



Повышение эффективности систем создания микроклимата

Н.Ю. Саввин^{1✉}, Т.Н. Ильина², Р.В. Лесовик³, А.Г. Шевцова⁴, В.М. Киреев⁵

^{1,2,3,4,5}Белгородский государственный технологический университет, Белгород, Россия

Аннотация. Работа посвящена исследованию эффективности работы конденсаторной установки холодильной машины с использованием частотных преобразователей для регулирования скорости вращения вентиляторов. Исследование направлено на повышение энергетической эффективности системы за счет оптимизации режимов работы вентиляторов и поддержания стабильной температуры хладагента на выходе из конденсатора. Проведенное моделирование демонстрирует, что функционирование одного вентилятора на предельной частоте может быть сопоставимо по эффективности охлаждения с работой нескольких вентиляторов на меньших скоростях. Такой результат свидетельствует о возможности снижения энергопотребления при использовании частотных преобразователей для регулирования работы вентиляторов. В статье рассмотрен принцип работы автономного инвертора напряжения, применяемого для генерации синусоидального выходного сигнала, а также особенности реализации векторной широтно-импульсной модуляции. Описаны ключевые этапы моделирования – формирование управляющих сигналов, расчет временных интервалов коммутации обмоток двигателя и преобразование координат из трехфазной системы в двухфазную систему координат α и β . Приведена структура блоков формирователей секторов и пространственный вектор напряжений, полученный в результате моделирования. Результаты моделирования показали эффективность предложенных методов для повышения качества выходного напряжения и улучшения характеристик работы вентиляционных систем. Исследование имеет практическое значение для проектирования и модернизации систем управления вентиляторами конденсаторов холодильных установок, способствуя снижению энергопотребления и повышению надежности оборудования. Статья написана на базе Центра Высоких Технологий Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.

Ключевые слова: холодильные комплексы, энергоэффективность, конденсаторный узел, режимы работы вентиляторов конденсаторов, преобразователь частоты для регулирования частотой вращения вентиляторов

Для цитирования: Саввин Н.Ю., Ильина Т.Н., Лесовик Р.В., Шевцова А.Г., Киреев В.М. Повышение эффективности систем создания микроклимата // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 501–515. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-501-515>. EDN: RCDNSS.

Original article

Improving the efficiency of microclimate creation systems

Nikita Yu. Savvin^{1✉}, Tatyana N. Ilyina², Ruslan V. Lesovik³,
Anastasia G. Shevtsova⁴, Vitaly M. Kireev⁵

^{1,2,3,4,5}Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

Abstract. The work is devoted to the study of the efficiency of the condenser unit of a refrigeration machine using frequency converters to regulate the rotation speed of fans. The research is aimed at increasing the energy efficiency of the system by optimizing the operating modes of the fans and maintaining a stable temperature of the refrigerant at the outlet of the condenser. The simulation demonstrates that the operation of one fan at the maximum frequency can be comparable in terms of cooling

efficiency with the operation of several fans at lower speeds. This result indicates the possibility of reducing energy consumption when using frequency converters to regulate fan operation. The article discusses the principle of operation of an autonomous voltage inverter used to generate a sinusoidal output signal, as well as the implementation features of vector pulse width modulation. The key stages of modeling are described – the formation of control signals, the calculation of time intervals for switching motor windings and the transformation of coordinates from a three-phase system to a two-phase coordinate system α and β . The structure of the sector shaper blocks and the spatial stress vector obtained as a result of the simulation are presented. The simulation results have shown the effectiveness of the proposed methods to increase the quality of the output voltage and improve the performance of ventilation systems. The study is of practical importance for the design and modernization of fan control systems for condensers in refrigeration units, contributing to lower energy consumption and increased equipment reliability. The article was written on the basis of the Center for High Technologies of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Keywords: refrigeration complexes, energy efficiency, condenser unit, operating modes of condenser valves, frequency converter for regulating the rotational speed of the valves

For citation: Savvin N.Yu., Ilyina T.N., Lesovik R.V., Shevtsova A.G., Kireev V.M. Improving the efficiency of microclimate creation systems. Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate. 2025;15(3):501-515. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-501-515>. EDN: RCDNSS.

ВВЕДЕНИЕ

Рост потребности в системах охлаждения как в промышленной, так и в бытовой сферах диктует необходимость разработки энергоэффективных решений, направленных на снижение потребления электроэнергии холодильными установками. Это может быть достигнуто за счет совершенствования алгоритмов управления и модернизации элементов гидравлической системы.

Согласно исследованиям Международного института, основанным на сравнительном анализе энергопотребления в различных секторах экономики по всему миру, около 17 % глобального электропотребления приходится на системы искусственного охлаждения, включая климатические установки [1, 2]. Наибольшие энергозатраты характерны для таких объектов, как холодильные комплексы, распределительные центры с низкотемпературным хранением и холодильные установки

мясоперерабатывающих производств. В этих предприятиях до 50 % всей используемой электроэнергии уходит на процессы охлаждения, а в летний период доля может возрастать до 60 %. В связи с этим одной из приоритетных задач в области повышения энергоэффективности холодильного оборудования является оптимизация процесса конденсации. Успешное решение данной задачи позволяет стабилизировать работу оборудования, снизить суммарное энергопотребление, продлить срок его службы и увеличить интервалы между техническим обслуживанием. Суть оптимизации заключается в регулировании температуры и давления хладагента в зоне конденсации, что способствует повышению общей эффективности и уменьшению энергозатрат. Так как работа конденсатора тесно связана с эффективностью системы охлаждения, последняя также требует рационального управления [3, 4].



Рис. 1. Внешний вид вентиляторов холодильной машины
Fig. 1. The exterior of the fans of the refrigerating machine

Переохлаждение определяется как разница между температурой конденсации хладагента при заданном давлении и фактической температурой жидкости в тех же условиях. Эффективный диапазон переохлаждения составляет от 4 до 7 К. Для достижения оптимальных значений используется регулирование воздушного потока через теплообменную поверхность конденсатора. Это осуществля-

ется с помощью вентиляторов, чьи рабочие характеристики должны быть согласованы с тепловой нагрузкой конденсатора. В качестве примера в данном исследовании рассматривается холодильный агент типа R22. Воздух, проходящий через теплообменник конденсатора с начальной температурой t_{ae} , нагревается до температуры t_{as} . Детальный график процесса теплопереноса представлен на рис. 2.

