


ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171:621.3.031

DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-72-75

**ЭЛЕКТРОДНЫЙ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬ ДОЗИРОВАННОЙ МОЩНОСТИ
ДЛЯ УСТАНОВОК НАГРЕВА И ОБОГРЕВА****ШИЧКОВ ЛЕОНИД ПЕТРОВИЧ** , *д-р техн. наук, профессор*shichkov@yandex.ru **СТРУКОВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ**, *канд. техн. наук*

struki@bk.ru

Российский государственный аграрный заочный университет; 143907, Российская Федерация, Московская область,
г. Балашиха, ул. Шоссе Энтузиастов, д. 50

Аннотация. Изменение мощности электродных водонагревателей в зависимости от качества воды является основным их недостатком. Для устранения этого недостатка и повышения надёжности и качества работы водонагревателя разработана электродная система нагрева воды и проведен анализ её режима работы. В статье рассматривается агрегатированная система электродного нагрева воды, состоящая из однофазного электродного водонагревателя, подключаемого к однофазной сети через вентильно-конденсаторный преобразователь с дозируемой передачей энергии. Для регулирования и стабилизации мощности нагрева накопительная ёмкость преобразователя выполнена разделённой на отдельные секции. Выполненный формульный анализ режима нагрузки агрегатированной системы позволяет оптимизировать её режим работы. С целью повышения безопасности и удобства эксплуатации установки в электрической схеме предусмотрены дополнительные блокировки соответствующих электрических цепей. Сделан вывод о целесообразности использования однофазных электродных водонагревателей включением через вентильно-конденсаторный преобразователь с дозированной передачей энергии позволяющим регулировать и стабилизировать мощность нагрева и тем самым повысить электробезопасность, функциональность, надёжность электродных водонагревателей, а также обеспечить существенное повышение качества работы.


Ключевые слова: электрод, водонагреватель, конденсатор, диод, тиристор, ток, напряжение, стабилизация, регулирование.

Формат цитирования: Шичков Л.П., Струков А.Н. Электродный водонагреватель дозированной мощности для установок нагрева и обогрева // Агроинженерия. 2021. № 4(104). С. 72-75. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-72-75.

© Шичков Л.П., Струков А.Н., 2021



ORIGINAL PAPER

**DOSED-CAPACITY ELECTRODE WATER HEATER USED IN BOILING
AND HEATING INSTALLATIONS****LEONID P. SHICHKOV** , *DSc (Eng), Professor*shichkov @yandex.ru **ALEKSEI N. STRUKOV**, *PhD (Eng)*

struki@bk.ru

Russian State Agrarian Correspondence University; 50, Shosse Entuziastov Str., Balashikha, Moscow Region, 143907, Russian Federation

Abstract. Power change of electrode water heaters depending on the water quality is their main disadvantage. To eliminate this drawback and improve the reliability of water heaters, an electrode water heating system was developed and its operating mode was analyzed. The paper considers an aggregated system of electric water heating, consisting of a single-phase electrode water heater connected to a single-phase network via a valve-capacitor converter with a metered energy transfer. To regulate and stabilize the heating power, the storage capacity of the converter is divided into separate sections. The performed formula analysis of the load mode of the aggregated system allows optimizing its operation mode. In order to increase the safety and ease of operation of the installation, additional interlocks of the corresponding electrical circuits are provided in the electrical circuit. The authors conclude that it is advisable to use single-phase electrode water heaters by switching on through a valve-condenser converter with dosed energy transfer, which allows regulating and stabilizing the heating power and thereby increasing electrical safety, functionality, reliability of electrode water heaters, as well as ensuring a significant improvement in the quality of operation.

Key words: electrode, water heater, capacitor, diode, thyristor, current, voltage, stabilization, regulation.

For citation: Shichkov L.P., Strukov A.N. Dosed-capacity electrode water heater used in boiling and heating installations. *Agricultural Engineering*, 2021; 4 (104): 72-75. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-72-75.

