

УДК 681.5.015.23

В.В. Ениватов, канд. техн. наук,

А.А. Кабанов, канд. техн. наук,

Д.А. Токарев, канд. техн. наук,

Л.Д. Кириллов, студент

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, 299053

E-mail: KabanovAleksey@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

В ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Представлена модель системы автоматического регулирования температуры в замкнутой системе охлаждения энергетической установки с использованием метода газожидкостной интенсификации теплоотвода. Выполнен анализ различных схемных решений по регулированию температуры в контуре с учетом применяемого метода интенсификации. Оптимизирован алгоритм регулирования подачи газа с целью снижения энергозатрат в замкнутой системе охлаждения.

Ключевые слова: замкнутая система охлаждения, энергетическая установка, система регулирования температуры.

Введение. Условия эксплуатации системы охлаждения и ее параметры с течением времени изменяются, что приводит к необходимости перенастройки отрегулированной системы под текущие условия [1]. В системах без возможности подстройки изменение внешних условий приводит к снижению эффективности и повышению энергозатрат. При возможности настройки параметров системы необходимо отслеживать изменения параметров внешней среды, в соответствии с которыми выполняется настройка, что требует непрерывного наблюдения за системой квалифицированного персонала.

Использование современных систем автоматического регулирования позволяет снизить затраты на обслуживание подобных систем и обучение персонала. Применение автоматических систем при управлении замкнутыми системами охлаждения с теплообменными аппаратами различных типов, использующих метод газожидкостной интенсификации теплоотвода, позволяет повысить энергетическую эффективность существующих систем, а также снизить затраты на модернизацию традиционных систем охлаждения и на внедрение новых систем.

Современные судовые энергетические установки (СЭУ) имеют водяную систему охлаждения, в которую входят насосы, холодильники, терморегуляторы, расширительные баки, клинкетты и другая арматура. Система охлаждения (СО) должна обеспечивать высокую степень охлаждения и возможность поддержания в требуемых пределах теплового состояния установки при различных режимах и условиях ее работы. Таким образом, СО должна быть оптимизирована, т.е. настроена так, чтобы обеспечивать устойчивую работу СЭУ в соответствии с заданным тепловым режимом. Использование технически совершенных систем теплоотвода позволяет эксплуатировать их в условиях малых температурных напоров между поверхностью теплообменного аппарата и забортной водой, что уменьшает негативное воздействие на биологические ресурсы акваторий.

Применение замкнутых систем охлаждения (ЗСО) с интенсификацией теплоотвода забортной воде является эффективным средством на пути повышения надежности и экологической безопасности при эксплуатации СЭУ. Решением данной задачи может быть оптимизация температурных режимов теплоносителя в ЗСО путем разработки и применения эффективных, высокоточных систем регулирования, которые могут обеспечить положительный эффект, в частности уменьшение эксплуатационных затрат. Применение интенсификации теплоотдачи в ЗСО позволяет улучшить энергетические и массогабаритные показатели СЭУ [2].

Данная работа посвящена решению задачи оптимизации регулирования системы управления температуры охлаждающей жидкости на входе в двигатель внутреннего сгорания при использовании газожидкостной интенсификации в ЗСО. Оптимизация предполагает сокращение энергетических и эксплуатационных затрат.

1. Постановка задачи. Рассматривается одноконтурная ЗСО, структура которой показана на рисунке 1, а [3]. Система охлаждения состоит из циркуляционного насоса 1, датчика температуры охлаждающей жидкости 2, теплообменного аппарата (ТОА) 3 и трехходового регулирующего клапана 4. Температуру охлаждающей жидкости в такой одноконтурной системе охлаждения регулируют переключением части потока в обход охладителя. При этом обеспечивается постоянный расход теплоносителя через двигатель внутреннего сгорания (ДВС) энергоустановки.

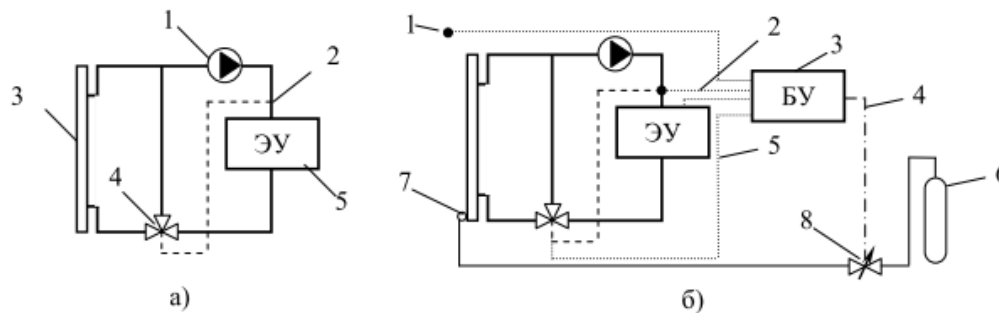


Рисунок 1 – Система регулирования температуры в одноконтурной ЗСО:
а) с терморегулирующим клапаном; б) с системой регулирования подачи газа