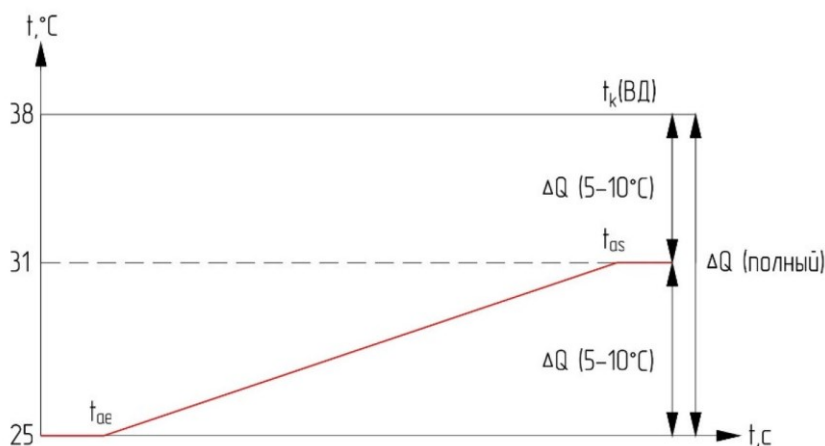


Рис. 2. Изменение температуры воздуха при охлаждении конденсатора
 t_k – показания температуры конденсации, $\Delta\theta$ – разность температур
Fig. 2. Air temperature change during condenser cooling
 t_k – condensation temperature readings, $\Delta\theta$ – temperature difference

Снижение теплопередающих характеристик конденсатора нарушает процесс конденсации хладагента, что ведет к росту давления в контуре до критических значений. Это увеличивает нагрузку на компрессорный электродвигатель, повышая его энергопотребление вследствие возросшего сопротивления рабочего цикла. Давление на нагнетательной линии может стать причиной отказа компрессора и других ключевых компонентов системы, включая испаритель. Сопутствующие эффекты – утечка хладагента, перегрев компрессора и снижение давления на всасывании – ухудшают тепловой режим двигателя. Перегрев обмоток ведет к росту тока, активации защит и аварийной остановке агрегата управляющим модулем.

Во время функционирования холодильного оборудования вентиляторы, обслуживающие конденсатор, могут либо работать непрерывно, либо включаться циклично в зависимости от текущего температурного режима и нагрузки. Также возможно изменение скорости вращения лопастей, что дает возможность гибко управлять воздушным потоком и повышать эффективность отвода тепла от конденсатора [6].

Устройства управления работой вентиляторов представляют собой специализирован-

ные системы, обеспечивающие корректную и эффективную работу вентиляторных узлов, способствуя поддержанию оптимальных параметров теплообмена.

Одним из способов улучшения энергетической эффективности вентиляторных систем является внедрение частотно-регулируемого привода (ЧРП), который обеспечивает плавное регулирование скорости вращения всех вентиляторов одновременно. Такой подход позволяет достичь уровня теплоотдачи, сопоставимого с режимом работы вентиляторов на максимальной мощности при традиционном ступенчатом управлении [7]. Следует учитывать, что интеграция ЧРП заметно увеличивает стоимость системы управления.

МЕТОДЫ

Для обоснования применения частотных преобразователей необходимо провести анализ режимов работы вентиляторов с плавным регулированием скорости, при которых обеспечивается эквивалентный уровень охлаждения, сравнимый с режимами включения одного, двух или трех вентиляторов на полной мощности. Основным показателем эффективности теплоотвода при этом выступает температура хладагента на выходе из конденсатора [9]. Моделирование процессов проводилось с применением комплекса инженерного анализа

SolidWorks, предоставляющего широкий спектр инструментов для расчета рабочих параметров проектируемых конструкций [8]. Особенно следует отметить модуль SolidWorks Flow Simulation, полностью интегрированный в основную CAD-платформу, что обеспечивает легкий импорт трехмерных моделей и последующее выполнение комплексного теплотехнического анализа [10].

При моделировании жидкостной среды необходимо задать ее физико-технические характеристики – плотность, вязкость, температуру и другие параметры. С помощью инструментов SolidWorks создается расчетная сетка, описывающая структуру потока жидкости. Далее возможно применение различных методов анализа – от оценки скоростей потока до распределения давления и других параметров. В процессе выполненного исследования была сформирована численная модель, описывающая поведение хладагента в пределах пластинчатого теплообменного устройства, являющегося частью конденсаторного узла холодильной установки, в составе которой предусмотрена трехвентиляторная систе-

ма охлаждения. Для реализации моделирования использовался программный модуль SolidWorks Flow Simulation [11]. Пространственная конфигурация теплообменного аппарата была смоделирована с применением инструментов твердотельного проектирования, доступных в среде SolidWorks.

Материалы, соответствующие конструкционным элементам, задавались следующим образом: пластиковые составные части для вентиляторных лопастей, металлические компоненты для несущих и крепежных деталей, а также медные трубки, соединяющие конденсатор с гидравлической частью системы [12].

Для оценки эффективности работы системы охлаждения были использованы реальные геометрические параметры промышленных вентиляторов, применяемых в конденсаторных установках [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения эффективности работы конденсаторной установки холодильной машины с одним центральным вентилятором, работающим с частотой 1400 об/мин, представлены на рис. 3–5.

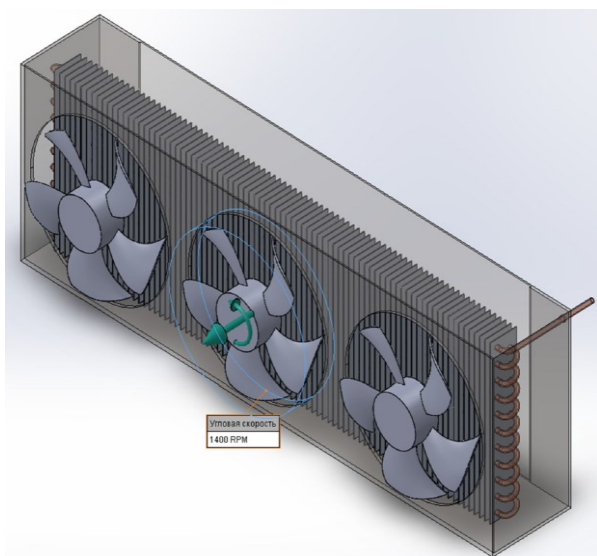


Рис. 3. Режимы функционирования вентиляторов (1×1400 об/мин)
Fig. 3. Fan operating modes (1×1400 revolutions per minute)

На следующем этапе была проведена симуляция, включающая расчет скорости вращения трех вентиляторов с сохранением прежней эффективности системы охлаждения [14].

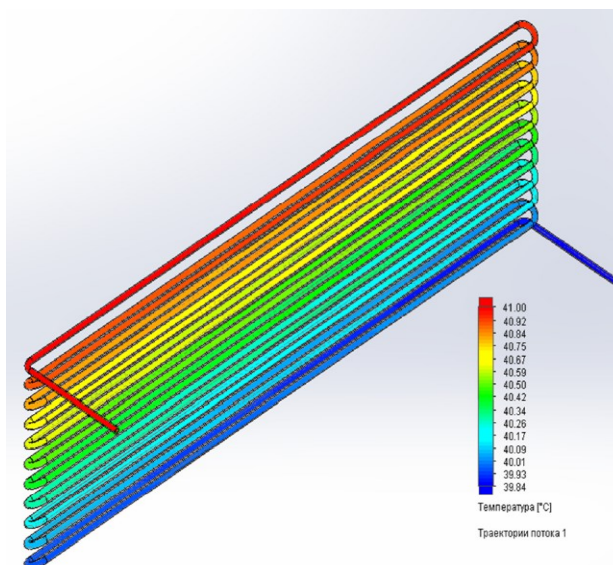


Рис. 4. Температурный профиль охлаждающей жидкости внутри трубки при скорости вращения 1400 об/мин (один вентилятор)
Fig. 4. Temperature profile of the coolant inside the tube at 1400 revolutions per minute (one fan)

Данный процесс обеспечивал поддержание одинаковой температуры теплоносителя на выходе из конденсаторного узла. Полученные результаты моделирования визуализированы на рис. 7–10.

