

УДК 62-523.8

doi: 10.53816/23061456_2024_11–12_135

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ МНОГОЦЕЛЕВЫХ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН

ADAPTIVE CONTROL OF DIESEL ENGINE COOLING SYSTEM MULTI- PURPOSE TRACKED VEHICLES

Ф.Н. Гханем, канд. техн. наук В.Р. Эдигаров

F.N. Ghanem, Ph.D. V.R. Edigarov

Омский автобронетанковый инженерный институт (филиал) ВА МТО

В статье представлены результаты исследования электронной адаптивной схемы управления элементами системы охлаждения дизельного двигателя многоцелевых гусеничных машин (МГМ) (водяной насос, вентилятор с электронным термостатом и другими элементами), с целью поддержания оптимальной температуры охлаждающей жидкости, теплового состояния дизеля, снижения расхода топлива дизельного двигателя МГМ и повышения показателей свойств МГМ. Это связано с применением современных электронных схем (Arduino), принимающих сигналы, поступающие от датчиков, измеряющих параметры дизельного двигателя, а также внешние условия, влияющие на его работу, и обработкой этих сигналов и отправкой управляющих сигналов на реализованные устройства, что обеспечивает поддержание идеальной температуры охлаждающей жидкости на значениях, указанных в схеме управления.

Ключевые слова: адаптивная электронная схема управления, система охлаждения, дизельный двигатель МГМ, водяной насос, вентилятор, термостат.

The article presents the results of a study of the electronic adaptive control circuit for the elements of the cooling system of the multipurpose tracked vehicles (MTV) diesel engine (water pump, fan with an electronic thermostat and other elements) in order to maintain the optimal coolant temperature, the thermal state of the diesel, reduce the fuel consumption of the MTV diesel engine and increase the properties of the MTV. This is due to the use of modern electronic circuits (Arduino), which receive signals coming from sensors that measure the parameters of the diesel engine, as well as the external conditions that affect its operation, and process these signals and send control signals to the implemented devices, which ensures that the ideal coolant temperature is maintained at the values specified in the control circuit.

Keywords: adaptive electronic control circuit, cooling system, diesel engine MTV, water pump, fan, thermostat.

Одним из главных условий, определяющих нормальную работу двигателя внутреннего сгорания (ДВС), является обеспечение его оптимального теплового состояния. Под оптималь-

ным тепловым состоянием понимается такое температурное состояние деталей цилиндровой и поршневой групп, которое отвечает наиболее выгодному сочетанию теплового процесса,

высокой надежности и износоустойчивости деталей двигателя, при этом предполагаются минимальные энергетические затраты на поддержание процесса охлаждения. Высокий уровень показателей современных двигателей был бы недостижим без применения средств электроники. Дизельные двигатели являются одним из наиболее часто используемых типов двигателей в МГМ. Тепловое состояние двигателя, которое чаще всего оценивается по температуре охлаждающей жидкости, существенно влияет на его энергетические и экологические показатели. До недавнего времени система жидкостного охлаждения оставалась одной из немногих систем двигателя МГМ, в которой не использовались возможности электронного управления, позволяющего поддерживать заданное тепловое состояние двигателя на различных режимах его работы.

Дизельные двигатели работают в различных климатических условиях, которые зависят от региона и сезона, а также от разницы температур между днем и ночью. Различные условия эксплуатации дизелей напрямую влияют на их расход топлива, поэтому разработка адаптивной схемы управления элементами системы охлаждения дизельных МГМ с целью поддержания оптимальной температуры охлаждающей жидкости в различных условиях окружающей среды и режимах работы двигателя с целью снижения расхода топлива является актуальной задачей.

Требования к адаптивной схеме управления следующие.

1. Требования к управлению водяным насосом связаны с контролем скорости вращения водяного насоса и управлением расходом охлаждающей жидкости, которое определяется количеством тепла и которое должно быть рассеяно от двигателя охлаждающей жидкостью. При этом минимальная частота вращения должна обеспечивать распределение тепла головки блока цилиндров на все части двигателя на этапе прогрева двигателя, а максимальная частота вращения должна обеспечивать максимальный отвод тепла от двигателя и поступление жидкости по главному контуру через радиатор.

