



РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ПУНКТА ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Т.В. Синюкова, А.В. Синюков

Липецкий государственный технический университет,
г. Липецк, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, zeitsn@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработать и исследовать математическую модель действующего объекта – индивидуального теплового пункта с двумя методами управления температурой теплоносителя. В первом случае рассматривается управление температурой теплоносителя, с помощью, установленного на реальном объекте регулирующего клапана. Во втором случае предлагается более надежное и менее энергозатратное решение – замена регулирующего клапана на частотно-регулируемый электропривод, работающий по предложенному оптимальному алгоритму. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи применялся метод компьютерного имитационного моделирования, реализованный средствами Matlab Simulink. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье рассмотрены проблемы, которые возникают при эксплуатации индивидуального теплового пункта. Приведены возможные варианты решения проблемы, связанной с выходом из строя регулирующего клапана. Предложено решение по регулированию температуры теплоносителя, основанное на использовании частотно-регулируемого электропривода электронасоса. Для реализации предложенного решения не требуется перепланировки помещения, необходима только установка частотного преобразователя на уже имеющийся в устройстве индивидуального теплового пункта насос. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Проведенные исследования имеют практическую направленность, так как предложенное решение внедрено на действующем объекте. Применение частотно-регулируемого электропривода центробежного насоса позволило повысить надежность действующего объекта. Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности использования предлагаемого решения.

Ключевые слова: индивидуальный тепловой пункт; частотно-регулируемый электропривод; моделирование; Matlab.

Для цитирования: Синюкова Т.В., Синюков А.В. Регулирование температуры индивидуального теплового пункта изменением частоты вращения асинхронного двигателя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 4. 156-165. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-156-165.

REGULATION OF THE TEMPERATURE OF AN INDIVIDUAL HEAT POINT BY CHANGING THE SPEED OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR

TV. Sinyukova, AV. Sinyukov

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, zeitsn@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To develop and investigate a mathematical model of an operating object – an individual heat point with two methods of controlling the temperature of the coolant. In the first case, the control of the temperature of the coolant is considered, with the help of a control valve installed on a real object. In the second case, a more reliable and less energy-consuming solution is proposed – replacing the control valve with a frequency-controlled electric drive operating according to the proposed optimal algorithm. *METHODS.* When solving this problem, the method of computer simulation modeling, implemented by means of Matlab Simulink, was used. *RESULTS.* The article deals with the problems that arise during the operation of an individual heating point. Possible solutions to the problem

associated with the failure of the control valve are given. A solution for regulating the temperature of the coolant is proposed, based on the use of a frequency-controlled electric drive of the electric pump. To implement the proposed solution, no redevelopment of the premises is required, only the installation of a frequency converter on the pump already available in the device of an individual heat station is necessary. **CONCLUSION.** The conducted research has a practical focus, since the proposed solution is implemented at the existing facility. The use of a frequency-controlled electric drive of a centrifugal pump made it possible to increase the reliability of the existing facility. The results obtained during the simulation allow us to draw a conclusion about the feasibility of using the proposed solution.

Keywords: Individual heat point; frequency-controlled electric drive; simulation; Matlab.

For citation: Sinyukova TV, Sinyukov AV. Regulation of the temperature of an individual heat point by changing the speed of the asynchronous motor. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(4):156-165. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-156-165.

Введение

Сбережению как электрической, так и тепловой энергии посвящено большое количество исследований. В работе [1] произведено исследование способов повышения экономичности работы систем горячего водоснабжения. Работы [2-4] посвящены энергосбережению в системах управления электроприводами. Энергоэффективные высоковольтные системы электроснабжения объектов рассмотрены в работах [5-8]. Вопросы энергоэффективности в низковольтных системах затронуты в работах [9, 10]. Использование интеллектуальных приводов для обеспечения энергосбережения рассмотрено в работе [11]. Энергоэффективная модель теплотребления, позволяющая осуществлять учет характеристик элементов теплового узла, исследована в работе [12]. Вопросам экономии энергии в системах управления асинхронными двигателями посвящены работы [13, 14].