В случае использования способа газожидкостной интенсификации в ЗСО рассматривается система со структурой, показанной на рисунке 1, б. Система управления температурой состоит из двух подсистем: регулирование расхода охлаждающей жидкости через теплообменный аппарат (ТОА) 7 и регулирование подачи газа клапаном 8. Работа системы контролируется блоком управления (БУ) 3, который собирает информацию с различных датчиков: температуры забортной воды 1, температуры на входе в двигатель 2, положении перепускного клапана 5 и в зависимости от измерения генерирует управляющие сигналы для воздушного клапана 8. Подача газа в систему осуществляется из аккумулятора воздуха 6. При работе ДВС на частичных нагрузках температура охлаждающей жидкости регулируется путем перепуска в обход ТОА.

На базе вышеприведенных схем решается задача синтеза системы стабилизации температуры охлаждающей жидкости энергоустановки. На основе синтезированной системы решается задача оптимизации работы системы. При этом в рассматриваемой системе объект управления имеет несколько входов и один выход, которым является температура охлаждающей жидкости в ЗСО на входе в ДВС. Анализ и оптимизация процесса регулирования температуры в контуре СО выполняются на основе моделирования средствами пакета прикладных программ MatLab&Simulink.

2. Оптимизация системы регулирования температуры. Анализа и оптимизации процесса регулирования температуры в ЗСО СЭУ выполняется на основе моделирования системы в программе Simulink. Моделирование работы традиционной системы охлаждения на долевых нагрузках ДГ показывает, что при малом температурном в устройстве теплоотвода забортной воде, невозможно реализовать требуемый теплоотвод, что приводит к чрезмерному повышению температуры на входе в ДВС [4].

Структурная схема (Simulink-модель) ЗСО с терморегулирующим клапаном изображена на рисунке 2, а. Основной элемент данной схемы – блок «Ship power plant» – реализует модель динамики энергетической установки (ЭУ), структура этого блока дана на рисунке 2, б.

Посредством данной Simulink-модели исследуются режимы работы энергетической установки (стояночного дизель-генератора) при различных степенях загрузки.

Сначала моделируется работа двигателя со ступенчатым изменением мощности: 25 %, 50 %, 75 %, 100 %, 110 %. Регулятор температуры открыт полностью, что соответствует максимальному расходу охлаждающей жидкости через устройство теплоотвода забортной воде, при этом теплоотвод осуществляется посредством свободной конвекции (нахождение судна в стоячей воде).

