

doi: 10.51639/2713-0576\_2021\_1\_2\_15

УДК 620.98

ГРНТИ 44.31.31

ВАК 05.14.14

## Оценка способа повышения энергетической эффективности когенерационной установки тепличных комплексов

<sup>1\*</sup> Марченко А. В., <sup>1,2</sup> Волкова А. Д.

<sup>1</sup> УлГТУ, 432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32

<sup>2</sup> ОП НПК АО «ТЯЖМАШ» в г. Ульяновск, 432002, Россия, г. Ульяновск, ул. Урицкого, д. 100, с1

e-mail: [tgv@ulstu.ru](mailto:tgv@ulstu.ru), \* [al-marchenko@yandex.ru](mailto:al-marchenko@yandex.ru), [aniyav@yandex.ru](mailto:aniyav@yandex.ru)

Цель исследования – повышение энергетической и экономической эффективности когенерационной установки, оценка предлагаемого способа утилизации теплоты, снятой с обмоток статора и ротора электрогенератора. В статье предложена принципиально новая технология использования теплоты, утилизированной с обмоток статора и ротора электрогенератора, в технологическом цикле тепличного комплекса, а также выполнен расчет эффективности предлагаемого решения. Основной отличительной чертой данного решения является использование ранее незадействованной теплоты обмоток статора и ротора электрогенератора для нагрева воды, предназначенной для капельного полива растений. В результате был разработан способ повышения энергоэффективности когенерационной установки.

*Ключевые слова:* когенерация, когенерационная установка, энергосбережение, утилизация теплоты, тепличные комплексы.

### Введение

На обширной территории нашей страны в связи с продолжительной зимой и коротким, не всегда теплым летом складываются неблагоприятные условия для выращивания теплолюбивых растений в открытом грунте. Для расширения возможностей выращивания растений и снабжения населения свежими продуктами питания в неблагоприятные периоды года применяют различные сооружения защищенного грунта, в которых искусственно создаются необходимые условия для роста и развития растений [1]. Несмотря на очевидные преимущества, выращивание сельскохозяйственной продукции в тепличных условиях является непростой технологической задачей [2]. На качество урожая влияет множество факторов: температура и влажность внутреннего воздуха, интенсивность полива почвы. Для поддержания необходимого для роста растений микроклимата в тепличных комплексах требуется значительное количество тепловой и электрической энергии. В среднем затраты на обогрев теплиц составляют 40...80 % от себестоимости продукции. Для энергоснабжения 1 гектара теплиц требуется не менее 1,7 МВт электрической энергии и порядка 2 МВт тепловой энергии (на отопление). Именно поэтому одним из важных аспектов ведения современного хозяйства является экономичное использование энергии. В настоящее время разработка и реализация энергосберегающих решений в энергоемких производствах является наиболее актуальной задачей. Одной из основных составляющих современной высокоэффективной теплицы являются система капельного полива, предназначенная для

приготовления и подачи питательного раствора минеральных удобрений нужной концентрации, к растениям.

Принцип капельного полива заключается в подаче требуемого количества воды и питательных веществ непосредственно к корневой зоне растений, что позволяет обеспечить оптимальный водно-воздушный и питательный режим тепличного субстрата, тем самым повышает урожайность. Применение технологии капельного полива позволяет организовать высокоэффективное производство овощной продукции с высоким качеством и снизить себестоимость продукции [2].

В работе были решены следующие задачи:

1. разработана новая экономически эффективная технология использования теплоты, утилизированной с обмоток статора и ротора, в технологическом цикле тепличных комплексов;
2. проведено исследование экономической эффективности разработанной технологии использования теплоты статора и ротора.

### **Новая технология использования теплоты обмоток статора и ротора электрогенератора в технологическом цикле тепличного комплекса**

Новая технология использования теплоты, утилизированной с обмоток статора и ротора электрогенератора, предназначена для повышения энергетической эффективности и общего КПД когенерационной установки. Когенерационная установка производит электрическую энергию и утилизирует теплоту систем смазки и охлаждения рубашки двигателя. При установке кулера и конденсатора теплота также извлекается из дымовых газов, в результате чего повышается эффективность системы. Для дополнительного повышения энергоэффективности и общего КПД когенерационной установки, помимо утилизации теплоты отработавших газов, охлаждающей жидкости двигателя и системы смазывания, на кафедре «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарапова» УлГТУ авторами предложена установка теплообменника-утилизатора теплоты с обмоток статора и ротора электрогенератора и использование полученной теплоты для нагрева воды, предназначенной для капельного полива растений [8].