2. Требования к управлению скоростью вращения вентилятора охлаждения, то есть управление скоростью воздушного потока через радиатор. Они включают в себя контроль количества тепла, которое должно быть рассеяно от тепло-

носителя в радиаторе во внешнюю среду. Минимальная скорость вращения вентилятора равна нулю, для случаев прогрева двигателя, и максимальная скорость, которая позволяет рассеивать максимально возможное количество тепла от охлаждающей жидкости при повышении температуры охлаждающей жидкости или температуры внешней среды [1–3].

Требования к управлению термостатом, то есть управление работой термостата (управление открытием и закрытием термостата), который должен обеспечивать количество жидкости, проходящей через радиатор, пропорционально температуре охлаждающей жидкости. Здесь следует отметить, что механический терморегулятор не в полном объеме обеспечивает необходимую адаптивность управления, что позволяет определить требования к электронной схеме терморегулятора.

Другие требования, такие как тактико-технические требования, конструкторско-технические, технологические, а также возможность обслуживания и ремонта [4–8].

Задачей предлагаемой и исследуемой адаптивной схемы управления является поддержание оптимальной температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения двигателя на различных режимах его работы, при различной температуре окружающей среды, а также динамичность ее изменения путем адаптивного управления ее элементами (вентилятор, водяной насос, электронный термостат и др.).

На рис. 1 представлена схема адаптивного управления системой охлаждения двигателя МГМ. Порядок адаптивного управления элементами системы охлаждения двигателя МГМ следующий.

Блок управления 4 получает сигналы от датчиков 2, 3, 5, 11, 16, 20, а затем подает управляющие сигналы на электродвигатель насоса 18, электродвигатель вентилятора 14, сервомотор термостата 15 и сервомотор жалюзи 9 для вращения насоса 19, вентилятора 13, термостата 17 и жалюзи 10. Блок управления, организуя свою работу через программный код, регулирует перекачку охлаждающей жидкости и скорость ее протекания по короткому или длинному пути через радиатор с целью контроля температуры охлаждающей жидкости и поддержания оптимальной температуры, обеспечивающей наименьший рас-