Введение. Электродный способ электронагрева токопроводящих сред, в том числе воды, нашёл широкое применение ввиду доступности и высокого значения КПД преобразования электрической энергии в тепловую. Электродный нагрев на переменном токе исключает процесс электролиза воды и является простым и экономичным способом нагрева, который не требует дорогостоящего оборудования. Вместе с тем существенным недостатком электродных водонагревателей в виде электродных котлов является изменение их мощности ввиду изменения проводимости воды, зависящей от концентрации растворенных в ней солей, кислот, щелочей и от температуры воды. В диапазоне температур от 20 до 100°C удельное сопротивление воды изменяется в 3...5 раз за счёт увеличения концентрации и подвижности ионов. Во столько же раз изменяется мощность, потребляемая электродным водонагревателем из сети. Это один из существенных недостатков электродного нагрева, приводящий к завышению сечения питающих проводов, к снижению надёжности установок электродного нагрева и усложняющий их эксплуатацию.

При большой напряженности электрического поля между электродами может возникнуть пробой, а при возникшей от нагрева большой плотности тока – электролитическое разложение воды с образованием взрывоопасного гремучего газа [1, 2]. Устранить отмеченные недостатки электродных водонагревателей и повысить надёжность и качество их работы можно стабилизацией и регулированием их мощности путём использования различных приёмов и технических средств: например, изменять мощность электродного нагрева регулированием питающего напряжения, изменять рабочую (активную) площадь электродов путём их перемещения или введения между электродами диэлектрических экранов, дозировать потребление электроэнергии и др. [1-4].

Цель исследований: разработка электродной системы нагрева воды и анализ её режима работы с использованием электродного водонагревателя при питании от однофазной сети переменного тока через вентильно-конденсаторный преобразователь (ВКП) с дозированной передачей энергии (ДПЭ) для обеспечения стабилизации и регулирования тока и мощности электродных водонагревателей и повышения качества и надёжности их работы [3, 4].

Материал и методы. В сельском хозяйстве применяются проточные и непроточные (накопительные), однофазные и трёхфазные электродные водонагреватели с различными типами электродных систем, которые используются для нагрева воды под технологические нужды и обогрева различных помещений и сооружений защищённого грунта. Отдельные конструкции проточных и накопительных водонагревателей имеют корпус с дополнительной тепловой и электрической изоляцией [1, 2]. Наиболее распространённым является однофазный электродный водонагреватель с коаксиальной системой электродов (рис. 1).

В системах водяного обогрева электродный водонагреватель следует подключать к трубопроводам отопительной системы через электроизолирующие вставки для исключения выноса электрического потенциала в трубопроводную систему обогрева, которая должна иметь дополнительное

заземление. Перемещение жидкого теплоносителя может быть как естественным, так и принудительным.

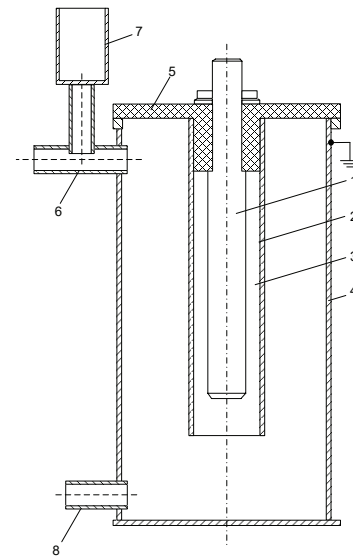


Рис. 1. Конструкция однофазного электродного водонагревателя с коаксиальной системой трубчатых электродов:

- 1 – внутренний фазный электрод;
- 2 – наружный нулевой электрод;
- 3 – межэлектродный зазор; 4 – корпус;
- 5 – электроизоляционная крышка;
- 6, 7 – выходной патрубок с расширительной ёмкостью;
- 8 – входной патрубок

Fig. 1. Design of single-phase electrode water heater with a coaxial tubular electrode system:

- 1 – internal phase electrode; 2 – external zero electrode;
- 3 – interelectrode gap; 4 – casing;
- 5 – insulating cover;
- 6, 7 – outlet branch pipe with an expansion tank;
- 8 – inlet pipe

В общем виде мощность P (Вт) однофазного электродного водонагревателя можно выразить как [1, 2]

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2 \cdot \gamma \cdot S}{l}, \quad (1)$$

где U – действующее значение напряжения на электродах, В; R – активное сопротивление нагрузки, Ом; γ – удельная электрическая проводимость воды, См/м; S – активная площадь электрода, м²; l – расстояние между электродами, м.