Индивидуальные тепловые пункты, являющиеся частью системы централизованного теплоснабжения. В настоящее время имеют массовое внедрение как для учета и распределения энергии в многоквартирных домах, так и на производственных предприятиях [15, 16].

Тепловой пункт является связующим звеном между центральной сетью теплоснабжения и системой собственного отопления отдельного объекта или его части.

К индивидуальному тепловому пункту (рис. 1) подведены трубы, обеспечивающие прямой поток теплоносителя, на выходе формируется обратный поток теплоносителя, обеспечивая систему замкнутого типа.

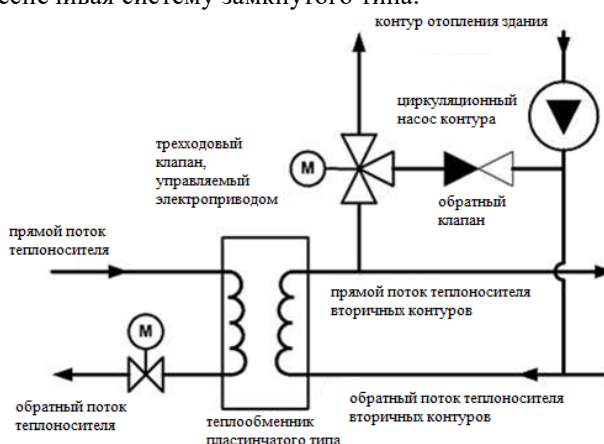


Рис. 1. Упрощенная схема устройства индивидуального теплового пункта

Fig. 1. Simplified diagram of the device of an individual heating point

Теплообменники пластинчатого типа осуществляют деление теплоносителя прямого потока, поступающего из системы централизованного теплоснабжения на ряд местных тепловых систем, составляющих вторичный контур.

Насосы центробежного типа осуществляют циркуляцию носителя тепла.

В индивидуальных тепловых пунктах поддержание необходимой температуры в большинстве случаев осуществляется системой, содержащей трехходовый клапан,

управляемый электроприводом.

При работе данных устройств приходится сталкиваться с такими проблемами, как неравномерный прогрев части помещений в здании, выход из строя регулирующих клапанов, обеспечивающих поддержание температуры на заданном уровне.

В функции системы регулирования входит поддержание на оптимальном уровне температуры на вторичной стороне.

В работе [17] предложен энергоэффективный способ плавного регулирования температуры и давления посредством электронного регулятора температуры, реализующего заданные программы управления, обеспечивающие необходимый температурный режим работы. Тиристорные выходы регулятора осуществляют управление приводом регулирующих клапанов, а релейные – служат для управления насосами.

В статье [18] обсуждаются варианты схемных решений для индивидуальных тепловых пунктов, а также способы контроля и управления тепловыми и гидравлическими режимами.

В работе [19] рассмотрена возможность использования нейронных сетей в системе автоматизации тепловых пунктов.

В статье [20] предложено для повышения энергоэффективности использование двухпоточного мембранного насоса позволяющего более равномерно производить распределение температур теплоносителя.

Предлагается система регулирования температуры, содержащая частотно-регулируемый электропривод насоса со скалярным типом управления.

Так как преобразователь частоты будет устанавливаться на реальном объекте на значительном расстоянии от электродвигателя, которым он будет управлять, в системе необходима установка синусоидального LC-фильтра.

При исследовании, интерес представляет прямой и обратный поток теплоносителя, теплообменник и система отопления здания, следовательно, для упрощения модели введем ряд допущений:

- температура и давление прямого и обратного теплоносителя не меняются;
- дополнительные источники тепла в здании отсутствуют;
- изменение температуры воздуха за пределами здания носит синусоидальный характер;
- помещения не проветриваются;
- теплоизоляция труб идеальная.

Разработка модели и алгоритма управления

В среде математического моделирования *Matlab* была разработана математическая модель электропривода насоса (рис. 2). Блок «Контроллер и двигатель» содержит асинхронный двигатель, скорость и нагрузка которого формируется установкой регуляторов на необходимом значении. Также в систему «Контроллер и двигатель» включены два контроллера: скорости и момента, блоки измерений, частотный преобразователь.