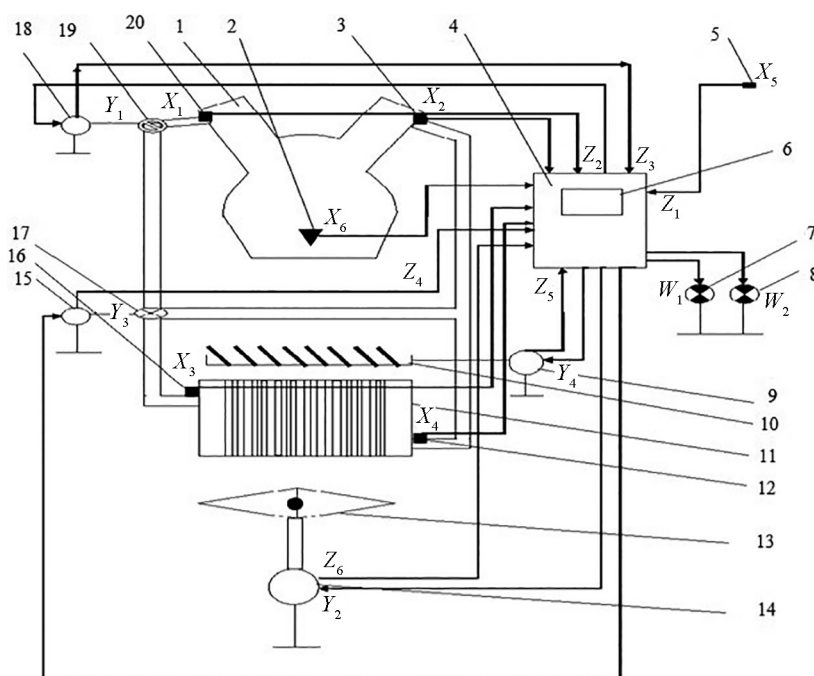


Рис. 1. Блок-схема адаптивного управления элементами системы охлаждения дизельного двигателя МГМ:
 1 — двигатель; 2 — датчик частоты вращения вала двигателя; 3 — датчик температуры охлаждающей жидкости на входе в двигатель; 4 — блок управления; 5 — датчик температуры окружающего воздуха;
 6 — схема «Arduino»; 7 — зеленый светодиод; 8 — красный светодиод; 9 — сервомотор жалюзи;
 10 — жалюзи; 11 — датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе из радиатора;
 12 — радиатор; 13 — вентилятор; 14 — электродвигатель вентилятора; 15 — сервомотор термостата;
 16 — датчик температуры охлаждающей жидкости на входе в радиатор;
 17 — термостат; 18 — электродвигатель насоса; 19 — водяной насос;
 20 — датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе из двигателя

ход топлива. В блок управления и привода поступает информация о частоте вращения насоса, вентилятора, положении термостата и жалюзи, блок управления подает предупредительные сигналы о повышении или понижении температуры охлаждающей жидкости через светодиоды 7, 8.

Входные и выходные сигналы адаптивного управления блок-схемы можно разделить на следующие группы.

Входные сигналы, представляющие собой сигналы от датчиков, измеряющих различные параметры, влияющие на работу системы охлаждения двигателя и на температуру охлаждающей жидкости, к которым относятся:

X_1 — температура охлаждающей жидкости на входе в двигатель;

X_2 — температура охлаждающей жидкости на выходе из двигателя;

X_3 , X_4 — температура охлаждающей жидкости на входе и выходе из радиатора;

X_5 — температура окружающего воздуха;

X_6 — частота вращения коленчатого вала двигателя.

Выходные сигналы, представляющие собой управляющие сигналы, посылаемые цепью управления на исполнительные устройства (водяной насос, вентилятор, термостат, жалюзи), которыми являются:

Y_1 — управляющий сигнал скорости вращения водяного насоса;

Y_2 — управляющий сигнал для включения и выключения вентилятора;

Y_3 — управляющий сигнал для закрытия и открытия термостата;

Y_4 — управляющий сигнал для закрытия и открытия жалюзи.

Сигналы обратной связи — это выходные сигналы, которые повторно поступают в блок управления для сравнения, исправления ошибок и модификации процесса управления путем определения влияния выходных параметров на входные параметры, а именно:

Z_1 — температура охлаждающей жидкости на выходе из двигателя (которая является основной температурой, значение которой необходимо поддерживать);

Z_2 — частота вращения насоса;

Z_3 — скорость вращения вентилятора;

Z_4 — положение термостата;

Z_5 — положение жалюзи.

Предупредительные сигналы, представляющие собой сигналы, подаваемые цепью управления на световые или звуковые устройства сигнализации и устройства индикации с целью оповещения, когда измеренные и контролируемые значения превышают номинальные предельные значения, которые не должны быть превышены, а именно:

W_1 — сигнал тревоги о высокой температуре;
 W_2 — сигнал тревоги при низкой температуре.

Определив входные и выходные сигналы, была спроектирована модель системы адаптивного управления системой охлаждения двигателя с помощью программного комплекса PROTEUS (рис. 2) [9].

Модель состоит из следующих элементов:

1. Блок управления на базе схемы Arduino относится к типу Uno, электронная схема управления, в состав которой входит микропроцессор, способный принимать, обрабатывать и отправлять цифровые и аналоговые сигналы. Она получает сигналы от различных датчиков, обраба-