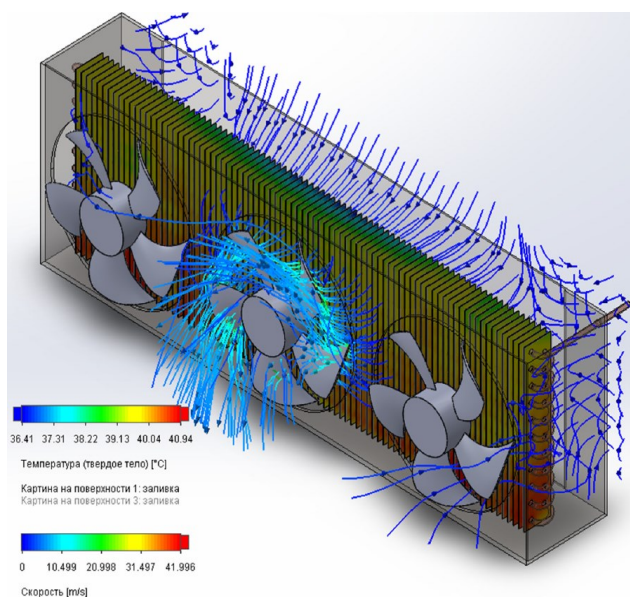


Рис. 5. Аэродинамическая характеристика процесса охлаждения воздушной средой при скорости вращения 1400 об/мин (один вентилятор)

Fig. 5. Aerodynamic characteristics of the air cooling process at a rotation speed of 1400 revolutions per minute (one fan)

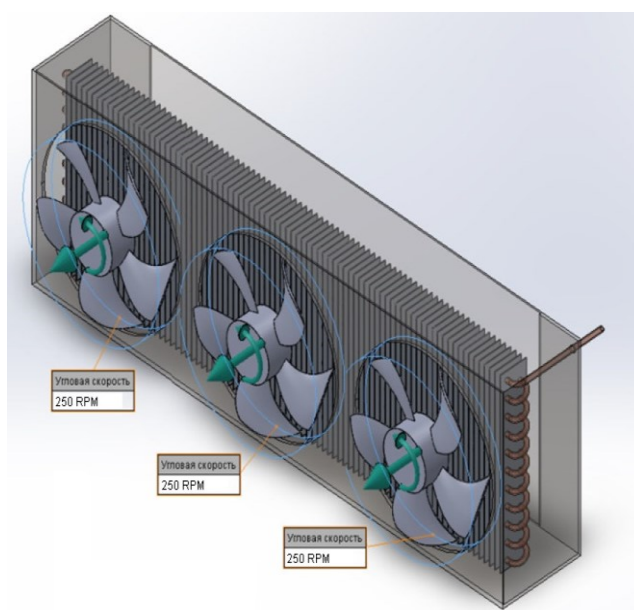


Рис. 6. Рабочие параметры вентиляторов при скорости вращения 250 об/мин (три вентилятора)

Fig. 6. Operating parameters of the fans at a rotation speed of 250 revolutions per minute (three fans)

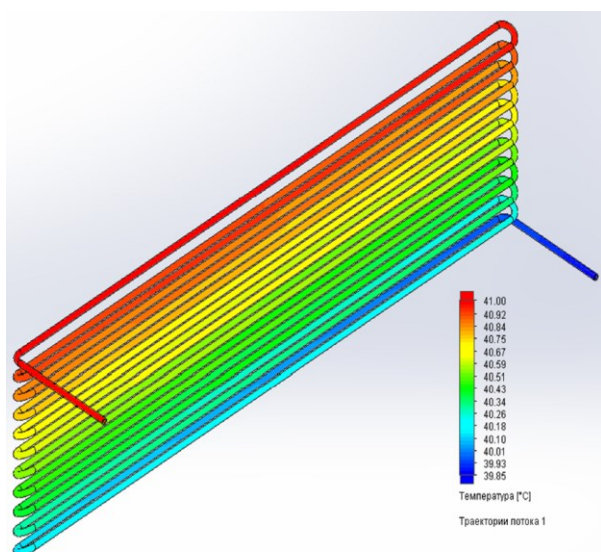


Рис. 7. Термодинамические параметры хладагента в трубке при работе трех вентиляторов с частотой 250 об/мин

Fig. 7. Thermodynamic parameters of the refrigerant in the tube during operation of three fans with a frequency of 250 revolutions per minute

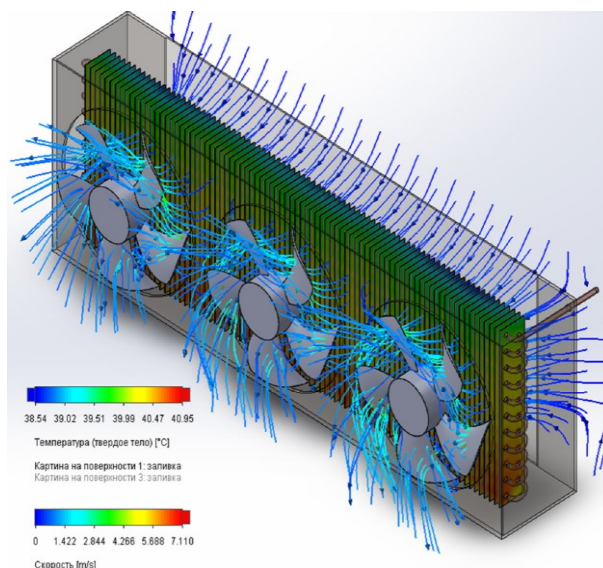


Рис. 8. Аэродинамическая характеристика процесса охлаждения воздушной средой при работе трех вентиляторов с частотой 250 об/мин

Fig. 8. Aerodynamic characteristics of the air cooling process during operation of three fans with a frequency of 250 revolutions per minute

По результатам проведенного моделирования было установлено, что работа одного вентилятора с частотой 1400 об/мин обеспечивает тот же уровень теплоотведения, что и

три вентилятора, вращающиеся со скоростью 250 об/мин.

В этих условиях температура хладагента на выходе составила 39,85 °C. На следующем

этапе исследования было рассчитано, какая частота вращения двух вентиляторов из системы необходима для достижения аналогичного уровня теплоотвода и поддержания тем-

пературы хладагента на том же уровне. Результаты вычислительных экспериментов представлены в виде графиков, которые можно увидеть на рис. 10–11.

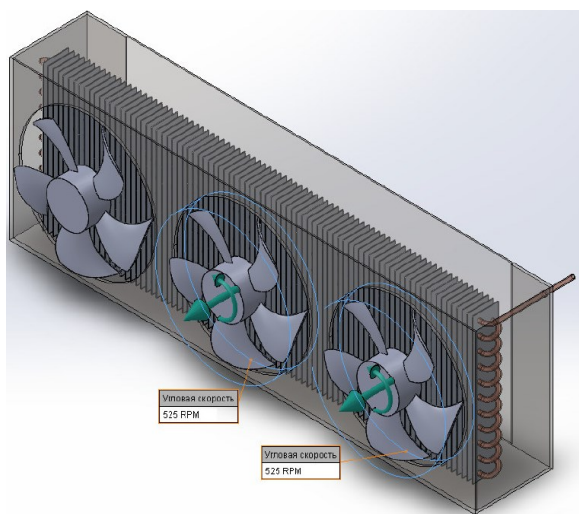


Рис. 9. Рабочие характеристики вентиляторов при частоте вращения 525 об/мин (два вентилятора)
Fig. 9. Fan operating characteristics at rotational speed 525 revolutions per minute (two fans)