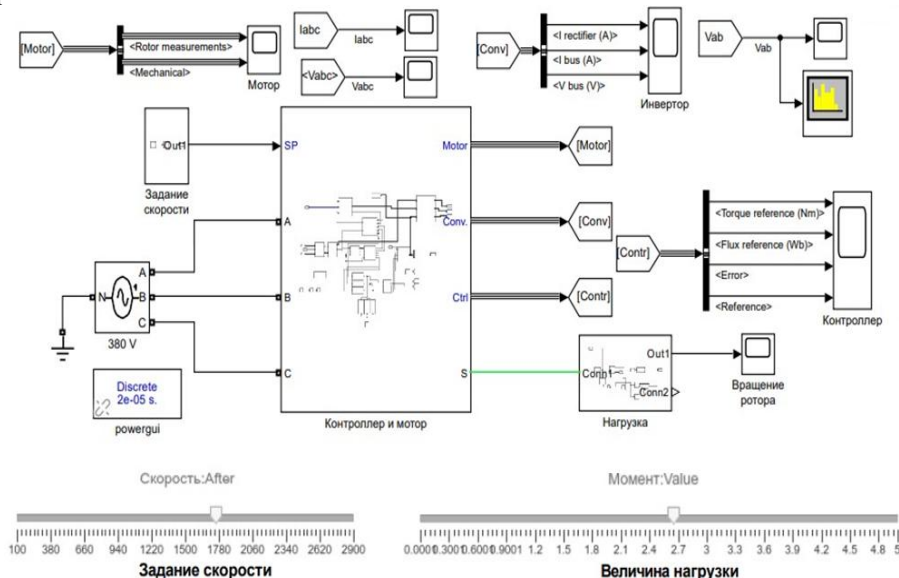


Рис. 2. Модель насоса

Fig. 2. Pump model

На следующем этапе был разработан алгоритм управления (рис. 3) температурой теплоносителя с соблюдением необходимых требований, таких как:

- минимально допустимая разница температур прямого и обратного теплоносителя – устанавливается в зависимости от температуры внешнего воздуха (при моделировании была принята не менее 5 градусов по Цельсию);

- частота вращения двигателя – для поддержания циркуляции теплоносителя минимальное значение составляет пятьдесят процентов от номинальной частоты вращения, при снижении разницы температур ниже порогового значения, двигатель включается на максимальную частоту вращения до достижения показателя минимально допустимой разницы температур.

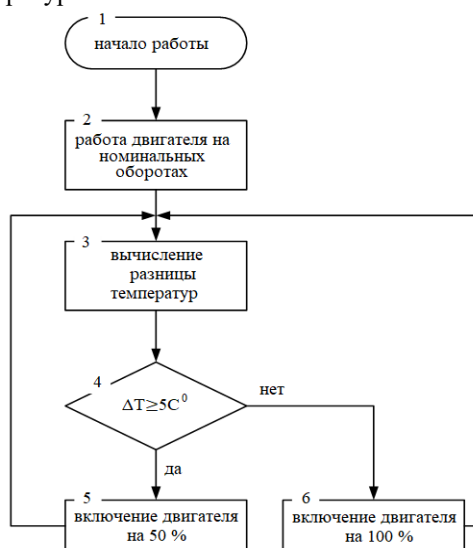


Рис. 3. Алгоритм управления температурой теплоносителя при использовании частотно-регулируемого электропривода насоса

Fig. 3. Algorithm for controlling the temperature of the coolant when using a frequency-controlled electric pump drive

На реальном объекте соблюдение приведенных требований происходит путем частичного (на 50 процентов) или полного открытия трехходового клапана.

Прибором Testo-174 на действующем объекте осуществлялся замер показателей температуры отопляемого помещения, а также велась статистика других данных при различных режимах функционирования индивидуального теплового пункта. Выявлено, что оптимальный режим работы насосом был достигнут при его функционировании с частотой вращения около 50 процентов от максимального значения. Плавное регулирование частоты вращения насоса ни привело к видимому эффекту.