Любой процесс преобразования энергии из одного вида в другой сопровождается необратимыми потерями энергии, которые, в конечном счете, обращаются в теплоту и рассеиваются в окружающую среду. В среднем КПД современных генераторов составляет 95...97 %, остальная часть – потери [7]. Как известно, основные потери в генераторах приходится на электрические потери, обусловленные нагревом обмоток статора и механические потери, связанные с трением в подшипниках. Допустимые температуры нагрева обмоток статора должны находиться в пределах 105 °С, а для ротора 130 °С [6]. Для того чтобы температура нагрева не превышала допустимых значений, все генераторы выполняются с искусственным охлаждением. Теплоту, снятую с обмоток статора и ротора, можно использовать для подогрева исходной охлажденной воды, предназначенной для полива и питания растений, повышая тем самым энергетическую эффективность и КПД когенерационной установки. Принципиальная технологическая схема подготовки воды для капельного полива растений представлена на рис. 1.

Исходная холодная вода из водопровода пройдя фильтр направляется в теплообменник-утилизатор теплоты обмоток статора и ротора электрогенератора, где нагреваясь поступает в смесительный бак. В смесительном баке происходит смешение предварительно нагретой воды с растворами, необходимыми для удобрения. Нагнетание растворов производится насосами 1, а их очистка фильтрами маточного раствора 8. После получения воды, с необходимыми для полива растений характеристиками, вода для капельного полива по системе трубопроводов насосом 1 направляется в теплицы.