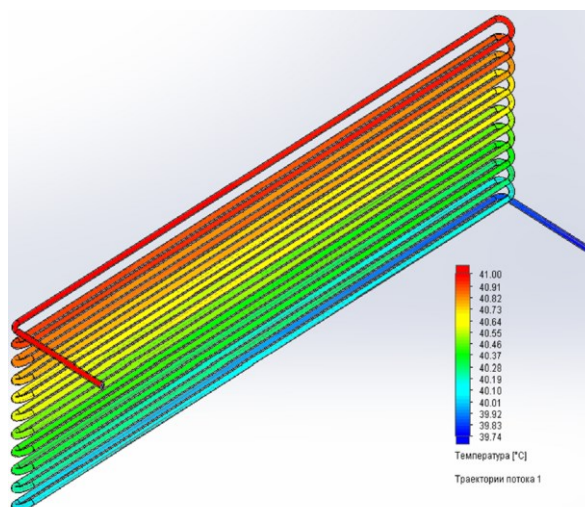


Рис. 10. Термодинамические параметры хладагента в трубке при работе двух вентиляторов с частотой 525 об/мин
Fig. 10. Thermodynamic parameters of the refrigerant in the tube during operation of two fans with a frequency of 525 revolutions per minute

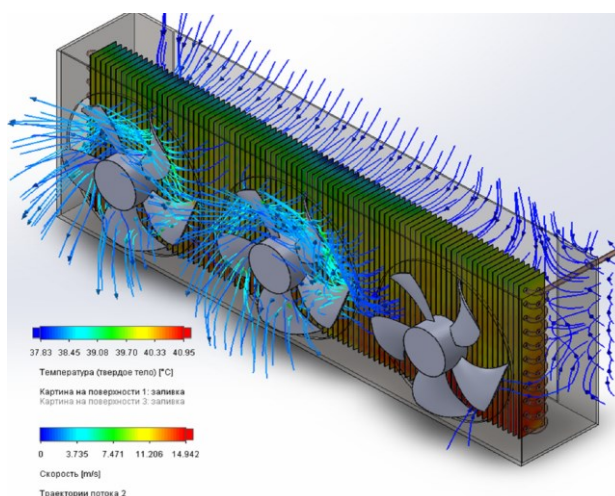


Рис. 11. Аэродинамическая характеристика охлаждения воздушной средой при работе двух вентиляторов с частотой 525 об/мин
Fig. 11. Aerodynamic characteristics of air cooling during operation of two fans with a frequency of 525 revolutions per minute

По результатам численного моделирования было установлено, что применение одного вентилятора с частотой вращения 1400 об/мин позволяет достичь сопоставимого уровня тепловой эффективности как и при одновременной работе трех вентиляторов, функционирующих на скорости 250 об/мин.

В процессе анализа зафиксирована стабильная температура хладагента, равная 39,85 °С.

Графическая интерпретация зависимости температурного режима охлаждающей среды от скорости вращения вентилятора представлена на рис. 12.

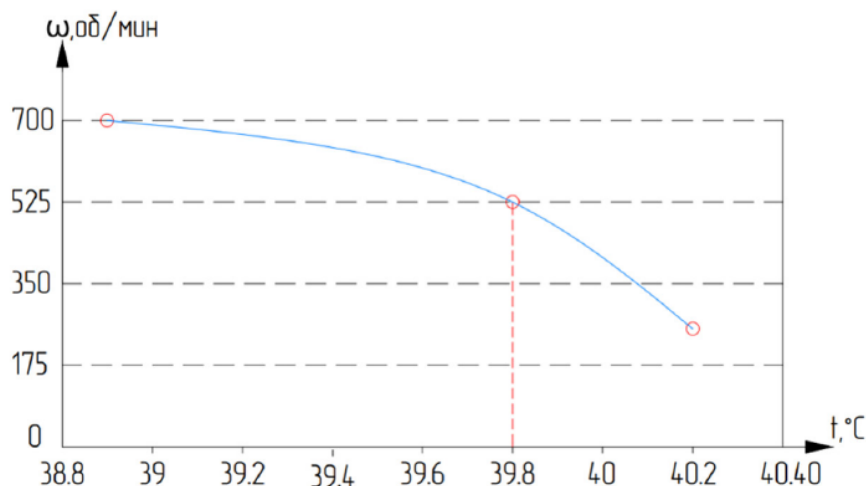


Рис. 12. Визуализация корреляционной связи между температурными показателями охладителя и оборотами воздуходвигателей

Fig. 12. Visualization of the correlation between the temperature parameters of the cooler and the revolutions of the air-pumping mechanisms

Вследствие выполненного моделирования установлено, что необходимо применение преобразователя частоты для регулирования частотой вращения вентиляторов. Особо следует отметить, что управление блоком конденсаторных батарей и вентиляторов осуществляется через частотный преобразователь. Для осмысления основополагающих

принципов создания математической модели необходимо проанализировать методы генерации синусоидальных напряжений на выходе частотного преобразователя. Генерация синусоидального выходного сигнала производится посредством автономного инвертора напряжения [17–26], который также известен как автономный инвертор напряжения (рис. 13).

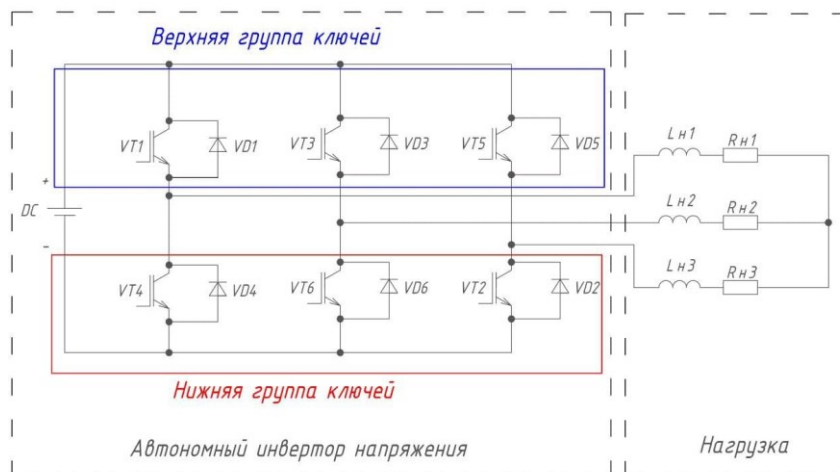


Рис. 13. Принципиальная схема автономного инвертора напряжения преобразователя частоты

Fig. 13. Schematic diagram of an autonomous voltage inverter of a frequency converter

Активный инвертор преобразователя частоты (АИПЧ) состоит из шести биполярных транзисторов с изолированным затвором, которые разделены на две группы: верхние и нижние ключи.

Процесс проектирования системы управления требует определения оптимальных комбинаций состояний переключателей для

поддержания заданного уровня выходного напряжения на выходе АИПЧ.

Для этого необходимо разработать схему генерации широтно-импульсной модуляции (ШИМ), основанную на синусоидальных входных напряжениях фаз А, В и С [27].

Метод векторной ШИМ определяет не конкретные значения мгновенно приложенных

напряжений к катушкам электромотора, а точные промежутки времени переключения обмоток через силовую схему моста, необходимые для формирования требуемого направления электрического поля. Исследование структур активной инверсии демонстрирует наличие

восемью допустимых комбинаций подключения транзисторных ключей, включая две позиции покоя. Любое из указанных состояний создает конкретный ориентированный вектор, формирующий геометрический правильный шестиугольник (рис. 14).

