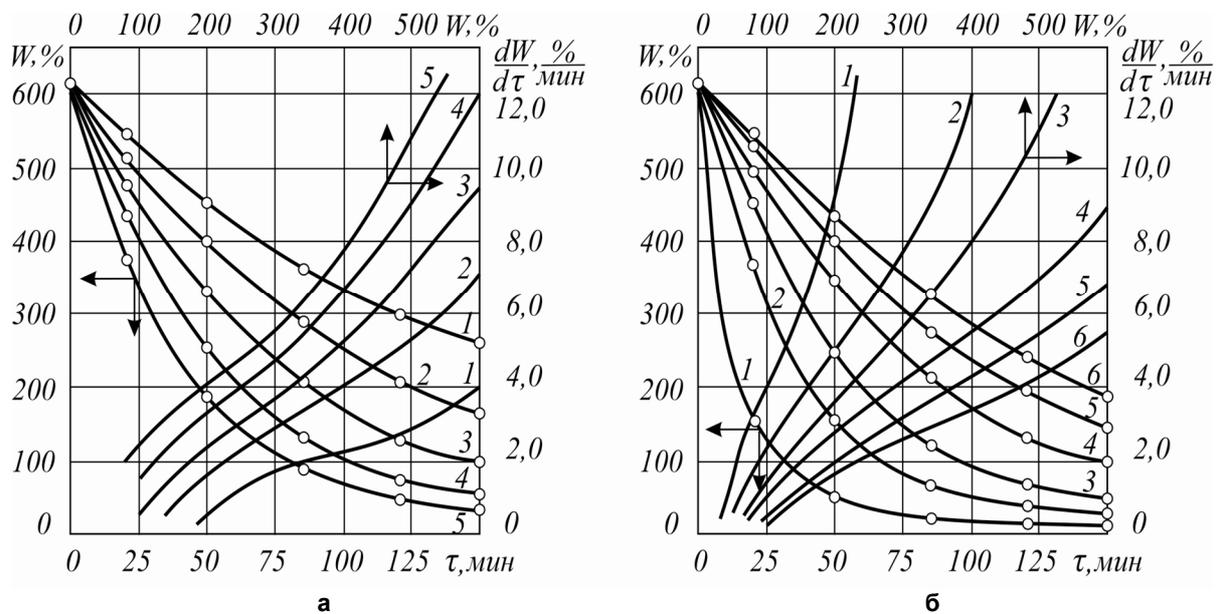


Рис. 2. Кривые сушки и скорости сушки яблок: а)  $v = 1,21$  м/с;  $x = 0,011$  кг/кг;  $h = 0,052$  м;  $T, K: 1 - 314; 2 - 324; 3 - 334; 4 - 344; 5 - 354$ ; б)  $v = 1,21$  м/с;  $h = 0,052$  м;  $T = 334$  К;  $x, кг/кг: 1 - 0,0011; 2 - 0,0031; 3 - 0,0051; 4 - 0,0105; 5 - 0,0152; 6 - 0,021$

Характер кривых сушки, построенных по экспериментальным данным, представляет собой экспоненту, которая на выходе из сушилки приближается к определённому значению равновесной влажности  $W_p$ . Для описания характера этой кривой используем экспоненциальное уравнение [3]

$$(W - W_p) / (W_n - W_p) = e^{-k\tau} \quad (1)$$

С учётом изменяемых параметров в эксперименте это уравнение запишем в виде

$$(W - W_p) / (W_n - W_p) = e^{-kT^m v^n x^p h^q \tau} \quad (2)$$

Решая уравнение (2) относительно основных параметров эксперимента – температуры воздуха  $T$ , скорости воздушного потока  $v$ , влагосодержания воздуха  $x$ , высоты слоя яблок на ленте транспортера  $h$ , делаем вывод, что необходима коррекция коэффициента теплопередачи  $k$  и последовательное уточнение показателей степеней  $m, n, p$  и  $q$ .

Параметры модели определялись по методу средних, обеспечивающему высокую степень адекватности модели (2) экспериментальным данным [1, 2]. Значения показателей степеней  $m$ ,  $n$ ,  $p$  и  $q$  определяют их степень влияния на величину влажности  $W$ . В итоге математическая модель процесса сушки яблок имеет следующий вид:

$$(W - W_p) / (W_n - W_p) = \exp[-5,9012 \cdot 10^{-8} \cdot (T - 273)^2 \cdot v^{0,4} \cdot x^{-0,7} \cdot h^{-0,3} \cdot \tau]. \quad (3)$$

Соответствие полученной модели реальному процессу сушки проверено по  $\chi^2$ -критерию [8].

Проведённый анализ взаимного влияния основных параметров обезвоживания яблок в процессе эксперимента позволил получить наиболее экономичные режимы сушки. Для этого с помощью экспериментальных кривых сушки  $W = f(\tau)$  и нагрева  $T_y = f(\tau)$  установлена зависимость температуры яблок от их влажности в процессе сушки  $T_y = f(W)$  (рис. 3). На рисунке ниже этой зависимости находится оптимальная с точки зрения ограничений, накладываемых на качество сушёных яблок, область влажности конечного продукта для определённых его температур.