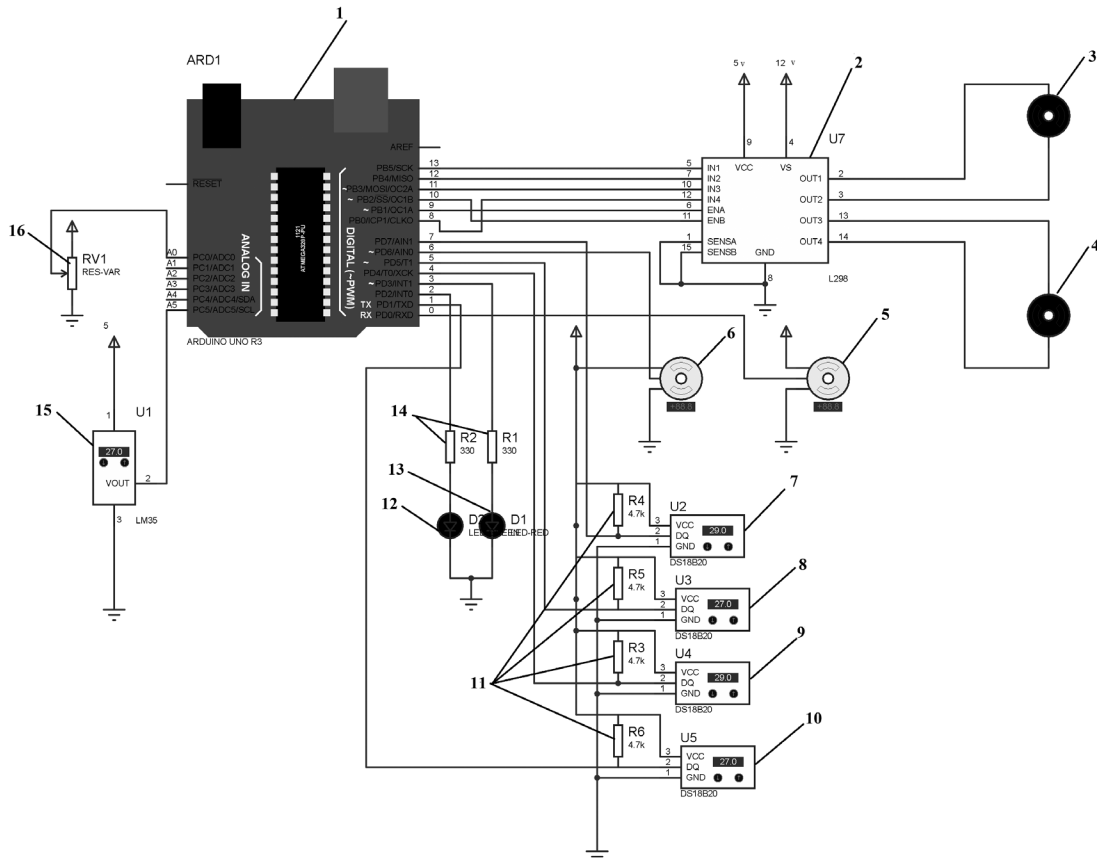


Рис. 2. Модель системы адаптивного управления системой охлаждения двигателя в программном комплексе PROTEUS: 1 — схема Arduino типа Uno; 2 — цепь привода электродвигателя L298; 3 — электродвигатель насоса; 4 — электродвигатель вентилятора; 5 — сервомотор термостата; 6 — сервомотор жалюзи; 7 — датчик температуры охлаждающей жидкости на входе в двигатель DS18B20; 8 — датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе из двигателя DS18B20; 9 — датчик температуры охлаждающей жидкости на входе в радиатор DS18B20; 10 — датчик температуры охлаждающей жидкости на выходе из радиатора DS18B20; 11, 14 — сопротивление; 12 — красный светодиод; 13 — зеленый светодиод; 15 — датчик температуры окружающего воздуха LM35; 16 — датчик частоты вращения вала двигателя LM393

тывает данные и отправляет управляющие сигналы на исполнительные элементы с помощью загруженного в нее управляющего программного обеспечения.

2. Привод электродвигателя L 298: электронная схема, которая получает управляющие сигналы от блока управления и отправляет их на шаговые двигатели. Работающая схема выключает два двигателя с управляющей скоростью и направлением вращения.

3. Внешний датчик температуры LM35: электронный датчик с аналоговым выходным сигналом, который измеряет температуру воздуха в диапазоне $-55^{\circ}\text{C} \dots +150^{\circ}\text{C}$ с точностью $\pm 4^{\circ}\text{C}$.