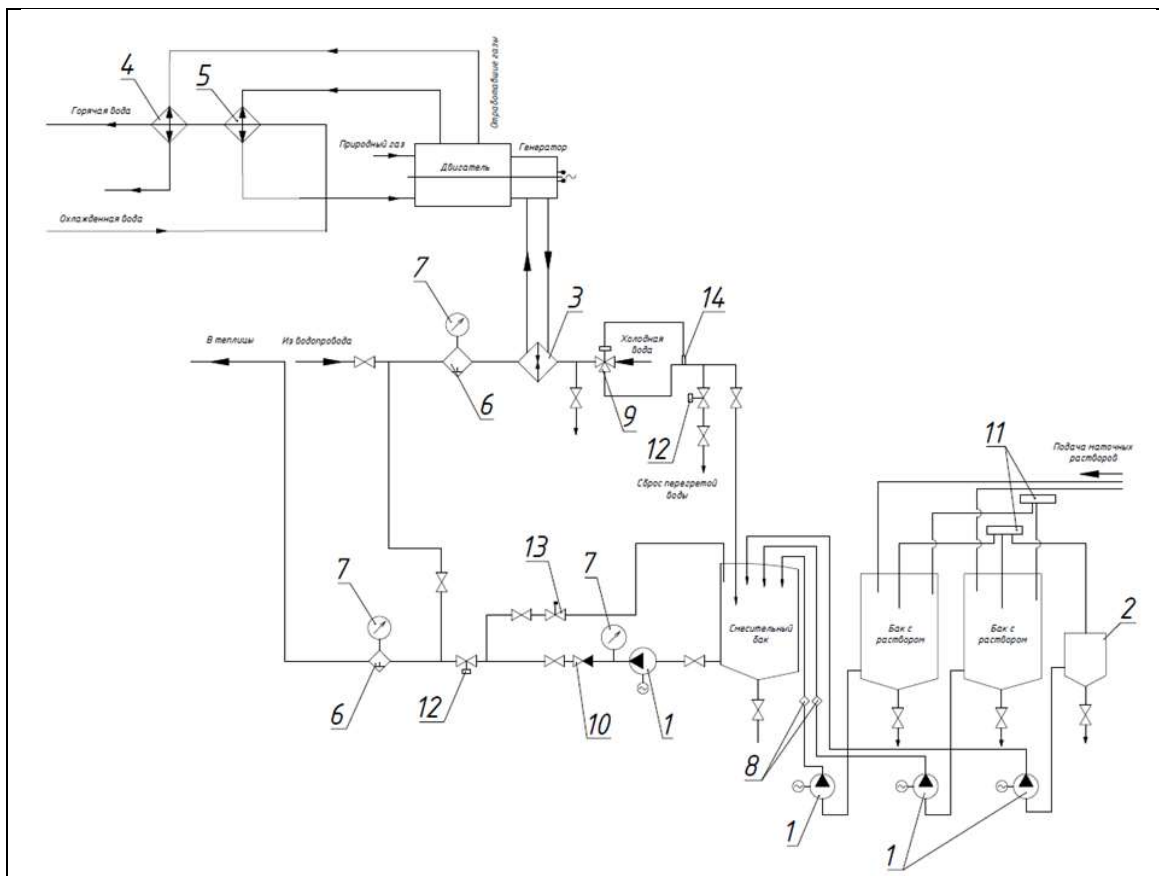


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема подготовки воды для капельного полива растений: 1 – насос; 2 – бак с кислотой; 3 – теплообменник-утилизатор теплоты статора и ротора электрогенератора; 4 – теплообменник-утилизатор теплоты отработавших газов; 5 – теплообменник-утилизатор теплоты двигателя; 6 – фильтр; 7 – манометр; 8 – фильтр маточного раствора; 9 – клапан смесительный; 10 – затвор; 11 – датчик уровнемеров; 12 – вентиль электромагнитный; 13 – регулятор давления; 14 – термопреобразователь

### Исследование энергетической эффективности разработанного технического решения

Исследуем экономическую и энергетическую эффективность новой технологии, представленной на рис. 1 при использовании ее на тепличном комплексе, площадью 10 га. Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Исходные данные для расчета

Потребность в электрической энергии, МВт	17
Потребность в тепловой энергии, МВт	20
Температура капель рабочего раствора, °С	24...26
Количество циклов подачи питательного раствора, шт.	2...20
Температура питательного раствора при выходе из растворного узла, °С	28...30
Температура капель полива, °С	24...26
Суточная потребность раствора, л/м <sup>2</sup>	1,5...6
Температура исходной воды, поступающей в теплообменник из водопровода, °С	10

Для обеспечения тепличного комплекса тепловой и электрической энергии примем 5 когенерационных установок *Tedom Quanto D4000* с электрической мощностью  $N_{эл} = 4500$  кВт и тепловой мощностью  $N_T = 4900$  кВт, построенных на базе газопоршневого двигателя (рис. 2).

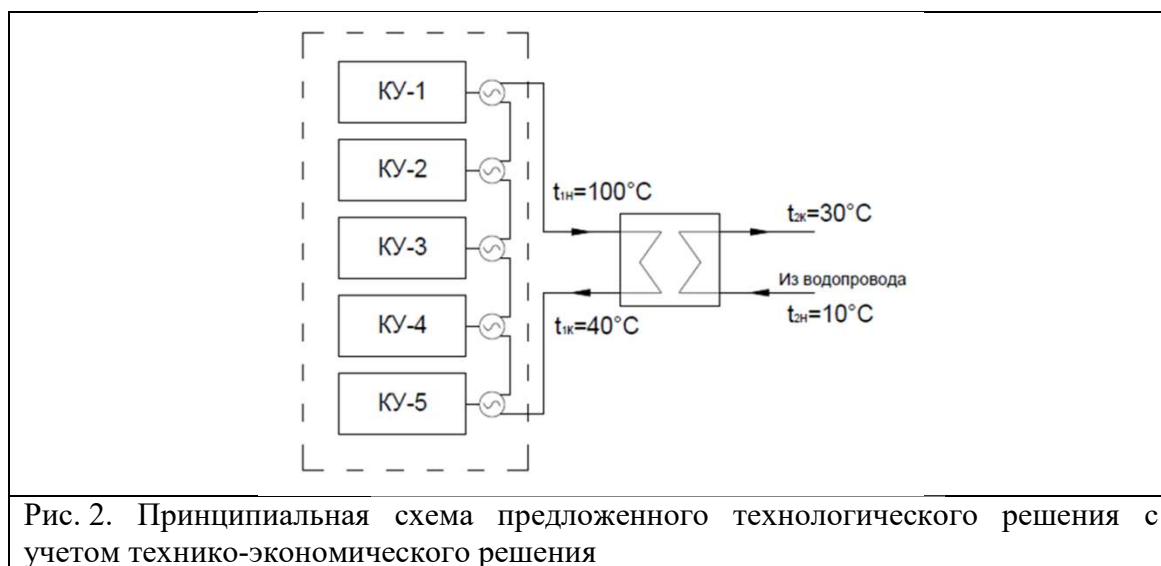


Рис. 2. Принципиальная схема предложенного технологического решения с учетом технико-экономического решения

Данная установка укомплектована синхронным генератором. КПД генератора – 96 %, мощность  $N_T$  – 6100 кВА [4]. Активная мощность генератора  $P$ , кВт, определяется по формуле:

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

где  $P$  – активная мощность, кВт;  $S$  – полная мощность, кВА;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности (для расчета принят  $\cos \varphi = 0,85$ ).