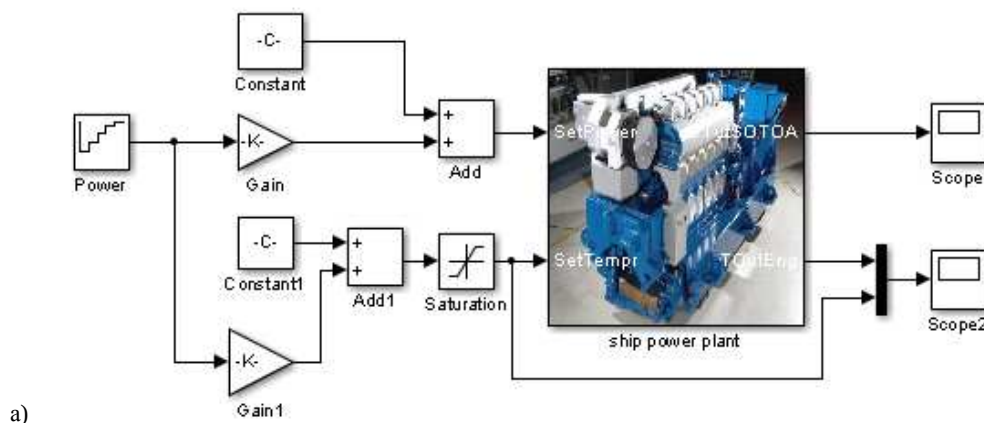
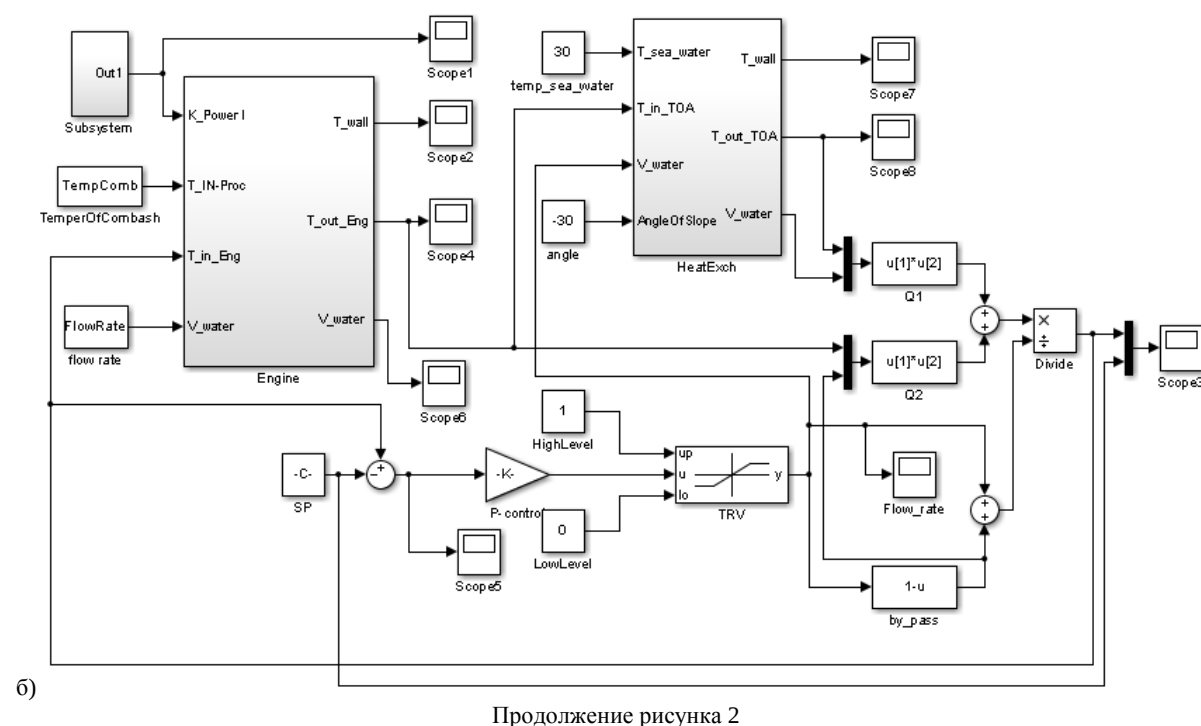


Рисунок 2 – Simulink-модель ЗСО с терморегулирующим клапаном:
а) общая модель; б) структура блока «Ship power plant»



Результаты моделирования системы охлаждения без интенсификации теплоотвода показаны на рисунке 3, откуда видно, что увеличение мощности приводит к ухудшению параметров системы, статическая ошибка при этом достигает значений 5 – 12 °С. Площади теплообменника недостаточно для обеспечения теплоотвода. Для преодоления этого эффекта в системе предлагается компенсировать недостаток площади теплообменного аппарата интенсификацией теплоотвода охлаждающей жидкости путем использования непрерывного регулятора с пропорциональным законом управления подачей газа в системе.