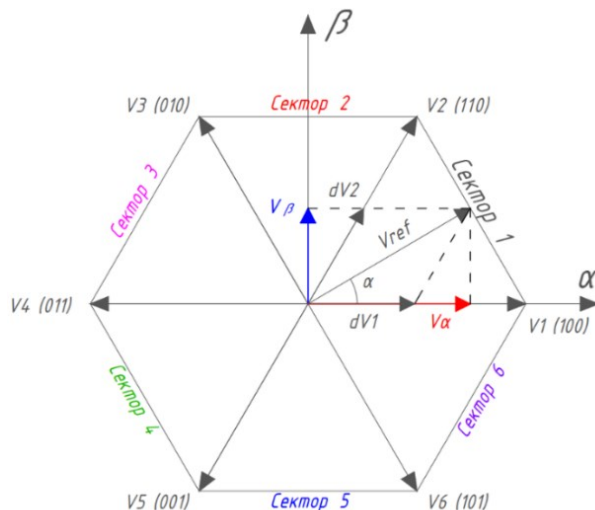


Рис. 14. Система векторов напряжений
Fig. 14. The system of stress vectors

Для формирования вектора напряжений необходимо произвести преобразование Парка, т. е. выполнить преобразование из неподвижной трехфазной системы координат в двухфазную α и β . [28].

Формирование вектора напряжения требует предварительного осуществления преобразования Парка, которое заключается в переходе из стационарной трехфазной системы координат в подвижную двухфазную систему α и β .

После определения ориентации результирующего вектора напряжения относительно полученной двухфазной системы, следующим шагом становится идентификация сектора, в границах которого этот вектор расположен. Установление конкретного сектора производится посредством сравнительного анализа углового значения самого вектора с границами секторов, обозначенными пересекающимися векторами напряжений.

Выполнение данной процедуры осуществляет функциональный модуль Sector Constructor.

Конструктивная схема частотного преобразователя (рис. 15) включает в себя следующие компоненты:

- источник питания с переменным напряжением промышленной сети;

- устройство для однонаправленного преобразования энергии (выпрямитель);

- емкость фильтра, предназначенная для сглаживания пульсаций в промежуточном контуре постоянного тока;

- шесть управляемых полупроводниковых ключа;

- активно-индуктивную нагрузку и приборы измерения осцилляционного типа для регистрации временных характеристик напряжений и токов нагрузки.

Система управления частотно-регулируемым приводом реализована на основе нескольких функциональных узлов: преобразователя координат Парка, устройства задания временных интервалов, модуля определения секторов вращения векторного напряжения и генератора синусоидальных форм напряжения питания.

Значение частоты выходного напряжения устанавливается через блок, формирующий постоянную величину частоты f_z , выраженную в герцах. В ходе моделирования были получены осциллограммы, отражающие поведение как линейных, так и фазных напряжений на выходе нагрузки. Эти графики представлены на рис. 16–19 и соответствуют работе системы при установленной частоте выходного напряжения $f = 50$ Гц.

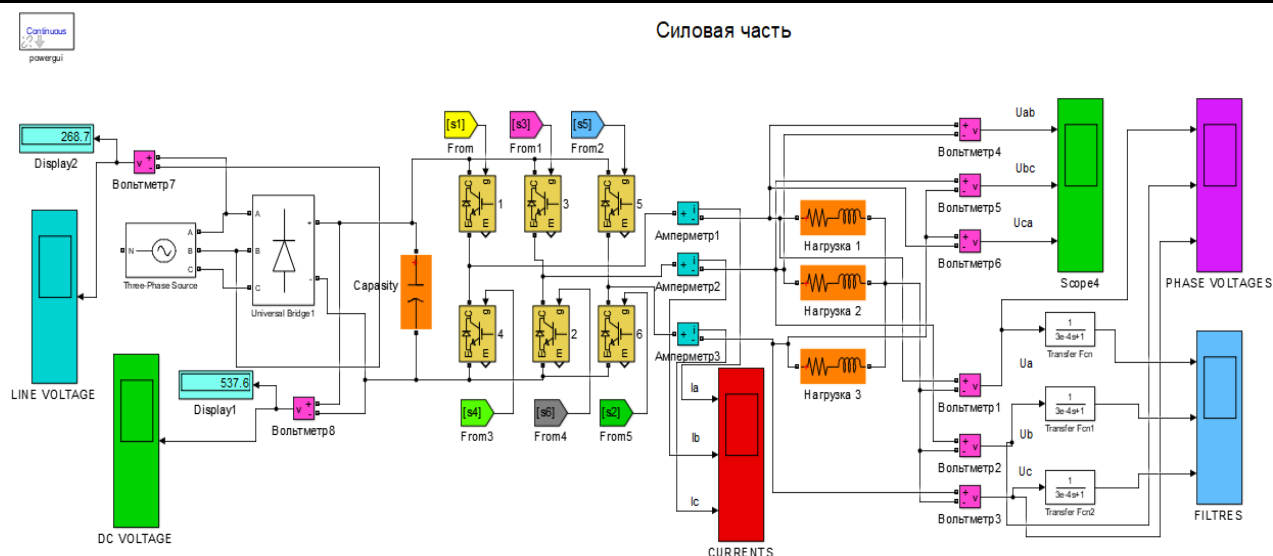


Рис. 15. Энергетический блок устройства преобразования частотных характеристик электрического сигнала

Fig. 15. The power unit of the device for converting the frequency characteristics of an electrical signal

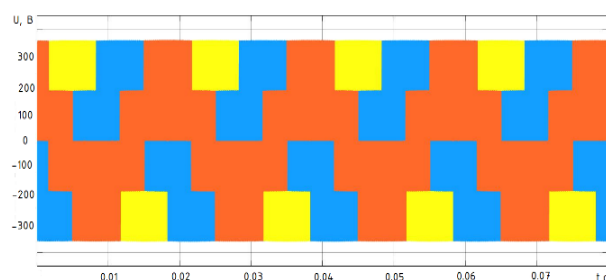


Рис. 16. Графическое представление осцилляции линейных потенциалов на подключенной нагрузке

Fig. 16. Graphical representation of linear potential oscillations on a connected load

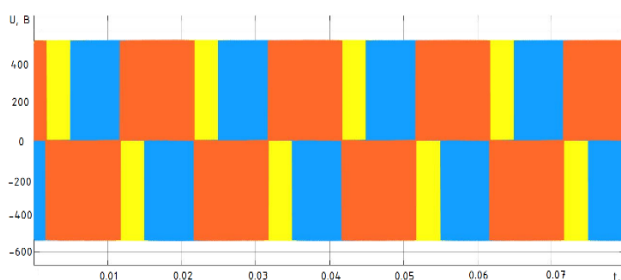


Рис. 17. Диаграмма колебаний межфазных напряжений на потребителе электроэнергии

Fig. 17. Diagram of fluctuations of interfacial voltages at the electric power consumer

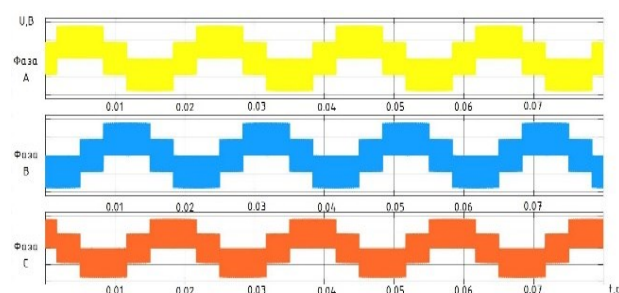


Рис. 18. График временных зависимостей потенциала фазы нагрузки в каналах A, B, C