Потери, связанные с нагревом обмоток статора и ротора,  $Q$ , кВт, определяются по формуле:

$$Q = P \cdot 0,02$$

Суммарные потери с 5 когенерационных установок,  $Q_{сумм}$ , кВт:

$$Q_{сумм} = Q \cdot n$$

где  $n$  – количество установок, шт.

В настоящее время для поддержания допустимых температур нагрева обмоток статора и ротора все генераторы выполняются с искусственным охлаждением. Принципиально новым решением является использование теплоты, утилизированной с обмоток статора и ротора электрогенераторов когенерационных установок (КУ), для подогрева воды, предназначенной для нужд тепличного комплекса. Площадь поверхности теплообмена  $F$ ,  $\text{м}^2$  определяется по формуле:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{ср}}$$

Среднеарифметический температурный напор  $\Delta t_{ср}$ ,  $^\circ\text{C}$  определяется по формуле:

$$\Delta t_{ср} = \frac{\Delta t_б - \Delta t_м}{\ln \frac{\Delta t_б}{\Delta t_м}}$$

где  $\Delta t_б$ ,  $\Delta t_м$  – большая и меньшая разности температур между греющим и нагреваемым теплоносителем со стороны входа и выхода из теплообменника,  $^\circ\text{C}$ .

Коэффициент теплопередачи  $k$ ,  $\text{Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ , определяется по формуле:

$$k = \left( \frac{1}{\alpha_1} + R_1 + R_{ст} + R_2 + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1},$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи греющего и нагреваемого теплоносителей,  $\text{Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $R_{ст} = \delta/\lambda$  – термическое сопротивление стенки, разделяющей теплоносители,  $\text{м}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ;  $\delta$  –

толщина, м, и  $\lambda$  – теплопроводность материала стенки,  $\text{Вт}^\circ(\text{м}\cdot\text{К})^{-1}$ ;  $R_1$  и  $R_2$  – термические сопротивления, загрязнений поверхности нагрева со стороны каждого из теплоносителей,  $\text{м}^2\cdot\text{К}\cdot\text{Вт}^{-1}$ .

Результаты расчета энергосберегающей эффективности приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета энергетической эффективности предлагаемого способа утилизации теплоты электрогенератора

Расчетные показатели							
$N_{эл}$ , кВт	$N_G$ , кВА	$P$ , кВт	$Q_{с.р.}$ , кВт	$Q_{сумм}$ , кВт	$\Delta t_{ср}$ , °С	$k$ , $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{С})$	$F$ , $\text{м}^2$
4500	6100	5187	103,7	518,5	36,4	1200	11,87

### Исследование экономической эффективности разработанного технического решения

По результатам расчета к установке принят теплообменник разборный ХГ 31Н-1 90 пластин Danfoss. Произведём расчет срока окупаемости и экономии энергии при внедрении в технологический цикл тепличного комплекса теплообменника, стоимостью на 2021 год  $\Pi_{ту} = 282\ 335$  руб [5]. Количество теплоты, необходимое для нагрева воды, Вт:

$$Q = G \cdot c \cdot (t_k - t_n)$$

где  $G$  – расход воды для полива, кг/с;  $c$  – теплоемкость теплоносителя,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

Потребление электроэнергии на нагрев воды за день  $\Pi_{э,э}^{день}$ , кВт·ч/день:

$$\Pi_{э,э}^{день} = N \cdot T$$

где  $N$  – мощность нагревателя, кВт;  $T$  – время работы нагревателя, ч.

Годовое потребление электроэнергии  $\Pi_{э,э}^{год}$ , кВт·ч/год:

$$\Pi_{э,э}^{год} = \Pi_{э,э}^{день} \cdot 365$$

Экономия денежных средств  $\mathcal{E}$ , руб., при установке теплообменника-утилизатора теплоты статора и ротора:

$$\mathcal{E} = \Pi_{э,э}^{год} \cdot P$$

где  $P$  – стоимость электрической энергии, руб. за кВт·ч.