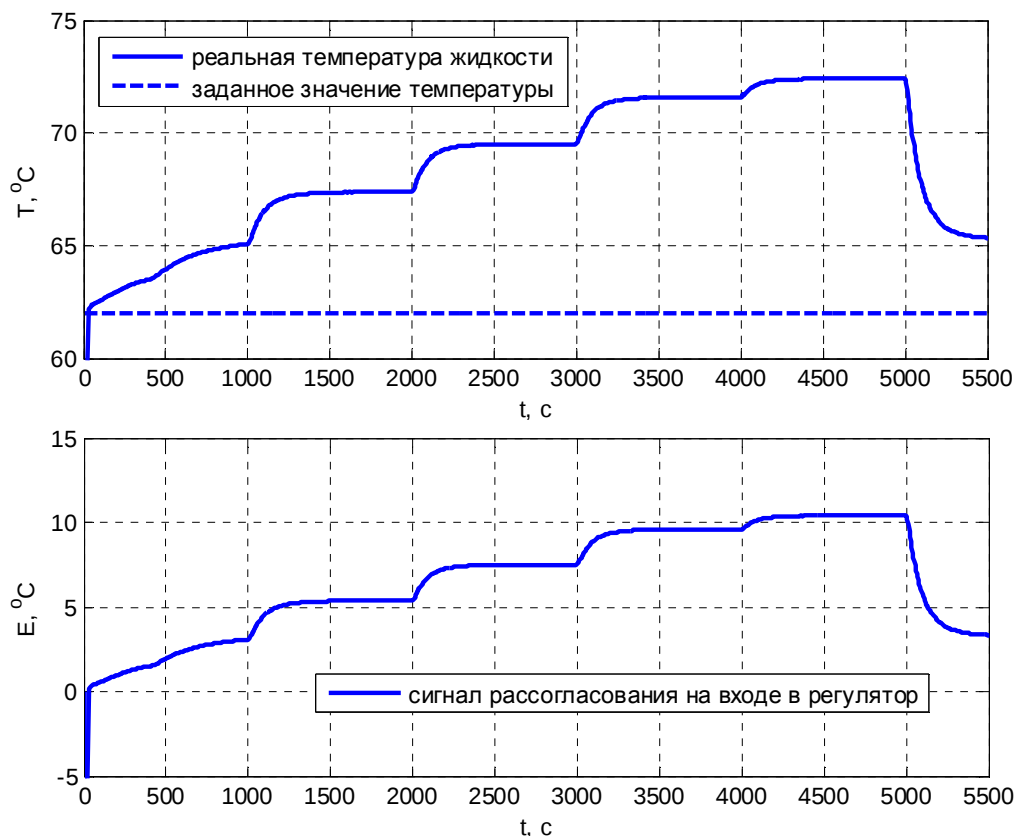


Рисунок 3 – Регулирование температуры в контуре ЗСО без интенсификации теплоотвода со ступенчатым изменением мощности (25 %, 50 %, 75 %, 100 %, 110 % от полной мощности)

При использовании непрерывного закона управления система измеряет температуру на входе в ДВС и на основании сигнала рассогласования температур принимает решение об изменении подачи газа. Главным недостатком этого способа управления является дороговизна управляющей арматуры и необходимость настройки регулятора, что является неоптимальным по отношению к затратам на приобретение и обслуживание системы. На рисунке 4 приведены результаты моделирования системы с пропорциональным регулятором при таком же ступенчатом изменении мощности. При этом наблюдается увеличение статической ошибки при увеличении мощности двигателя.