В связи с тем, что конструктивные параметры S и l для однофазного электродного водонагревателя с коаксиальной системой электродов принимаем постоянными, при изменении удельного сопротивления воды при нагреве для сохранения постоянства мощности необходимо изменять значение действующего напряжения на электродах. Этого можно достичь стабилизацией потребляемой мощности электронагревателя путём дозирования электрической энергии от конденсаторного источника питания в виде вентильно-конденсаторного преобразователя (ВКП) с дозированной передачей энергии (ДПЭ).

Процесс подключения электродного водонагревателя к однофазной сети переменного тока через ВКП с ДПЭ

с целью стабилизации и регулирования мощности нагрева и повышения надёжности и качества работы однофазных электродных водонагревателей поясняет электрическая схема, представленная на рисунке 2 [3, 4].

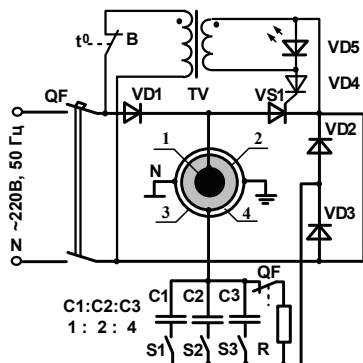


Рис. 2. Электрическая схема подключения электродного водонагревателя к сети переменного тока через ВКП с ДПЭ:
 1 – внутренний фазный электрод;
 2 – наружный нулевой электрод; 3 – корпус;
 4 – электротеплоизоляция

Fig. 2. Wiring diagram for connecting an electrode water heater to the alternating current network through a valve-condenser converter with dosed energy transfer:
 1 – internal phase electrode; 2 – external zero electrode;
 3 – casing; 4 – electrical thermal insulation

Отличительной особенностью электрической схемы (рис. 2) является то, что нагрузка в виде электродного водонагревателя включена в цепь заряда и разряда батареи накопительных конденсаторов $C1...C3$, и это исключает электролиз нагреваемой воды. Схема (рис. 2) по сути представляет собой однофазный тиристорно-диодный мостовой выпрямитель с закороченным выходом постоянного тока и включением нагрузки в фазный провод цепи однофазного переменного тока. Управление тиристорным коммутатором осуществляется от вспомогательного трансформатора TV , который фазирован так, чтобы при отрицательной полуволне сетевого напряжения диод $VD4$ открывался и обеспечивал открытие тиристора $VS1$ для разряда батареи конденсаторов $C1...C3$ через электродный водонагреватель. Работоспособность цепи управления на трансформаторе $TV1$ контролируется свечением светодиода $VD5$. Для исключения возможного перегрева воды и дополнительной стабилизации заданной температуры её нагрева в цепь управления включён размыкающий контакт датчика B температуры воды на выходе водонагревателя. Для обеспечения дополнительной электробезопасности установки при её отключении от питающей сети батарея конденсаторов $C1...C3$ подключается замыкающим блок-контактом QF вводного автоматического выключателя к разрядному сопротивлению R .

Преобразование электрической энергии переменного тока сети в переменный ток водонагревателя по схеме (рис. 2) осуществляется в два этапа. На первом этапе заряд батареи конденсаторов (БК) $C1...C3$ производится при приложении к аноду диода $VD1$ положительных полупериодов фазного напряжения питания. При этом тиристор $VS1$ закрыт ввиду отсутствия напряжения управления на его управляющем электроде.

Второй этап преобразования – разряд ёмкости $БК$ при приложении к диоду $VD1$ отрицательных полуволн фазного напряжения сети. В этом случае к управляющему электроду тиристора $VS1$ приложено отпирающее напряжение от трансформатора $TV1$. В результате тиристор $VS1$ открывается, и накопительная ёмкость конденсаторов $БК$ разряжается током нагрузки через водонагреватель. Ток через электродный водонагреватель реверсируется в каждом периоде преобразования, что исключает электролиз воды при её нагреве.