4. Датчик температуры жидкости DS18B20: водонепроницаемый цифровой электронный датчик, работающий в диапазоне $-55^{\circ}\text{C} \dots +130^{\circ}\text{C}$ с точностью $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

5. Электродвигатель: мотор постоянного тока, 12 вольт.

6. Сервомотор: электронный двигатель, угол поворота вала которого можно регулировать от 0° до 90° в обе стороны.

7. Электрические сопротивления, светодиод, элементы коммуникации.

Теперь рассмотрим, как работает адаптивная схема управления системой охлаждения двигателя. Датчик температуры 15 измеряет температуру наружного воздуха, а датчики 7, 8, 9, 10 измеряют температуру охлаждающей жидкости на входе и выходе двигателя, а также на входе и выходе радиатора, датчик 16 измеряет частоту вращения вала двигателя.

Сигналы с датчика передаются в виде электрического сигнала на схему Arduino 1 в блоке управления, значение полученного напряжения пропорционально значению температуры. Схема Arduino обрабатывает полученные данные через программный код, загруженный на микроконтроллер, и выдает необходимые управляющие сигналы для цепи привода электродвигателя 2 и оттуда на электродвигатель насоса 3 и электродвигатель вентилятора 4, которые вращаются со скоростью, соизмеримой с требуемой температурой охлаждающей жидкости и предварительно запрограммированными. Другой сигнал посылается на сервомотор термостата 5, вал которого в свою очередь поворачивается на угол и в направлении, соизмеримых с температурой

охлаждающей жидкости, необходимой для открытия или закрытия термостата. В зависимости от температуры окружающего воздуха на сервомотор жалюзи 6 подается необходимый сигнал для открытия или закрытия жалюзи. Когда температура поднимается выше допустимого предела, загорается красный светодиод 13, а когда она опускается ниже допустимого предела, загорается зеленый светодиод 14. Блок управления получает сигналы о частоте вращения насоса и вентилятора через скорость вращения электродвигателя, а также о положении термостата и жалюзи через положение стрелы сервомоторах.

В рамках исследования адаптивной системы управления системой охлаждения двигателя внутреннего сгорания был разработан алгоритм управления, который показан на рис. 3.

Работа алгоритма управления основана главным образом на значениях температуры охлаждающей жидкости на выходе из двигателя, воздуха окружающей среды и частоты вращения коленчатого вала двигателя.

При работающем двигателе насос системы охлаждения начинает работать на низких оборотах N_1' , чтобы выполнить прогрев различных частей двигателя (то есть осуществляется передача тепла от головки блока цилиндров остальным деталям двигателя через охлаждающие жидкости), пропорционально температуре охлаждающей жидкости до тех пор, пока температура не достигнет 70°C , после чего насос начинает работать с максимальной скоростью N_1'' . При этом термостат открывается при температуре охлаждающей жидкости 95°C . Вентилятор начинает работать при температуре охлаждающей жидкости 120°C с частотой N_2' . Термостат открывается при температуре охлаждающей жидкости 70°C , если количество оборотов коленчатого вала двигателя более 2000 об/мин, так как при скорости вращения выше 2000 оборотов оптимальная температура охлаждающей жидкости должна быть менее 80°C . При высоких температурах окружающей среды скорость вращения вентилятора увеличивается до N_2'' и уменьшается при снижении температуры наружной среды, либо отключается совсем, при прогреве двигателя.

Проведение практических экспериментов по предложенной схеме адаптивного управления показывает влияние температуры охлаждающей