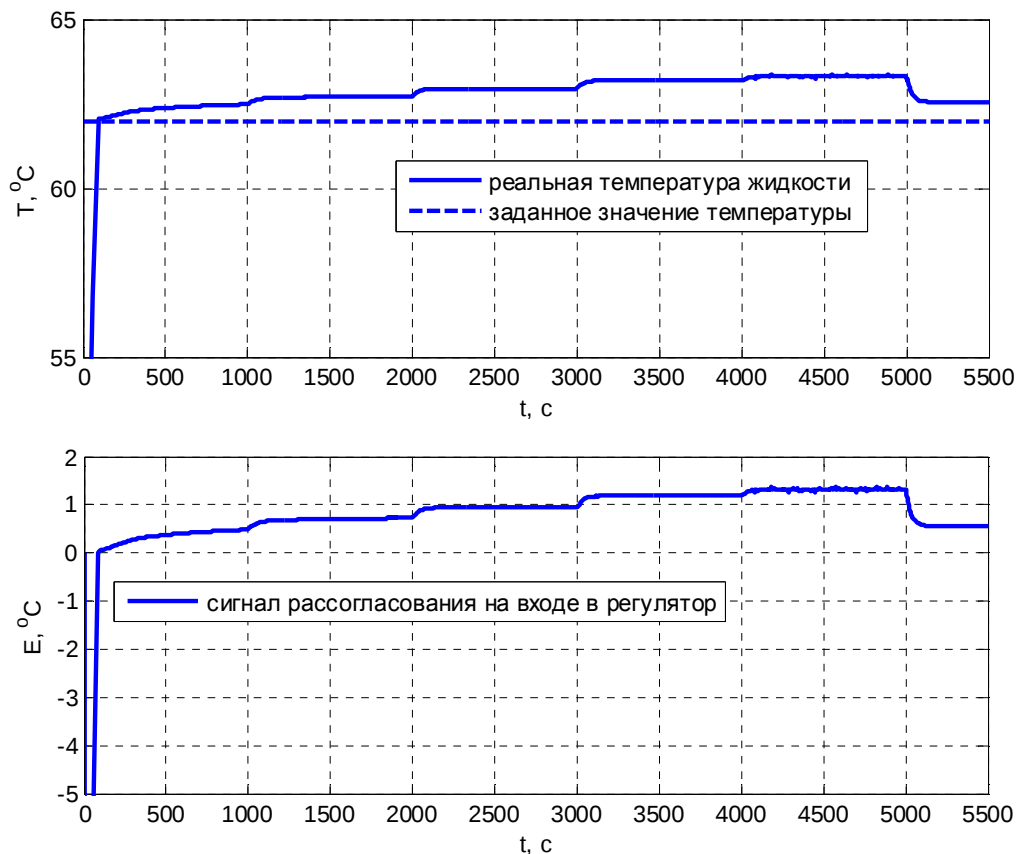


Рисунок 4 – Регулирование температуры в контуре ЗСО с интенсификацией теплоотвода при ступенчатом изменении мощности (25 %, 50 %, 75 %, 100 %, 110 % от полной мощности)

Релейное управление подачи газа на поверхность устройства теплоотвода предполагает периодическое включение компрессора при условии, что вся охлаждающая жидкость движется через ТОА и необходимая температура превышает заданное значение. При этом актуальной задачей становится вычисление ширины петли гистерезиса для сокращения количества переключений управляющего реле. Это увеличивает срок эксплуатации системы подачи газа на поверхность системы охлаждения ТОА и сокращает эксплуатационные затраты, связанные с потреблением энергии регулирующим органом. Таким образом, можно оптимизировать эксплуатационные и энергетические затраты.

Для исследования ЗСО с релейным включением подачи газа на теплоотводящую поверхность (рисунок 1, б) рассматривается Simulink-модель (рисунок 2, а) с блоком «Ship power plant», структура которого показана на рисунке 5. Управляющий сигнал клапана подачи газа формируется при достижении штоком терморегулирующего клапана предельного значения, соответствующего максимальному расходу охлаждающей жидкости через ТОА (сигнальная линия 5 на рисунке 1, б). Включение газожидкостной интенсификации до полного закрытия перепускного клапана нецелесообразно.

Такой алгоритм позволяет рационально использовать подачу газа в моменты, когда она действительно необходима, то есть количество теплоты отводимой теплообменным аппаратом недостаточно для охлаждения энергоустановки. В качестве управления расходом газа выбирают дискретный или непрерывный алгоритм.

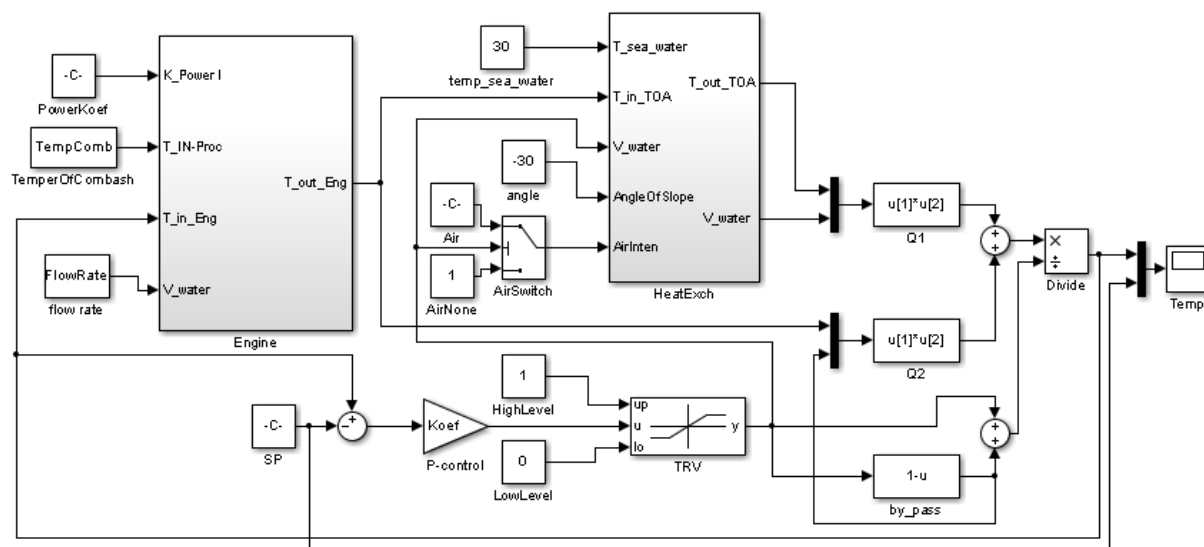


Рисунок 5 – Структура блока «Ship power plant» для ЗСО с релейным управлением подачей газа