Регулирование тока и мощности электродного водонагревателя осуществляется дозирующими конденсаторами $БК$, ёмкости которых, например, при трёх секциях, целесообразно соотносить как 1:2:4. Это позволяет за счёт переключателей $S1...S3$ устанавливать семь возможных значений тока и мощности водонагревателя с одинаковой дискретностью. При использовании двух секций дозирующих конденсаторов $C1...C2$ соответственно достигаются три ступени регулирования одинаковой единичной мощности.

Результаты и обсуждение. Из анализа работы ВКП с ДПЭ следует, что мощность P (Вт), отдаваемая преобразователем в нагрузку за один период сетевого напряжения, определяется формулой:

$$P = \frac{C \cdot U^2}{0,5 \cdot T} = 2 \cdot C \cdot U^2 \cdot f, \tag{2}$$

где C – ёмкость батареи конденсаторов, Ф; U – действующее значение напряжения заряда батареи конденсаторов, В; T, f – длительность периода (с) и частоты при $f = 50$ Гц.

Продолжительность полного заряда накопительной ёмкости $БК$ преобразователя до максимально возможного значения напряжения, которое определяется амплитудным значением напряжения питания $U_T = \sqrt{2} \cdot U_{пр}$, составляет четверть периода $T/4$. Следовательно, ёмкость накопительного конденсатора из условия его полного заряда до амплитудного значения напряжения питания U_m определяется для частоты питания $f = 50$ Гц следующими соотношениями:

$$t_3 = T / 4 = 1 / (4 \cdot f). \tag{3}$$

Из условия полного заряда накопительного конденсатора за четыре постоянных времени $t_3 = 4 \cdot \tau$, где $\tau = R \cdot C$ – постоянная времени переходного процесса заряда конденсатора, максимально целесообразное значение τ_m из этого условия:

$$\tau_m = \frac{t_3}{4} = \frac{1}{16 \cdot f} = \frac{1}{16 \cdot 50} = 0,00125 \text{ с}. \tag{4}$$

Соответственно получаем зависимость максимально значения накопительной ёмкости из условия её полного заряда до амплитудного значения напряжения питающей сети:

$$C_m = \frac{\tau_m}{R} = \frac{1}{16 \cdot f \cdot R} = \frac{0,00125}{R}, \text{ Ф или } C_m = \frac{1250}{R}, \text{ мкФ}. \tag{5}$$

В связи с тем, что ёмкость накопительного конденсатора постоянна, согласно (1) из условия сохранения энергии преобразования мощность нагрева ввиду снижения напряжения на электродах нагревателя сохраняется неизменной.

Учитывая, что энергия, запасаемая, а затем отдаваемая накопительным конденсатором за каждый период T сетевого напряжения, осуществляется за время $2 \cdot (T/4)$, соответственно имеем значение действующей тепловой

мощности P_m (Вт), отдаваемой в водонагреватель с учётом полного заряда и разряда накопительного конденсатора:

$$P_m = C_m \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(\sqrt{2} \cdot U_{\Pi})^2}{2 \cdot \frac{T}{4}}, \quad (6)$$

где U_{Π} – действующее напряжение питающей сети переменного тока, В; C_m – максимальная ёмкость из условия её полного заряда до амплитудного значения напряжением питающей сети, мкФ; $T = 1/f$ – длительность периода сетевого напряжения (для $f = 50$ Гц соответственно $T = 0,02$ с).