Срок окупаемости  $T_{ок}$ , год, определяется по формуле:

$$T_{ок} = \frac{\Pi_{ту}}{\mathcal{E}}$$

Результаты расчета экономической эффективности приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты расчета экономической эффективности предлагаемого способа утилизации теплоты электрогенератора

Расчетные показатели					
$Q$ , кВт	$\Pi_{э,э}^{день}$ , кВт·ч/день	$\Pi_{э,э}^{год}$ , кВт·ч/год	$P$ , руб. кВт	$\mathcal{E}$ , руб.	$T_{ок}$ , год
160	3840	1 401 600	2,37	3 321 792	0,1

### Заключение

Разработана принципиально новая технология использования теплоты, утилизированной с обмоток статора и ротора электрогенератора, в технологическом цикле тепличного комплекса. Основной отличительной чертой данной технологии является использование ранее незадействованной теплоты обмоток статора и ротора электрогенератора для нагрева воды, предназначенной для капельного полива растений.

Проведено исследование экономической и энергетической эффективности новой технологии использования теплоты, утилизированной с обмоток статора и ротора электрогенератора, в

технологическом цикле тепличного комплекса. Установлено, что применение новой технологии позволит повысить КПД когенерационной установки на 0,7 %, а также снизить затраты на нагрев воды на 20 Вт с каждого выработанного генератором кВА. Срок окупаемости предлагаемого технического решения не превышает двух месяцев.

### Список литературы

1. Калинина Т. О. Создание оптимальных тепловых условий в теплицах в зимний период / Т. О. Калинина, В. Ю. Полякова, К. В. Кичин // Молодой ученый. – 2016. – № 29 (133). – С. 81–86.
2. Кабанов А. А. Система удаленного управления теплицей / А. А. Кабанов, Г. В. Никонова // Актуальные проблемы современной науки: материалы IV регион. науч.-практ. конф. – Омск, 2015. – С. 80–82.
3. Газопоршневая электростанция TedomQuanto 4000 // [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tss.ru/catalog/elektrostantsii/gazoporshnevye-elektrostantsii/gazoporshnevaya-elektrostantsiya-tedom-quanto-4000/>
4. Генератор MarelliMotori // [Электронный ресурс]. URL: <http://marelli-motori.ru/products/generators/mjh-222/mjh-800-mb6-3947>
5. Разборный пластинчатый теплообменник Danfoss // [Электронный ресурс]. URL: <http://pasador.ru/danfoss-xg-31h-1/>
6. ГОСТ 533-2000 (МЭК 34-3-88) «Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Общие технические условия». – М.: Госстандарт России, 2002. – 24 с.
7. Агафонов А. Н., Сайданов В. О., Гудзь В. Н. Комбинированные энергоустановки объектов малой энергетики. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – 262 с.
8. Марченко А. В., Волкова А. Д. Способ повышения энергетической эффективности когенерационной установки тепличных комплексов // Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции, посвященной столетию МИСИ-МГСУ. Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2020. – 188 с.

### Evaluation of the method of increasing the energy efficiency of the cogeneration plant of greenhouse complexes

<sup>1</sup> Marchenko A. V., <sup>1,2</sup> Volkova A. D.

<sup>1</sup> *UISTU, 432027, Russia, Ulyanosk, SeverniyVenecstreet, 32*

<sup>2</sup> *OP NPK JSC "TYAZHMASH" in Ulyanovsk, 432002, Russia, Ulyanovsk, Uritskogo str., 100s1*

The purpose of the study is to increase the energy and economic efficiency of the cogeneration plant, to evaluate the proposed method of heat utilization removed from the stator and rotor windings of the electric generator.

The article proposes a fundamentally new technology for using heat recovered from the stator and rotor windings of an electric generator in the technological cycle of a greenhouse complex, and also calculates the efficiency of the proposed solution. The main distinguishing feature of this technology is the use of previously unused heat of the stator windings and the rotor of the electric generator for heating water intended for drip irrigation of plants.

As a result, a method for improving the energy efficiency of a cogeneration plant was developed.

*Keywords:* cogeneration, cogeneration plant, energy saving, heat recovery, greenhouse complexes.