Графики переходных характеристик системы с релейным регулятором показаны на рисунке 6. Из графиков следует, что релейный регулятор справляется со своей задачей при разных значениях мощности двигателя. Ширина зоны нечувствительности регулятора влияет на частоту переключений подачи воздуха в систему охлаждения. Для сокращения количества переключений управляющего реле следует задаться достаточной шириной петли гистерезиса. Это увеличит срок эксплуатации системы подачи газа на поверхность СОТОА и сократит эксплуатационные затраты, связанные с потреблением энергии регулирующим органом.

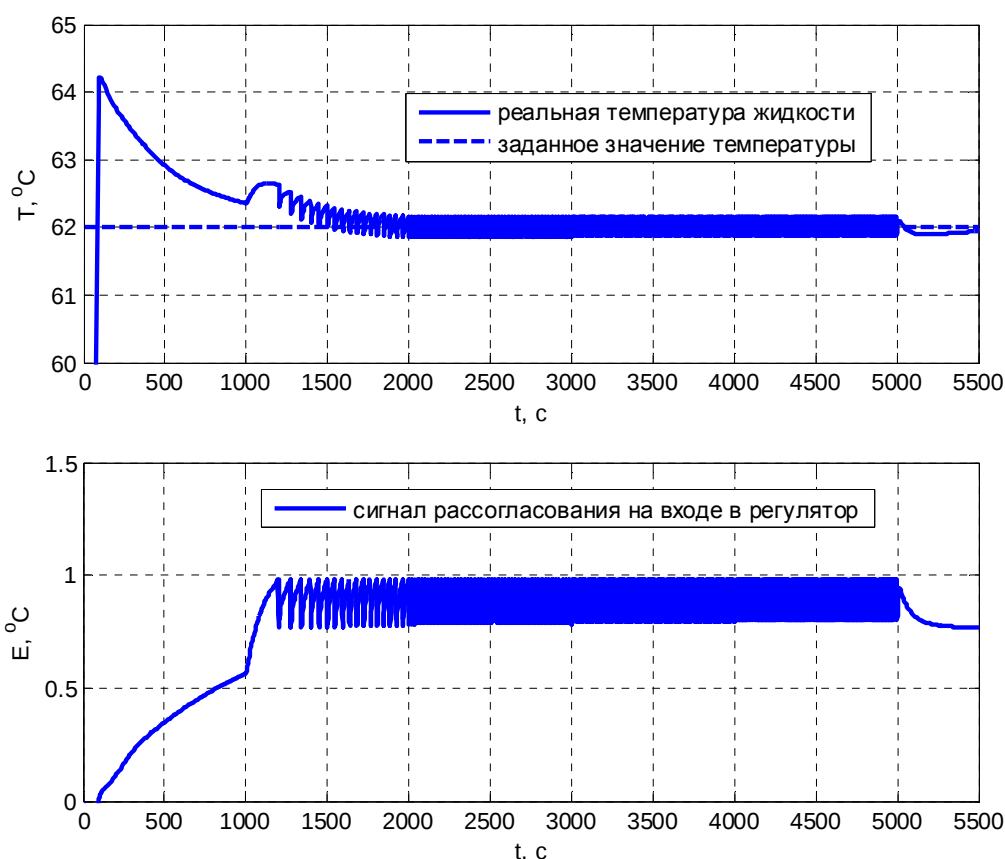


Рисунок 6 – Релейное регулирование температуры в контуре ЗСО при ступенчатом изменении мощности (25 %, 50 %, 75 %, 100 %, 110 % от полной мощности)

Из результатов моделирования следует, что переходные процессы в системе с релейным регулированием являются более скоротечными – время регулирования равно 1000 с, перерегулирование составляет менее 0,5 %. Перерегулирование в начальный момент времени при мощности 25 % обусловлено тем, что перепускной клапан не полностью закрыт в данном режиме. При дальнейшем увеличении мощности перепускной клапан открывается полностью и минимальное значение статической ошибки обеспечивается релейным регулированием.

При регулировании с использованием частого переключения наблюдается незначительное сокращение времени регулирования и малые автоколебания, вызванные частыми переключениями реле.