На рисунке 4 представлена реализация алгоритмов управления температурой при использовании частотно-регулируемого электропривода насоса и при использовании трехходового клапана. Управляющим сигналом блока управления температурой является температура, зафиксированная измерительным прибором до теплообменника и температура обратного теплоносителя после теплообменника. С блока разности температур сигнал поступает на блок сравнения, с которого выдается логический 0, если температура соответствует или больше значения минимально допустимой разницы температур прямого и обратного теплоносителя, при не соблюдении данного условия, на выходе формируется 1. Далее сигнал поступает на вход коммутатора, на котором, в зависимости от значения сигнала на входе будет формироваться величина скорости двигателя или степени открытия клапана. Выбор способа управления температурой осуществляется с помощью переключателя.

Следующим этапом стало моделирование тепловой системы.

Трубопровод был собран из блоков *Pipe (TL)* имитирующих часть трубопровода с определенным объемом жидкости.

Центробежный насос реализован блоком из библиотеки *Thermal Liquid*, исходными параметрами которого являются данные доступные в технических паспортах на реальные насосы.

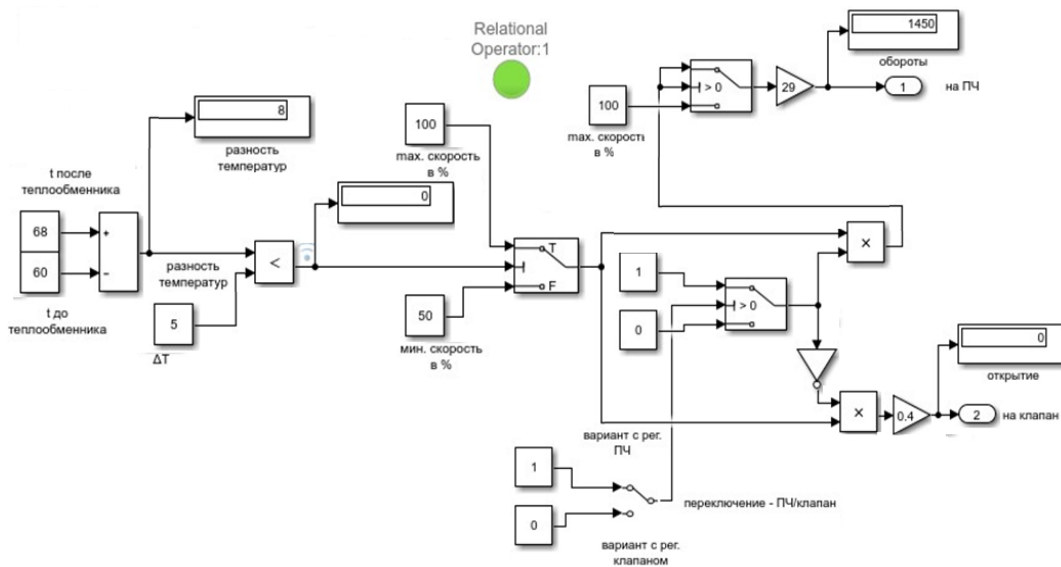


Рис. 4. Модель блока управления температурой

Fig. 4. Model of the temperature control unit

Теплообменник, принятый как адиабатический объект, реализован блоком *E-NTU Heat Transfer*, который имитирует обмен теплом между жидкостями, базирующийся на концепции эффективности-*NTU*. Параметры жидкости задаются через блоки из библиотеки *Simscape*.

Тепловой пункт с контуром отопления представлены:

- прямым и обратным тепловым носителем, который циркулирует по трубопроводу, на пути прямого теплоносителя установлен пластинчатый теплообменник, модель подсистемы приведена на рис. 5;
- радиатором отопления (подсистема представлена на рис. 6).