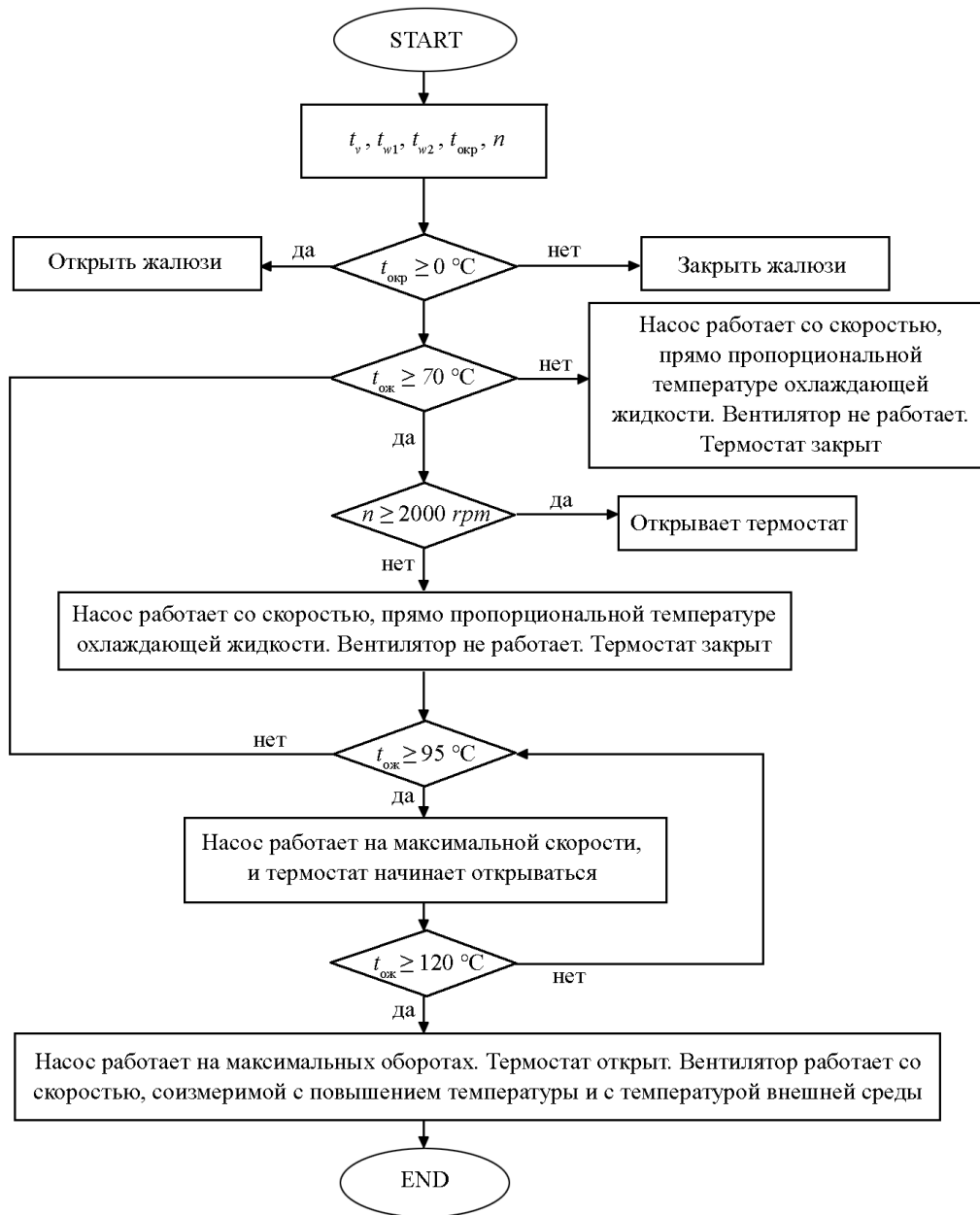


Рис. 3. Алгоритм адаптивного управления системой охлаждения двигателя:

t_v — температура охлаждающей жидкости на входе в двигатель; t_{w1} — температура охлаждающей жидкости на входе в радиатор; t_{w2} — температура охлаждающей жидкости на выходе из радиатора; $t_{ож}$ — температура охлаждающей жидкости на выходе из двигателя; $t_{окр}$ — температура окружающего воздуха; n — частота вращения вала двигателя

жидкости на различных режимах работы двигателя на расход топлива. Зависимость представлена на рис. 4.

Видно, что поддержание температуры охлаждающей жидкости в пределах 100°C снижает наименьший расход топлива при различных режимах работы двигателя, а при частоте вра-

щения двигателя выше 2000 об/мин наименьший расход топлива можно получить за счет поддержания температуры охлаждающей жидкости в пределах 70°C , таким образом, подчеркивается важность точного контроля температуры охлаждающей жидкости для снижения расхода топлива.