При эксплуатации дизельных ЭУ температура жидкости на входе в двигатель выбирается пропорционально текущей мощности. Увеличение мощности ведет к увеличению температуры в двигателе. Сохранение температуры охлаждающей жидкости на входе в двигатель постоянной приводит к возникновению температурных напряжений из-за увеличения температурного напора. На рисунке 7 показаны результаты моделирования системы со ступенчатым изменением мощности и корректировкой заданной температуры в зависимости от мощности.

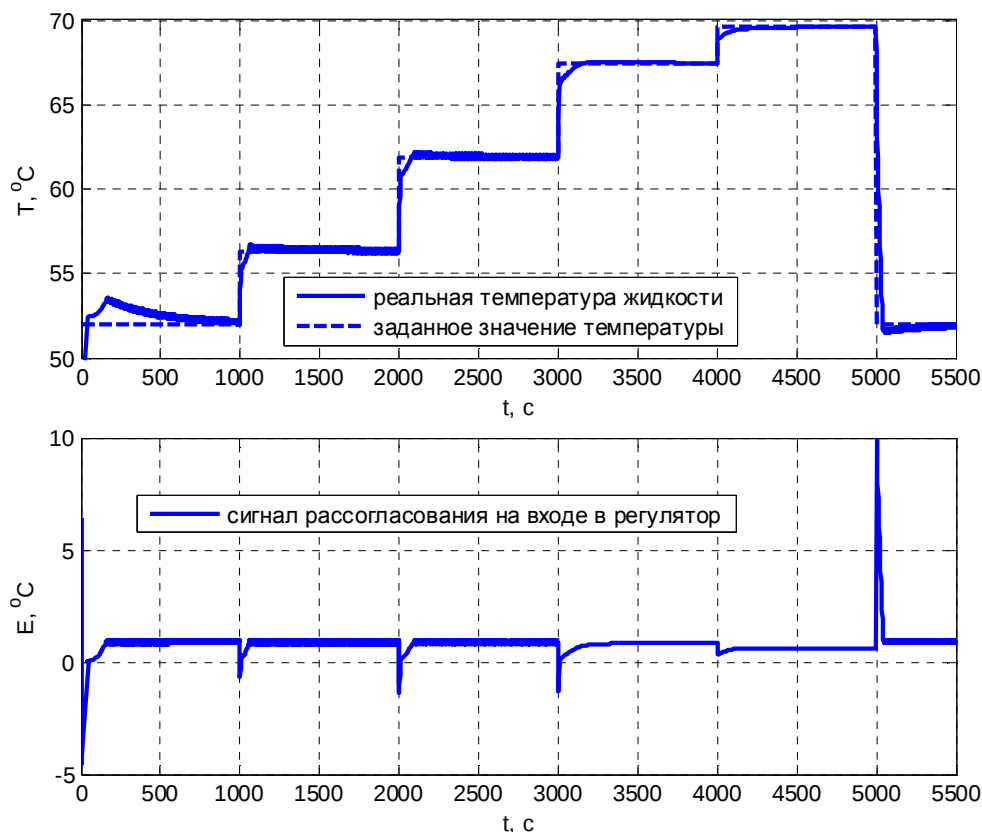


Рисунок 7 – Релейное регулирование температуры в контуре ЗСО с корректировкой заданного значения в зависимости от мощности (25 %, 50 %, 75 %, 100 %, 110 % от полной мощности)

Получены расчетные зависимости, показывающие, что данный тип управления решает поставленную задачу, обеспечивая статическую ошибку стабилизации температуры не более 1 %. Дополнительные исследования показали, что погрешность может быть уменьшена до 0,5 %. При этом наблюдаются частые переключения управляющего реле, что приводит к скорому износу элементов системы управления. Недостаток релейного управления заключается в том, что в управляемый процесс является автоколебательным – регулируемая температура как в переходном, так и в установившемся режиме периодически изменяется относительно заданного значения, т.е. она подвержена незатухающим колебаниям.

С точки зрения сокращения энергетических затрат для интенсификации теплоотдачи имеет смысл использовать непрерывный способ управления с пропорциональным законом регулирования подачи газа в системе охлаждения с эпизодическим включением в работу самого регулятора. Сигналом к включению в такой схеме является отсутствие циркуляции в перепускном трубопроводе. Входным сигналом для такого регулятора является разница значений текущей и заданной температур на входе в ДВС. Эпизодическое включение регулятора в работу позволяет сэкономить моторесурс исполнительных механизмов системы. Полученные результаты применения комбинированной схемы регулирования температуры охлаждающей жидкости по точности аналогичны релейному управлению в режиме частых

переключений, при этом за счет настройки параметров непрерывного регулятора можно добиться требуемого качества переходного процесса.