Fig. 18. Graph of time dependences of the load phase potential in channels A, B, C

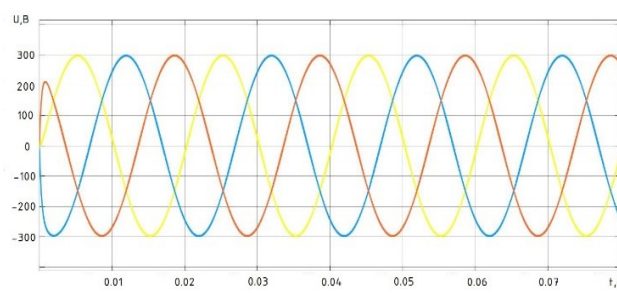


Рис. 19. Графическое отображение гармонических составляющих межфазных напряжений на нагрузочном элементе после прохождения фильтрационных процессов

Fig. 19. Graphical representation of the harmonic components of the interfacial stresses on the load element after passing through filtration processes.

С помощью инструмента XY Graph для проверки правильности формирования пространственного вектора напряжений построен график вращения пространственного вектора (рис. 20).

Моделирование позволило проанализировать уровень нелинейных искажений, возникающих при эксплуатации частотного преобразователя с применением метода ШИМ. Новаторским аспектом исследования стало включение гипотез касательно активных со-

противлений основных компонентов электрической цепи. Так, предполагалось, что активное сопротивление открытых вентилях приближается к нулю, а закрытых – стремится к бесконечно большому величинам. Используемые алгоритмизированные подходы обеспечивают значительное улучшение характеристик выходного напряжения, хотя предъявляют повышенные требования к ресурсам вычислений относительно стандартных схем широтно-импульсной модуляции.

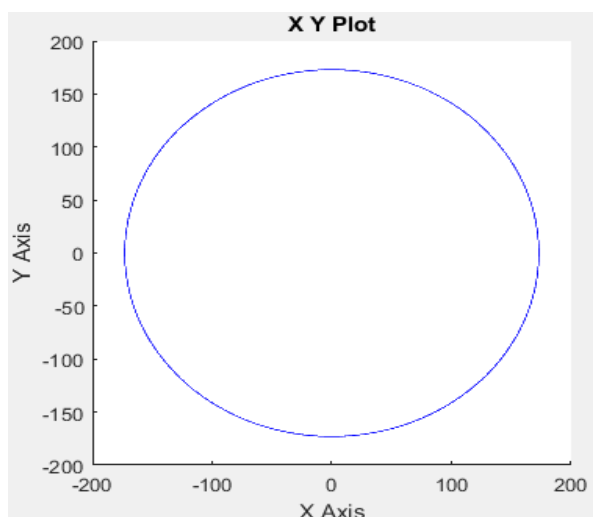


Рис. 20. Динамика траектории перемещения трехмерного вектора электрических потенциалов в вращающемся координатном пространстве

Fig. 20. Dynamics of the trajectory of a three-dimensional vector of electric potentials in a rotating coordinate space.

Работа частотно регулируемого преобразователя базируется на формировании ступенчатого изменения фазового напряжения, ограничивая количество допустимых векторных состояний фазного напряжения. Пространство напряжений делится на правильные шестиугольники, внутри каждого из которых возможно позиционирование итогового вектора напряжения путем пошагового переключения между ближайшими вершинами, обеспечивая возврат к начальной позиции фазы. Формируемое выходное напряжение определяется комбинацией трех смежных вершин, образующих замыкающий конец желаемого вектора напряжения в виде пространствременного треугольника. Применение технологии пространственной векторной ШИМ совместно с алгоритмами снижения гармонического состава и повышения эффективности операций переключения в силовых устройствах открывает новые перспективы повышения управляемости электроприводов вентиляторов. Использование новейших высокоэффективных микроконтроллеров дает возмож-

ность реализовать подобные стратегии, что положительно сказывается на результатах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа посвящена углублению методов анализа энергетической эффективности частотных преобразователей в схемах управления вентиляционными системами конденсаторов.

Проведен подробный обзор принципов проектирования пространственно-векторной ШИМ, раскрыты фундаментальные и практические аспекты разработки математической модели частотного преобразователя с функцией пространственно-векторной ШИМ. Моделирование проводилось средствами программного комплекса MATLAB/Simulink.

По результатам проведенных испытаний сформированы графики колебаний фазных и межфазных напряжений в нагрузочной цепи. Выявлены пути дальнейшего совершенствования подходов к формированию выходных сигналов, такие как дополнительная обработка сигнального тракта фильтрующими элементами и модернизация управляющих стра-

тегий. При помощи отображения траекторий вращающегося пространственного вектора в графике XY Graph проверялась достоверность проведенного моделирования. Современные технологические достижения, включающие применение частотных преобразователей с поддержкой пространственно-векторной ШИМ и инновационных решений по увеличению коэффициента полезного действия работы переключателей силовых модулей, открывают широкие возможности для повышения производительности электродвигателей промышленного назначения. Высокоскоростные цифровые платформы предоставляют значитель-

ные ресурсы для автоматизации производственных циклов. Практическая реализация предложенных разработок позволит увеличить производительность оборудования и обеспечить экономическую выгоду предприятиям. Особое значение имеет дальнейшая разработка способов дополнительной обработки спектрального состава выходного напряжения преобразователя, целью которой является уменьшение влияния отдельных гармоник. Такая мера приведет к снижению энергетических затрат на процессы коммутации и повысит показатели электромагнитной совместимости устройств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дюпон Ж.-Л., Домански П., Лебрен Ф., Циглер Ф. Роль холода в мировой экономике. 38-я Информационная записка МИХ по холодильным технологиям (июнь 2019 г.) // Холодильная техника. 2020. № 5. С. 6–13. EDN: UAYIY.
2. Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д. Математическое моделирование преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22. № 2. С. 46–58. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2023-2-46-58>. EDN: SGDZER.
3. Куцев Л.А., Саввин Н.Ю. Тепловизионные исследования оригинальной пластины теплообменника // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2021. № 1. С. 38–45. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-1-38-45>. EDN: JCGTZO.
4. Азизов. Д., Сайдиев Ф. Основы холодильной техники и технического обслуживания холодильных систем. Ташкент: Baktria press, 2017. 176 с.
5. Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д. Исследование эффективности охлаждения пластинчатого теплообменника конденсатора промышленной холодильной машины при различных скоростях вращения вентиляторов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 42–56. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2023-8-10-42-56>. EDN: FLWLIB.
6. Ильина Т.Н., Саввин Н.Ю., Аверкова О.А., Логачев К.И. Возобновляемые и вторичные источники энергии инженерных систем при эксплуатации и реконструкции зданий и сооружений // Вестник Евразийской науки. 2023. Т. 15. № 4. С. 1–12. EDN: ENJZMH.
7. Виноградов А.Б., Коротков А.А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2018. 184 с. EDN: UTVMTV.
8. Лунева С.К. Моделирование процессов тепломассопереноса в программной среде SolidWorks/FlowSimulation // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2018. № 2. С. 27–31. EDN: XQCQRV.
9. Ильина Т.Н., Саввин Н.Ю., Аверкова О.А., Логачев К.И. Цифровой двойник инженерных систем общественного здания // Вестник Евразийской науки. 2024. Т. 16. № 6. С. 1–11. EDN: WIIZJG.
10. Попов А.Ю. Моделирование распределения воздушного потока в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. № 3-3. С. 74–77. EDN: YFMCBP.
11. Соловьёв А.Н., Глазунова Л.В. Моделирование процесса охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры в SolidWorks // Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т. 10. № 4. С. 466–473. EDN: NBRXPZ.
12. Саввин Н.Ю. Математическое моделирование жизненного цикла инженерных систем здания // Инженерные системы и сооружения. 2024. № 4. С. 15–23. <https://doi.org/10.36622/2074-188X.2024.34.62.002>. EDN: CVDXBN.
13. Коркодинов Я.А. Обзор семейства k-ε моделей для моделирования турбулентности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2013. Т. 15. № 2. С. 5–16. EDN: QYXPQP.
14. Корниенко Ф.В. Увеличение эффективности испарительного конденсатора компрессионных холодильных машин // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3. С. 231–234. EDN: PJZWLR.
15. Саввин Н.Ю., Лесовик Р.В., Ильина Т.Н. Повышение эффективности систем теплоснабжения // Строительство и архитектура. 2025. Т. 13. № 2. С. 1–3. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-2-3-3>. EDN: KLWBDJ.