Завышение ёмкости конденсаторов накопительной БК при определённом значении сопротивления цепи нагрузки свыше рассчитанного по (5) экономически нецелесообразно ввиду неполного использования конденсаторов. Ориентировочно удельная ёмкость БК А/мкФ определяется из режима короткого замыкания цепи нагрузки:

$$I_{CV} = \frac{U}{X_C} = U \cdot 2\pi \cdot f \cdot C \cdot 10^{-6} = 220 \cdot 314 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,069, \text{ А/мкФ} \quad (7)$$

По заданному расчётному току нагрузки I_p на основании (7) определяется необходимая общая ёмкость БК:

$$C_{\Sigma} = \frac{I_p}{I_{CV}}, \text{ мкФ}. \quad (8)$$

Библиографический список

1. Баранов Л.А., Захаров В.А. Светотехника и электротехнология. М.: КолосС, 2006. 344 с.
2. Волгин А.В. Светотехника и электротехнология: Учебное пособие. Саратов: Саратовский ГАУ, 2015. 137 с.
3. Преобразователь с дозированной передачей энергии и питанием от сети переменного тока: пат. RU2415505 С1 РФ: МПК H02J 7/02 / Л.П. Шичков, А.Н. Струков; 2010100925/07; заявл. 14.01.2010; опублик. 27.03.2011. Бюл. № 9. 4 с.
4. Шичков Л.П., Башкирёв А.П., Мохова О.П. и др. Источник тока для специальных электротехнологий // Вестник Курской ГСХА. 2012. № 2. С. 131-134.
5. Шичков Л.П. Электрический привод: Учебник и практикум для академического бакалавриата. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2020. 330 с.

Критерии авторства

Шичков Л.П., Струков А.Н. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Шичков Л.П., Струков А.Н. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 18.03.2021

Одобрена после рецензирования 28.06.2021

Принята к публикации 28.06.2021

Система электродного нагрева воды с ВКП ДПЭ сохраняет работоспособность при изменении режима нагрузки от холостого хода до короткого замыкания. При коротком замыкании выходов ток источника максимален, а напряжение равно нулю. При увеличении сопротивления нагрузки от короткого замыкания до холостого хода ток нагрузки уменьшается при возрастании напряжения. Максимум выделяемой на нагрузке мощности достигается при токе, составляющем $0,5I_p$ [5].

Выводы

1. Использование однофазных электродных водонагревателей включением через вентильно-конденсаторный преобразователь с дозированной передачей энергии позволяет регулировать и стабилизировать мощность нагрева и тем самым повысить электробезопасность, функциональность и надёжность электродных водонагревателей, а также обеспечить существенное повышение качества их работы.

2. Полученные зависимости (5), (6), (7) и (8) позволяют оптимизировать параметры агрегатированной системы электродного нагрева воды, состоящей из однофазного электродного водонагревателя, подключённого к вентильно-конденсаторному преобразователю с дозированной передачей энергии.

References

1. Baranov L.A., Zakharov V.A. Svetotekhnika i elektrotekhnologiya [Lighting engineering and electrical technology]. M.: KolosS, 2006: 344. (In Rus.)
2. Volgin A.V. Svetotekhnika i elektrotekhnologiya: Uchebnoye posobie [Lighting engineering and electrical technology: Study manual]. Saratov: Saratovskiy GAU, 2015: 137: 3. (In Rus.)
3. Preobrazovatel' s dozirovannoy peredachey energii i pitaniyem ot seti peremennogo toka [Converter with metered transmission of energy and power supply from an alternating current network]: pat. RU2415505 S1 RF: МПК H02J 7/02 / L.P. Shichkov, A.N. Strukov; 2010100925/07; applied on 14.01.2010; issued on 27.03.2011. Bul. No. 9: 4. (In Rus.)
4. Shichkov L.P., Bashkirov A.P., Mokhova O.P. et al. Istochnik toka dlya spetsial'nykh elektrotekhnologiy [Power source based on special electrical technologies]. Vestnik Kurskoy GSKHA. 2012; 2: 131-134. (In Rus.)
5. Shichkov L.P. Elektricheskiy privod: Uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata [Electric Drive: Study Manual and Workshop for the Academic Bachelor's Degree students]. 2nd ed., reviewed and extended. M.: Yurayt, 2020: 330. (In Rus.)

Contribution

L.P. Shichkov, A.N. Strukov performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. L.P. Shichkov, A.N. Strukov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 18.03.2021

Approved after reviewing 28.06.2021

Accepted for publication 28.06.2021