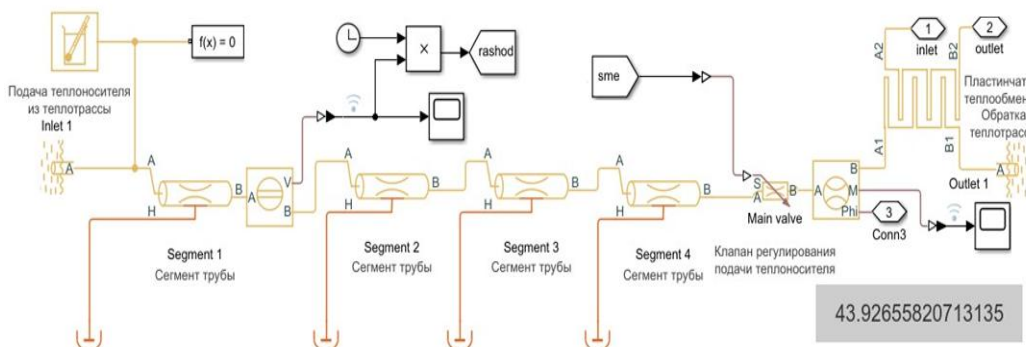


Рис. 5. Модель, содержащая прямой и обратный трубопровод и пластинчатый теплообменник

Fig. 5. A model containing a direct and return pipeline and a plate heat exchanger

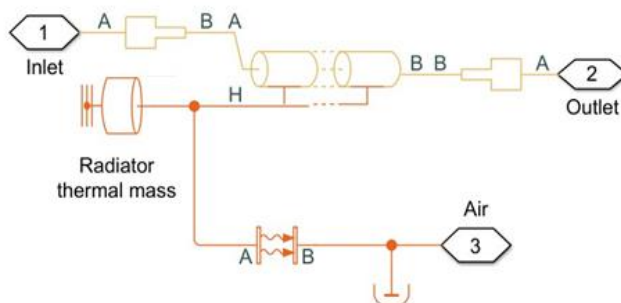


Рис. 6. Модель радиатора

Fig. 6. Radiator model

Полная модель теплового пункта с контуром отопления приведена на рис. 7, в ней применен источник угловой скорости, управление которым осуществляется сигналом с блока регулирования температуры.

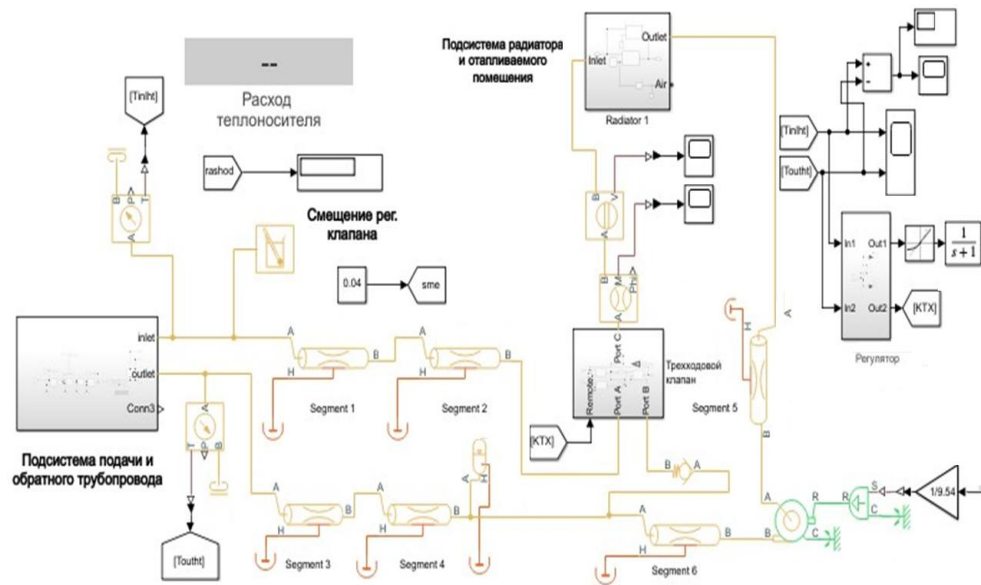


Рис. 7. Полная модель теплового пункта и контура отопления *Fig. 7. Complete model of the heating point and heating circuit*

Обсуждение результатов

При моделировании принято, что температура вне помещения в течение суток меняет свое значение по синусоидальному закону (возможно задание других вариантов изменения температуры). Данные по изменению температуры представлены на рисунке 8.