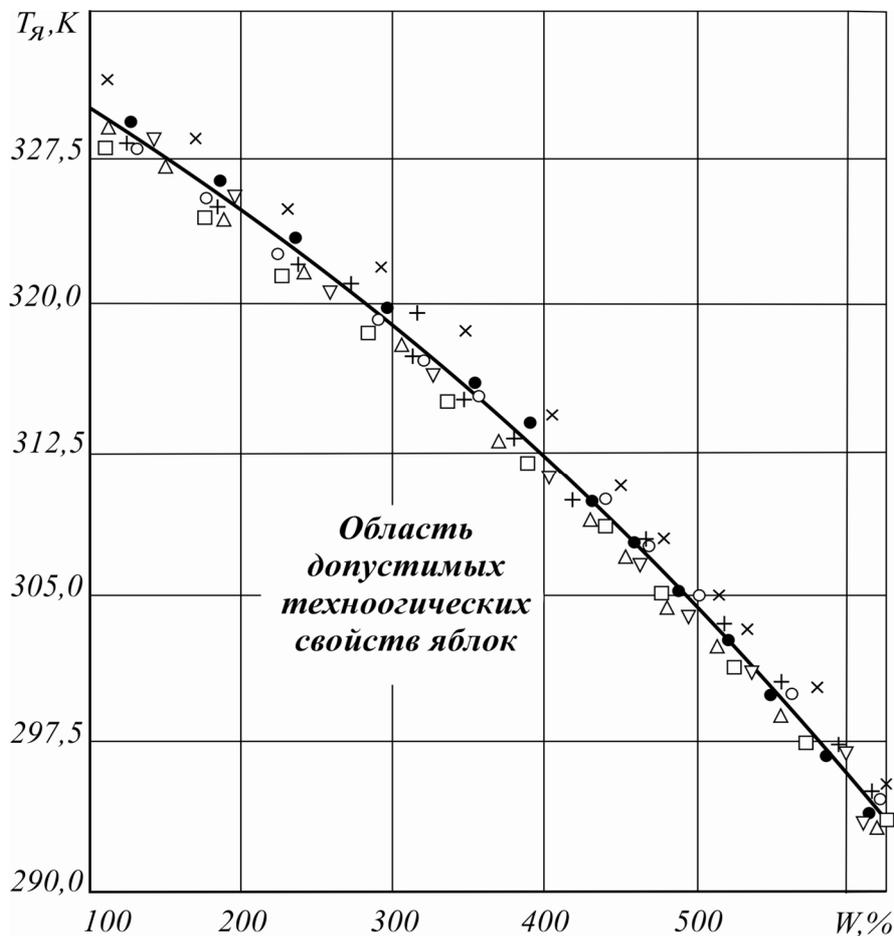


Рис. 3. График нагрева яблок в процессе сушки на экспериментальной установке:

о, •, ×, +, Δ, ∇, □ – точки опытных кривых для различных параметров сушки

Кривые нагрева яблок, полученные опытным путём, находятся в оптимальной области, что говорит о верно выбранных параметрах процесса сушки и получении конечного продукта с высоким качеством. В результате аналитически получена функциональная зависимость между максимально возможной температурой нагрева яблок и влажностью, которая представляет собой уравнение прямой [9]

$$T = T_0 - qkW \quad (4)$$

Для свежих яблок [5] коэффициенты линии ограничения в уравнении (4) составляют соответственно  $T_0 = 341$ ,  $q = 0,96$ ,  $k = 0,07$ . Эта прямая ограничивает оптимальную область экономичных режимов сушки, местоположение которой регулируется коэффициентами  $q$  и  $k$  [10].

Температура слоя резаных яблок по мере их движения в сушильной камере определялась из уравнения теплового баланса

$$\frac{d[\rho_{\text{я}}(W, \tau)c_{\text{я}}(W, \tau)T_{\text{я}}(W, \tau)]}{d\tau} = \alpha_v [T - T_{\text{я}}(W, \tau)] + r \frac{d\left[\frac{W(T, v, h, x, \tau)}{100} \rho_{\text{я}}(W, \tau)\right]}{d\tau}. \quad (5)$$

Так как при  $\tau \rightarrow 0$  температура яблок практически не меняется [7], то

$$T_{\text{я}_{i-1}} = \frac{1}{\tau_i - \tau_{i-1}} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} T_{\text{я}}(W, \tau) d\tau. \quad (6)$$

Интегрируя уравнение (6) относительно  $\tau$  и задаваясь температурой нагрева яблок для  $i$ -го интервала времени, получим:

$$T_{\text{я}_i} = \left[ \frac{\rho_{\text{я}}(W, \tau_{i-1})c_{\text{я}}(W, \tau_{i-1})}{\rho_{\text{я}}(W, \tau_i)c_{\text{я}}(W, \tau_i)} - \frac{\alpha_v(\tau_i - \tau_{i-1})}{\rho_{\text{я}}(W, \tau_i)c_{\text{я}}(W, \tau_i)} \right] \times \left( 340 - 7,24 \frac{W_{i-1}}{100} \right) +$$

$$+ \frac{\alpha_v T}{\rho_{\text{я}}(W, \tau_i)c_{\text{я}}(W, \tau_i)} + \frac{r}{\rho_{\text{я}}(W, \tau_i)c_{\text{я}}(W, \tau_i)} \times$$

$$\times \left[ \frac{W(T, v, x, h, \tau_i)}{100} \rho_{\text{я}}(W, \tau_i) - \frac{W(T, v, x, h, \tau_{i-1})}{100} \rho_{\text{я}}(W, \tau_{i-1}) \right], \quad (7)$$