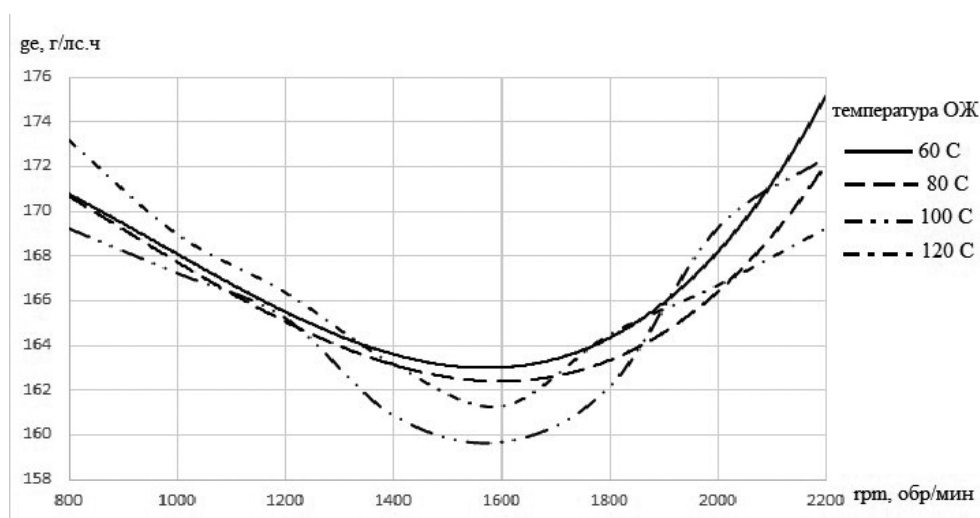


Рис. 4. Зависимость удельного эффективного расхода топлива от температуры охлаждающей жидкости для двигателя типа В2

Поддержание рабочей температуры двигателя типа В2 за счет управления элементами системы охлаждения обеспечит относительную экономию топлива в объемах от 5 до 25 %.

Поддержание оптимальной температуры охлаждающей жидкости двигателя за счет адаптивной схемы управления элементами системы охлаждения позволяет достичь следующих результатов:

- снизить расход топлива дизельного двигателя МГМ, от 5 до 25 %;
- сократить время прогрева двигателя;
- увеличить технический ресурс двигателя, обеспечив его работу в оптимальных температурных условиях.

Проведенное в рамках исследования имитационное моделирование позволило:

- сократить количество экспериментов для разных температурных режимов работы двигателя, затраты на экспериментальные исследования;
- оперативно изменять условия эксперимента путем изменения программного кода;
- использовать моделирование для разных типов двигателей путем изменения входных параметров в коде;
- получить результаты, близкие к реальным условиям работы двигателя.

Применение современных электронных схем для управления элементами системы охлаждения двигателя с целью поддержания оптимальной температуры охлаждающей жидкости позволяет снизить расход топлива, что приведет

к повышению подвижности МГМ и его способности двигаться и маневрировать в течение более длительного периода. Данная схема может быть использована на всех типах двигателей машин, путем простой модификации кода под условия и параметры каждого двигателя [10–13].

Список источников

1. Турбопоршневой двигатель В-92С2. Техническое описание. М: Военное издательство, 1991. 128 с.
2. Дизель В-84М (В-84, В-84-1). Техническое описание. М: Военное издательство, 1991. 128 с.
3. Система охлаждения танка: пат. 175715 Рос. Федерация. № 2016142465; заявл. 28.10.16; опубл. 15.12.17, Бюл. № 34. 3 с.
4. Шабалин Д.В. Исследование проблем создания и путей совершенствования танковых силовых установок: монография. Омск: ОАБИИ, 2019. 336 с.
5. Шабалин Д.В., Иванов В.В. Теоретические предпосылки улучшения топливной экономичности танковых силовых установок с двигателями типа В-2 // Наука и военная безопасность. 2018. № 3 (14). С. 29–34.
6. Лепешинский И.Ю., Пепеляев А.В., Бруннин Е.В. и др. Устройство бронетанковой техники: учеб. пособие.: в 2 ч. Ч. 1. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 156 с.
7. Никонова Г.В. Оптимизация управления режимом энергопотребления насосных агрега-

тов // Омский научный вестник. 2011. № 3 (103). С. 170–174.