Рис. 8. График изменения температуры воздуха за пределами помещения *Fig. 8. Graph of changes in the air temperature outside the room*

Полученные в результате моделирования график разницы температур теплоносителя до теплообменника и после него и график, отражающий степень открытия клапана отображены на рисунке 9.

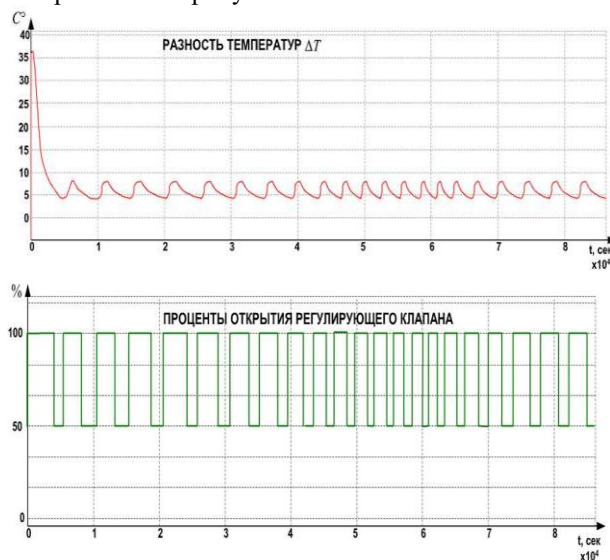


Рис. 9. Графики, полученные в системе с регулирующим клапаном *Fig. 9. Graphs obtained in a system with a control valve*

Графики, полученные при моделировании системы с частотно-регулируемым электроприводом, приведены на рисунках 10 и 11.



Рис. 10 График, отражающий колебание разности температур, зафиксированных датчиками перед теплообменником и после него

Fig. 10 A graph showing the fluctuation of the temperature difference recorded by the sensors before and after the heat exchanger

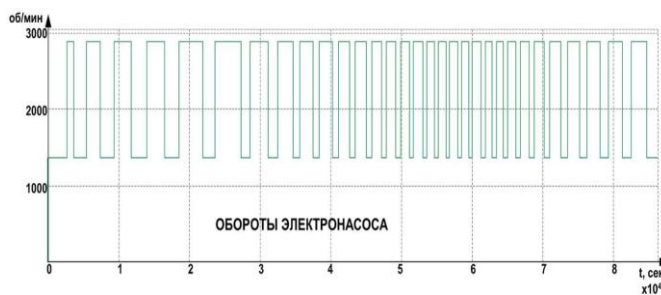


Рис. 11. График изменения частоты вращения двигателя в зависимости от значения разности температур

Fig. 11. Graph of the engine speed change depending on the value of the temperature difference

Анализ представленных графиков позволяет сделать вывод о том, что частотно-регулируемый электропривод насоса обрабатывает заданный технологическим процессом цикл.

Выводы

В работе изложены проблемы, которые выявлены на реальном объекте, для решения которых предложено использование частотно-регулируемого электропривода для управления температурой в помещениях, расположенных в здании, где установлен индивидуальный тепловой пункт.

Предложен алгоритм управления температурой теплоносителя.

Произведена разработка модели индивидуального теплового пункта с разными вариантами регулирования разницы температур теплоносителя прямого и обратного потока.

Использование регулирующего клапана приводит к тому, что насос постоянно включен на максимальные показатели, так как регулирование осуществляется путем перетока через клапан, тогда как электропривод с частотным регулированием периодически задействован в технологическом процессе на пониженных оборотах, что ведет к снижению степени его износа и экономии теплоносителя.

Предложенный вариант нашел практическую реализацию на действующем объекте путем установки частотного преобразователя и шкафа автоматики с промышленным контроллером в индивидуальный тепловой пункт.

Связь промышленного контроллера с частотным преобразователем реализована по шине *Modbus*.