16. Кореньков Е.В. Применение частотного регулирования в системах вентиляции для повышения энергоэффективности // Вестник магистратуры. 2022. № 2-2. С. 32–34. EDN: LKSLVR.
17. Semenyshyna I., Haibura Yu., Mushenyk I., Sklyarenko I., Kononets V. Development of the Method for Structural-Parametric Optimization In Order To Improve the Efficiency of Transition Processes In Periodic Systems // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4. Iss. 3. P. 29–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140862>. EDN: YGJCLJ.
18. Moskalenko V., Dovbysh A., Naumenko I., Moskalenko A., Korobov A. Improving the Effectiveness of Training the Onboard Object Detection System for a Compact Unmanned Aerial Vehicle // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 4. Iss. 9. P. 19–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139923>. EDN: YGJWKT.
19. Rakhmonov I.U., Saidkhodzhaev A.G., Khakimov T.Kh., Niyozov N.N. Design and Implementation of Programmable Logic Educational Simulators for Enhancing Power Supply System Learning // Проблемы современной науки и образования. 2024. № 3. С. 10–13. EDN: DOPUXD.
20. Саввин Н.Ю., Овсянников Ю.Г., Феоктистов А.Ю., Алифанова А.И. Анализ подходов проектирования с использованием средств информационного моделирования с учётом особенностей этапов жизненного цикла объекта // Строительное производство. 2025. № 2. С. 97–104. https://doi.org/10.54950/26585340_2025_2_97. EDN: AKBSHE.
21. Savvin N.Yu., Ramazanov R.S., Alifanova A.I. Review of Systems Approach and Design Methods, Including CAD Methods and Systems Engineering // Science Prospects. 2025. Iss. 5. P. 237–241. EDN: PNSJXZ.
22. Куцев Л.А., Мелькумов В.Н., Саввин Н.Ю. Компьютерное моделирование движения теплоносителя в гофрированном канале пластинчатого теплообменника // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. № 4. С. 51–58. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2020.60.4.005>. EDN: QEMGOY.
23. Голембиовский Ю.М., Томашевский Ю.Б., Щербаков А.А., Луков Д.Ю., Старков А.В. Автономный однофазный инвертор с высоким качеством выходного напряжения // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: энергетика. 2018. Т. 18. № 1. С. 75–81. <https://doi.org/10.14529/power180110>. EDN: YVJCMD.
24. Кривоногов С.В., Романова А.А. Модель системы мониторинга для повышения качества энергии в системах электроснабжения потребителей // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10. № 4. С. 89–98. EDN: PWEFNN.
25. Викентьева О.Л., Дерябин А.И., Шестакова Л.В., Кычкин А.В. Синтез информационной системы управления подсистемами технического обеспечения интеллектуальных зданий // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 10. С. 1191–1201. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.10.1191-1201>. EDN: ZRZRUP.
26. Васильев Б.Ю., Козярук А.Е., Мардашов Д.В. Увеличение коэффициента использования автономного инвертора при пространственно-векторном управлении // Электротехника. 2020. № 4. С. 14–23. EDN: NQSEPG.
27. Zhilin E.V., Prasol D.A., Savvin N.Y. Optimization of the Structure of Filter-Compensating Devices in Networks with Powerful Non-Linear Power Consumers Based on Fuzzy Logic // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2022. Vol. 12. Iss. 6. P. 5730–5737. <http://doi.org/10.11591/ijece.v12i6.pp5730-5737>.
28. Маклаков А.С. Гибридный алгоритм модуляции на основе пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18. № 1. С. 92–100. <https://doi.org/10.14529/power180112>. EDN: LAVJUD.
29. Костылев А.В. Векторная ШИМ для двухсекционного преобразователя частоты // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2015. Т. 15. № 2. С. 34–40. <https://doi.org/10.14529/power150205>. EDN: TNUSLD.

REFERENCES

1. Dyupon Zh.-L., Domanski P., Lebren F., Tsigler F. The Role of Refrigeration in the Global Economy. 38th IIR Information Note on Refrigeration Technologies (June 2019). *Refrigeration Technology*. 2020;5:6-13. (In Russ.). EDN: UAYIY.
2. Savvin N.Yu., Garbuzov D.D. Mathematical Simulation of Frequency Converter with Space Vector Pulse Width Modulation. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):46-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2023-2-46-58>. EDN: SGDZER.
3. Kushev L.A., Savvin N.Yu. Thermal Imaging Studies of the Original Heat Exchanger Plate. Bulletin of Belgorod State Technological University Named After. V. G. Shukhov. 2021;1:38-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-1-38-45>. EDN: JCGTZO.