8. Чикирев О.И., Лепешинский И.Ю., Костин Е.В., Мунин В.А. Повышение уровня диагностирования с введением голосовой аварийной сигнализации бронеобъектов // Омский научный вестник. 2012. № 3 (113). С. 258–262.

9. Банци М., Шайло М. Первые шаги с Arduino: платформа прототипирования с открытым исходным кодом; перевод с англ. 4-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2023. 278 с.

10. Гармаш Ю.В., Пономарева И.И., Сарбаев В.И. Структура управляющей системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 3–3 (82). С. 31–37.

11. Проговоров А.П. Математическая модель для определения основных показателей газодизельной модификации двигателей объектов вооружения и военной техники // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2023. № 2. С. 57–62.

12. Подколзин П.С. Оценка эффективности системы охлаждения малоразмерных дизелей в условиях высоких температур окружающей среды // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 6. С. 122–127.

13. Иванов В.В., Тибогаров А.А., Козлов А.А., Агафонов Д.С. Влияние теплового состояния силовой установки на подвижность военной гусеничной машины; сб. тр. VI Межвед. науч.-практ. конф. «Транспортные средства специального назначения: разработка, производство и модернизация», Омск, 2022. С. 131–138.

References

1. Turbopiston Engine B-92C2S2. Technical Description. M: Military Publ. House, 1991. 128 p.

2. Diesel V-84M (V-84, V-84-1). Technical description. M.: Military Publishing House, 1991. 128 p.

3. Tank cooling system: patent. 175715 Ros. Federation. No. 2016142465; avt. 28.1016; published 15.12.17, Bulletin No 34. 3 p.

4. Shabalin D.V. Research of the Problems of Creation and Ways to Improve Tank Power Plants: Monograph. Omsk: OABII, 2019. 336 p.

5. Shabalin D.V., Ivanov V.V. Theoretical prerequisites for improving the fuel efficiency of tank propulsion systems with B-2 type engines // Science and Military Security. 2018. No 3 (14). Pp. 29–34.

6. Lepeshinsky I.Yu., Pepelyaev A.V., Brusnikin E.V. et al. Design of armored vehicles: textbook: in 2 parts. P. 1. Omsk: Izd-vo OmSTU, 2011. 156 p.

7. Nikonova G.V. Optimization of energy consumption mode control of pump units // Omsk scientific bulletin. 2011. No 3 (103). Pp. 170–174.

8. Chikirev O.I., Lepeshinsky I.Yu., Kostin E.V., Munin V.A. Increasing the level of diagnostics with the introduction of voice emergency signaling of armored objects // Omsk Scientific Bulletin. 2012. No 3 (113). Pp. 258–262.

9. Banzi M., Shiloh M. First Steps with Arduino: Open Source Prototyping Platform; translation from English. 4th ed. SPb.: BHV-Peterburg, 2023. 278 p.

10. Garmash, Yu.V., Ponomareva I.I., Sarbaev V.I. Structure of the control system of the internal combustion engine cooling // World of transport and technological machines. 2023. No 3–3 (82). Pp. 31–37.

11. Progovorov A.P. Mathematical model for determining the main indicators of gas-diesel engine modification of weapons and military equipment // Scientific Bulletin of the defense-industrial complex of Russia. 2023. No 2. Pp. 57–62.

12. Podkolzin P.S. Estimation of the cooling system efficiency of small-size diesel engines under conditions of high ambient temperatures // Izvestia Tula State University technical sciences. 2022. No 6. Pp. 122–127.

13. Ivanov V.V., Tibogarov A.A., Kozlov A.A., Agafonov D.S. Influence of the thermal state of the power plant on the mobility of the military tracked vehicle; Collection of Proc. of VI Interv. scientific-practical conf. «Special purpose vehicles: development, production and modernization», Omsk, 2022. Pp. 131–138.