Промышленный контроллер осуществляет управление частотным преобразователем по разработанному оптимальному алгоритму.

К достоинствам предлагаемого решения также можно отнести удобство эксплуатации и обслуживания за счет присутствия окон визуализации процессов, происходящих на реальном объекте.

Литература

1. Ротов П.В., Сивухин А.А., Ротова М.А., и др. Об эффективности управления циркуляцией горячей воды // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. № 6. С. 117-129.

2. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., et al. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems // E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020), Saint-Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.
3. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., et al. Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor // High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020), Prague, Czech Republic.
4. Синюкова Т.В., Левин П.Н. Метод ускорения пускового алгоритма для прямого управления моментом // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. № 12. С. 60-67.
5. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Проблемы энергетики. 2019. № 5. С.87-96.
6. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2020. № 2. С. 65-74.
7. Грачева Е.И., Наумов О.В. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей. Монография. М.: РУСАЙНС, 2017. 168 с.
8. Khasanov S.R., Gracheva E.I., Toshkhodzhaeva M.I., et al. Reliability modeling of high-voltage power lines in a sharply continental climate // E3S Web of Conferences. 2020. V. 178. art. no. 01051.
9. Gracheva E.I., Naumov O.V. Evaluation criteria of contact group technical state concerning electrical appliances // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Volume 8. Issue 4. pp. 26763–26770.
10. Dovgun V., Temerbaev S., Chernyshov M., et al. Distributed power quality conditioning system for three-phase four-wire low voltage networks // Energies. 2020. V. 13. Issue 18. art. no. 4915. doi: 10.3390/en13184915.
11. Tarnekar S.G., Bante K.G., Tutakane D.R. Use Of Smart Drives and PLC for Energy Saving // 2018 International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS). Nagpur. 2018. P. 2.
12. Шилин А.А., Букреев В.Г. Нелинейная математическая модель теплопотребления с учетом характеристик элементов теплового узла // Научный вестник НГТУ. 2012. №2 (47). С. 107-114.
13. Mecke R. Efficient induction motor drive with multilevel inverter and variable rotor flux // 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Edinburgh, UK. 2017. Pp. 1.
14. Yilong Wang; Hassan H. Eldeeb; Haisen Zhao; et al. Sectional Variable Frequency and Voltage Regulation Control Strategy for Energy Saving in Beam Pumping Motor Systems // IEEE Access (Volume: 7). China. 2019. Pp. 4.
15. Юсуфов Ш.А., Магомедов Т.Ю. Индивидуальные тепловые пункты: их преимущества перед центральными в области жилищно-коммунального хозяйства // Молодой ученый. 2018. №36 (222). С. 11-14.
16. Солдатенков А.С., Потапенко А.Н., Глаголев С.Н. Разработка и исследование математической модели управления автоматизированным индивидуальным пунктом // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. № 1 (140). С. 41-48.
17. Кунгс Я.А., Цугленок Н.В., Животов О.Н., и др. Индивидуальный тепловой пункт (концептуальный проект) // Вестник КрасГАУ. 2014. № 11. С. 196-199.
18. Петров С.П., Подмастерьев К.В., Пилипенко А.В., и др. Методы контроля и управления тепловыми и гидравлическими режимами индивидуальных тепловых пунктов зданий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 3 (341). С. 171-179.
19. Сабирова Л.Р. Построение автоматизированного индивидуального пункта на основе искусственного интеллекта // Научному прогрессу – творчество молодых. 2019. № 2. С. 164-166.
20. Левцев А.П., Лапин Е.С. Исследование энергоэффективного мембранного насоса в системе индивидуального теплового пункта здания // Приволжский научный журнал. 2018. № 4 (48). С. 53-59.

Авторы публикации

Синюкова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, e-mail: stw0411@mail.ru.

Синюков Алексей Владимирович – аспирант, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, e-mail: zeitsn@yandex.ru.