4. Azizov. D., Saidiev F. *Fundamentals of Refrigeration Engineering and Maintenance of Refrigeration Systems*. Tashkent: Baktria Press, 2017. 176 p. (In Russ.).
5. Savvin N.Tu., Garbuzov D.D. Investigation of the Cooling Efficiency of the Plate Heat Exchanger of the Condenser of an Industrial Refrigeration Machine at Different Fan Speeds. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named After. V. G. Shukhov*. 2023;10:42-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2023-8-10-42-56>. EDN: FLWLIB.
6. Ilina T.N., Savvin N.Yu., Averkova O.A., Logachev K.I. Renewable and Secondary Energy Sources Of Engineering Systems in the Operation and Reconstruction of Buildings and Structures. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023;15(4):1-12. (In Russ.). EDN: ENJZMH.
7. Vinogradov A.B., Korotkov A.A. *Control Algorithms for a High-Voltage Multilevel Frequency Converter*. Ivanovo: Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin, 2018. 184 p. (In Russ.).
8. Luneva S.K. Modeling of Heat and Mass Transfer Processes in the Software Environment Solid-Works/Flowsimulation. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa*. 2018;2:27-31. (In Russ.). EDN: XQCQRV.
9. Ilina T.N., Savvin N.Yu., Averkova O.A., Logachev K.I. Digital Twin of Public Building Engineering Systems. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(6):1-11. (In Russ.). EDN: WIIZJG.
10. Popov A.Yu. Simulating Air Flow Distribution in Solidworks Flow Simulation Software. *Aktualnye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2017;3-3:74-77. (In Russ.). EDN: YFMCBP.
11. Soloviev A.N., Glazunova L.V. Simulation of Electronic Equipment Elements Cooling In SolidWorks. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010;10(4):466-473. (In Russ.). EDN: NBRXPZ.
12. Savvin N.Yu. Mathematical Modeling of the Life Cycle of Building Engineering Systems. *Inzhenernye sistemy i sooruzheniya*. 2024;4:15-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/2074-188X.2024.34.62.002>. EDN: CVDXBN.
13. Korkodinov Ia.A. The Review of Set of $k-\epsilon$ Models for Modeling Turbulence. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science*. 2013;15(2):5-16. (In Russ.). EDN: QYXPQP.
14. Kornienko F.V. Increasing the Efficiency of the Evaporative Condenser of Compression Refrigeration Machines. *Engineering Journal of Don*. 2012;3:231-234. (In Russ.). EDN: PJZWLR.
15. Savvin N.Yu., Lesovik R.V., Ilina T.N. Improving the Efficiency of Heating Systems. Construction and Architecture. 2025;13(2):1-3. (In Russ.). <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2025-13-2-3-3>. EDN: KLWBDJ.
16. Korenkov E.V. Application of Frequency Control in Ventilation Systems to Improve Energy Efficiency. *Vestnik magistratury*. 2022;2-2:32-34. (In Russ.). EDN: LKSLVR.
17. Semenyshyna I., Haibura Yu., Mushenyk I., Sklyarenko I., Kononets V. Development of the Method for Structural-Parametric Optimization In Order To Improve the Efficiency of Transition Processes In Periodic Systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018;4(3):29-35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140862>. EDN: YGJCLJ.
18. Moskalenko V., Dovbysh A., Naumenko I., Moskalenko A., Korobov A. Improving the Effectiveness of Training the Onboard Object Detection System for a Compact Unmanned Aerial Vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018;4(9):19-26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139923>. EDN: YGJWKT.
19. Rakhmonov I.U., Saidkhodzhaev A.G., Khakimov T.Kh., Niyozov N.N. Design and Implementation of Programmable Logic Educational Simulators for Enhancing Power Supply System Learning. *Problems of Modern Science and Education*. 2024;3:10-13. EDN: DOPUXD.
20. Savvin N.Yu., Ovsyannikov Yu.G., Feoktistov A.Yu., Alifanova A.I. Analysis of Design Approaches Using Information Modeling Tools Taking Into Account the Characteristics of the Stages of the Object's Life Cycle. *Construction Production*. 2025;2:97-104. (In Russ.). https://doi.org/10.54950/26585340_2025_2_97. EDN: AKBSHE.
21. Savvin N.Yu., Ramazanov R.S., Alifanova A.I. Review of Systems Approach and Design Methods, Including CAD Methods and Systems Engineering. *Science Prospects*. 2025;5:237-241. EDN: PNSJXZ.
22. Kushchev L.A., Melkumov V.N., Savvin N.Yu. Computer Simulation of Flow in Corrugated Channel of Plate Heat Exchanger. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020;4:51-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.36622/VSTU.2020.60.4.005>. EDN: QEMGOY.
23. Golembiovsky Yu.M., Tomashevsky Yu.B., Scherbakov A.A., Lukov D.Yu., Starkov A.V. Autonomous Single-Phase Inverter With High Quality of Output Voltage. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2018;18(1):75-81. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power180110>. EDN: YVJCMD.
24. Krivonogov S.V., Romanova A.A. Monitoring System Model for Improving Energy Quality in Consumer Power Supply Systems. *International Journal of Open Information Technologies*. 2022;10(4):89-98. (In Russ.). EDN: PWEFNN.

25. Vikentyeva O.L., Deryabin A.I., Shestakova L.V., Kychkin A.V. Synthesis of Information System for Smart House Hardware Management. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2017;12(10):1191-1201. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.10.1191-1201>. EDN: ZRZRUP.
26. Vasiliev B.Y., Kozyaruk A.E., Mardashov D.V. Increasing the Utilization Factor of an Autonomous Inverter Under Space Vector Control. *Russian Electrical Engineering*. 2020;4:14-23. (In Russ.). EDN: NQSEPG.
27. Zhilin E.V., Prasol D.A., Savvin N.Y. Optimization of the Structure of Filter-Compensating Devices in Networks with Powerful Non-Linear Power Consumers Based on Fuzzy Logic. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022;12(6):5730-5737. <http://doi.org/10.11591/ijece.v12i6.pp5730-5737>.
28. Maklakov A.S. Hybrid Modulation Based On SHEPWM and SVPWM. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2018;18(1):92-100. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power180112>. EDN: LAVJUD.
29. Kostylev A.V. The Vector PWM for Two-Section Frequency Converter. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2015;15(2):34-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power150205>. EDN: TNUSLD.

Информация об авторах

Саввин Никита Юрьевич,

к.т.н., доцент кафедры теплогазоснабжения
и вентиляции,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46,
Россия,
✉e-mail: n-savvin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5460-4780>
Author ID: 1108836

Ильина Татьяна Николаевна,

д.т.н., профессор кафедры теплогазоснабжения
и вентиляции,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия,
e-mail: ilinatat50@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8677-256X>

Лесовик Руслан Валерьевич,

д.т.н., профессор кафедры строительное
материаловедение, изделия и конструкции,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46,
Россия,
e-mail: ruslan_lesovik@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8973-9271>
Author ID: 367491

Шевцова Анастасия Геннадьевна,

д.т.н., профессор кафедры эксплуатации
и организации движения автотранспорта,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия,
e-mail: shevcova-anastasiya@mail.ru
Author ID: 640475

Information about the authors

Nikita Yu. Savvin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of
The Department Heat and Gas Supply
and Ventilation,
Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov,,
46, Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia,
✉e-mail: n-savvin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5460-4780>
Author ID: 1108836

Tatyana N. Ilyina,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of The Department
of Heat and Gas Supply and Ventilation,
Belgorod State Technical University
named after V.G. Shukhov,
46, Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia,
e-mail: ilinatat50@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8677-256X>

Ruslan V. Lesovik,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of The Department
of Construction Materials Science, Products
and Structures,
Belgorod State Technical University
named after V.G. Shukhov,
46, Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia,
e-mail: ruslan_lesovik@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8973-9271>
Author ID: 367491

Anastasia G. Shevtsova,

Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department
Operation and Organization of Vehicle Traffic,
Belgorod State Technical University
named after V.G. Shukhov,
46, Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia,
e-mail: ido@bstu.ru
Author ID: 640475

Киреев Виталий Михайлович,
к.т.н., доцент кафедры теплогазоснабжения
и вентиляции,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46,
Россия,
e-mail: vit31rus@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9907-6923>
Author ID: 731062

Vitaly M. Kireev,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of the Department of Heat and Gas Supply
and Ventilation,
Belgorod State Technical University
named after V.G. Shukhov,
46, Kostyukova St., Belgorod 308012, Russia,
e-mail: vit31rus@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9907-6923>
Author ID: 731062

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regard-
ing the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and ap-proved
by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 16.04.2025.
Одобрена после рецензирования 12.05.2025.
Принята к публикации 13.05.2025.

Information about the article

The article was submitted 16.04.2025.
Approved after reviewing 12.05.2025.
Accepted for publication 13.05.2025.