Анализ оптимальности полученной системы требует наличия критерия качества. В данной задаче критерий включает затраты на покупку, обслуживание, ремонт и энергетические затраты на работу системы. Исследованные схемы регулирования позволяют оптимизировать работу системы. При этом лучший результат показал релейный регулятор с включением в работу при прекращении перепуска охлаждающей жидкости в обход теплообменника. Данная схема оптимальна с точки зрения цены, энергозатрат на работу системы, и обслуживания системы. Применение простой запорной арматуры снижает цену системы. Включение регулирования расхода воздуха эпизодически продлевает моторесурс. Использование релейных регуляторов позволяет подобрать оптимальную ширину зону гистерезиса и сократить расходы на первичную настройку системы.

Перспективным направлением дальнейших исследований является рассмотрение системы автоматического регулирования температуры охлаждающей жидкости с использованием вышеописанной комбинированной схемы, в которой также будет учитываться изменение вырабатываемой ДВС мощности. Также следует выполнить анализ энергозатрат при различных схемах регулирования, что позволит оценить энергоэффективность предлагаемых решений и выбрать оптимальное с точки зрения минимизации затрат энергии.

Выводы. Предложен комбинированный метод теплоотвода в СЭУ, основанный на использовании комбинации двухпозиционного релейного регулятора и пропорционального регулятора, реализующего непрерывный закон управления. При этом реализация предлагаемой комбинированной системы управления температурой охлаждающей жидкости, предполагает включение в работу непрерывного пропорционального регулятора только в случае отсутствия циркуляции в перепускном трубопроводе. Это эпизодическое включение непрерывного регулятора в работу системы позволяет сэкономить моторесурс исполнительных механизмов.

Предложенная комбинированная схема управления сочетает в себе преимущество релейного регулятора, которое в основном заключается в высокой точности регулирования, и возможность непрерывного регулятора за счет настройки параметров получать переходные процессы с заданными показателями качества. Комбинированное управление позволяет оптимизировать энергетические затраты на работу системы и увеличить моторесурс.

Библиографический список использованной литературы

1. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования / В.Я. Ротач. — М.: Энергия, 1973. — 440 с.
2. Федоровский К.Ю. Повышение эффективности систем охлаждения СЭУ с теплоотводом заборной воде / К.Ю. Федоровский, В.В. Ениватов // Судовая енергетика: состояние и проблемы 2011: матер. V Межд. науч.-техн. конф. — Николаев: НУК им. адмирала Макарова, 2011. — С. 176–179.
3. Ениватов В.В. Оптимизация энергозатрат в замкнутых системах охлаждения энергетических установок объектов морской инфраструктуры / В.В. Ениватов, А.А. Кабанов, Д.А. Токарев // Морские технологии 2014: тр. межвуз. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 24–26 сент. 2014 г. — Севастополь: СевНТУ, 2014. — С. 93–96.
4. Коваленко А.А. Упрощение математических моделей характеристик систем охлаждения тепловозов / А.А. Коваленко, Ю.В. Баранич // Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В. Даля. — Южноукраїнск, 2004. — № 7 (74). — С. 68–72.

Поступила в редакцию 13.10.2014 г.

Єніватов В.В., Кабанов О.О., Токарев Д.О., Кіріллов Л.Д. Оптимізація регулювання температури в замкнутих системах охолодження енергетичних установок об'єктів морської інфраструктури

Представлена модель системи автоматичного регулювання температури в замкнутій системі охолодження енергетичної установки з використанням методу газорідної інтенсифікації тепловідведення. Виконано аналіз різних схемних рішень щодо регулювання температури в контурі з урахуванням застосованого методу інтенсифікації. Оптимізовано алгоритм регулювання подачі газу з метою зниження енерговитрат в замкнутій системі охолодження.

Ключові слова: замкнута система охолодження, енергетична установка, система регулювання температури.

Yenivatov V.V., Kabanov A.A., Tokarev D.A., Kirillov L.D. Optimization of temperature control in closed cooling system of power plants of marine infrastructure

The model of the automatic control system of temperature applied to closed cooling system of the power plant using the gas-liquid intensification method of the heat sink is given. The analysis of different scheme's solutions to control of the temperature in the cooling system with heat sink intensification is presented. The algorithm for controlling the gas supply to reduce energy consumption in the closed cooling system is optimized.

Keywords: closed cooling system, power plant, temperature control system.