References

1. Rotov PV, Sivukhin AA, Rotova MA, et al. Ob effektivnosti upravleniya tsirkulyatsiei goryachei vody. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020;6:117-129.
2. Meshcheryakov V, Sinyukova T, Sinyukov A, et al. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems. *E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020)*, Saint-Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.
3. Meshcheryakov V, Sinyukova T, Sinyukov A, et al. *Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor*. High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020), Prague, Czech Republic.
4. Sinyukova TV, Levin P.N. Metod uskoreniya puskovogo algoritma dlya pryamogo upravleniya momentum. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*. 2012;12:60-67.
5. Grachieva EI, Shakurova ZM, Abdullazyanov RE. Comparative analysis of the most common deterministic methods for determining energy losses in workshop networks. *Problems of Energy*. 2019;5:87-96.
6. Grachieva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Analysis and estimation of power saving in systems of in-plant power supply. *Energy problem*. 2020;2:65-74.
7. Grachieva EI, Naumov OV. *Loss of electricity and the effectiveness of the operation of equipment workshop networks*. Monograph. M.: RUSAINS, 2017. 168.
8. Khasanov SR, Gracheva EI, Toshkhodzhaeva MI, et al. *Reliability modeling of high-voltage power lines in a sharply continental climate*. *E3S Web of Conferences*. 2020;178:01051.
9. Grachieva EI, Naumov OV. Evaluation criteria of contact group technical state concerning electrical appliances. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016;8(4):26763–26770.
10. Dovgun V, Temerbaev S, Chernyshov M, et al. Distributed power quality conditioning system for three-phase four-wire low voltage networks. *Energies*. 2021;13(18):4915. doi: 10.3390/en13184915.
11. Tarnekar SG, Bante KG, Tutakane DR. *Use Of Smart Drives and PLC for Energy Saving*. 2018 International Conference on Smart Electric Drives and Power System (ICSEDPS). Nagpur. 2018. P. 2.
12. Shilin AA, Bukreev VG. Nelineinaya matematicheskaya model' teplopotrebleniya s uchetom kharakteristik elementov teplovogo uzla. *Nauchnyi vestnik NGTU*. 2012;2(47):107-114.
13. Mecke R. *Efficient induction motor drive with multilevel inverter and variable rotor flux*. 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Edinburgh, UK. 2017. P. 1.
14. Yilong Wang; Hassan H. Eldeeb; Haisen Zhao; Osama A. Mohammed. Sectional Variable Frequency and Voltage Regulation Control Strategy for Energy Saving in Beam Pumping Motor Systems. *IEEE Access (Volume: 7)*. China. 2019;7:4.
15. Yusufov ShA, Magomedov TYu. Individual'nye teplovyie punkty: ikh preimushchestva pered tsentral'nymi v oblasti zhilishchno-kommunal'nogo khozyaistva. *Molodoi uchenyi*. 2018;36 (222):11-14.
16. Soldatenkov AS, Potapenko AN, Glagolev SN. Razrabotka i issledovanie matematicheskoi modeli upravleniya avtomatizirovannym individual'nyim punktom. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*. 2012;1(140):41-48.
17. Kungs YaA, Tsuglenok NV, Zhivotov ON, et al. Individual'nyi teplovoi punkt (konueptual'nyi proekt). *Vestnik KrasGAU*. 2014;11:196-199.
18. Petrov SP, Podmaster'ev KV, Pilipenko AV, et al. Metody kontrolya i upravleniya teplovymi i gidravlichesкими rezhimami individual'nykh teplovykh punktov zdaniy. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2020;3 (341):171-179.
19. Sabirova LR. Postroyeniye avtomatizirovannogo individual'nogo punkta na osnove iskusstvennogo intellekta. *Nauchnomu progressu – tvorchestvo molodykh*. 2019;2:164-166.

20. Levitsev AP, Lapin ES. Issledovanie energoeffektivnogo membrannogo nasosa v sisteme individual'nogo teplovogo punkta zdaniya. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*. 2018;4(48):53-59.

Authors of the publication

Tatyana V. Sinyukova – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Alexey V. Sinyukov – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Получено

19 августа 2021г.

Отредактировано

26 августа 2021г.

Принято

26 августа 2021г.