где теплоёмкость и плотность слоя ломтиков яблок определялась соответственно по формулам (8) и (9):

$$c_{\text{я}}(W, \tau_i) = 1710 + 24,71W_i; \quad (8)$$

$$\rho_{\text{я}}(W, \tau_i) = 636 + 102 \ln(W_i^c / 100). \quad (9)$$

Для решения уравнения (7) с учётом (3), (8) и (9) заданы следующие начальные условия:

$$W(0) = W_n; \quad T_{\text{я}}(0) = T_{\text{я}}^H. \quad (10)$$

Решая систему уравнений, найдем такое значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_v$ , при котором температура нагрева яблок  $T_{\text{я}}^{\text{расч}}$ , найденная аналитически, равнялась экспериментальному значению  $T_{\text{я}}^{\text{эксн}}$ . В результате можно сделать вывод о соответствии найденной математической модели проведённому эксперименту по сушке яблок на ленточной сушилке с применением теплового насоса. Вывод основан на близости расчётных значений температуры нагрева яблок и опытных при определённом значении  $\alpha_v$ . При этом должно выполняться условие

$$\left| T^{\text{расч}}(\tau) - T^{\text{эксн}}(\tau) \right| \leq \xi. \quad (11)$$

Для определённого аналитически числа  $\xi$  найдено среднее значение коэффициента теплоотдачи от сушильного агента к яблокам, лежащее в пределах 100–120 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Применение программы численного счёта среднеинтегральных температур нагрева и средней влажности яблок по длине сушилки позволяет выполнять расчёт процесса сушки яблок кондиционированным воздухом при изменении текущих параметров.

Проведённые исследования по предлагаемому методу расчёта дают удовлетворительные результаты, наибольшее отклонение расчётных кривых от экспериментальных не превышает 5%.

### Библиографический список

1. Везиришвили О.Ш. Выбор оптимальных мощностей ТНУ и область их эффективного применения / О.Ш. Везиришвили // Теплоэнергетика. – 1982. – № 4. – С. 47–50.
2. Везиришвили О.Ш. Тепловые насосы и экономия топливно-энергетических ресурсов / О.Ш. Везиришвили // Известия вузов. Энергетика. – 1984. – № 7. – С. 61–65.
3. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов : учебник / А.С. Гинзбург. – Москва : Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.
4. Гоголин А.А. Осушение воздуха холодильными машинами / А.А. Гоголин. – Москва : Госторгиздат, 1962. – 103 с.
5. ГОСТ 27572-90. Яблоки свежие для промышленной переработки. Технические условия. – Введ. 1989–07–01. – Москва : Стандартинформ, 1990. – 8 с.
6. Гришин М.А. Установки для сушки пищевых продуктов : справочник / М.А. Гришин, В.И. Атаназевич, Ю.Г. Семенов. – Москва : Агропромиздат, 1989. – 215 с.
7. Ионов А.Г. Теплонасосная установка для вяления рыбы / А.Г. Ионов, А.Э. Суслов // Холодильная техника. – 1986. – № 9. – С. 24–27.
8. Кретов И.Т. Программно-логические функции системы управления теплонасосной сушильной установкой / И.Т. Кретов, А.А. Шевцов, И.В. Лакомов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 1998. – № 4. – С. 69–72.
9. Лакомов И.В. Применение теплового насоса в различных схемах сушильных установок / И.В. Лакомов, Ю.М. Помогаев // Вестник Воронежского государственного университета. – 2016. – № 2 (49). – С. 130–135.
10. Лакомов И.В. Энергетическая эффективность применения тепловых насосов при сушке сельскохозяйственного сырья / И.В. Лакомов, Ю.М. Помогаев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2017. – № 1 (52). – С. 109–112.
11. Шаззо Р.И. Низкотемпературная сушка пищевых продуктов в кондиционированном воздухе / Р.И. Шаззо, В.М. Шляховецкий. – Москва : Колос, 1994. – 116 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Игорь Вячеславович Лакомов – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматизации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: lakomov1960@yandex.ru.

Юрий Михайлович Помогаев – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматизации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: pomoyurij@yandex.ru.

Евгений Александрович Извеков – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматизации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: izvek@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию 10.11.2020

Дата принятия к печати 24.12.2020

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Igor V. Lakomov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: lakomov1960@yandex.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, Russia, Voronezh, e-mail: pomoyurij@yandex.ru.

Evgeniy A. Izvekov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: izvek@yandex.ru.

Received November 10, 2020

Accepted after revision December 24, 2020