

РАЗДЕЛ III

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 621.43.629

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ

В.П. Денисов, А.П. Домбровский, С.С. Журавлев
ФГБОУ ВПО «СибАДИ», Россия, г. Омск.

Аннотация. Представлен алгоритм получения прогнозных параметров динамического объекта на примере предсказания температуры двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Предсказанное на основе адаптивной модели Брауна значение температуры используется для переключения режимов работы вентилятора системы охлаждения. При превышении предсказанной температурой двигателя допустимого значения осуществляется переход на режим работы вентилятора, при котором происходит усиление турбулентности теплоносителя. Усовершенствованное управление вентилятором системы охлаждения ДВС позволяет увеличить надежность двигателя.

Ключевые слова: система охлаждения двигателя внутреннего сгорания, адаптивная модель, прогнозирование, нечеткая логика.

Введение

В статье рассмотрен вопрос прогнозирования параметров динамического объекта на примере прогнозирования температуры двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Вопрос прогнозирования температуры ДВС является актуальным, так как при достижении двигателем критического значения температуры он выходит из строя.

Для реализации процесса прогнозирования изменения температуры ДВС необходимо располагать соответствующей математической моделью, в которой температура характеризует двигатель за ряд последовательных моментов времени. Модели, построенные по данным такого типа, называются моделями временных рядов. Располагая моделью, можно получить прогнозное значение температуры.

В работе для осуществления краткосрочного прогнозирования временного ряда изменения температуры используется модель Брауна [1], которая обычно используется, когда требуется отслеживать тенденцию изменения прогнозируемых параметров. При достижении двигателем внутреннего сгорания критической температуры он выходит из строя. Системы охлаждения современных ДВС не располагают средствами, позволяю-

щими избежать нагревания двигателя до критической температуры.

Авторами статьи разработан метод [2,3], благодаря которому можно противодействовать процессу критического нагревания ДВС за счет использования режима повышенного охлаждения. В статье рассмотрены вопросы перехода из нормального (базового) режима охлаждения ДВС, соответствующего нормальному температурному режиму двигателя на режим повышенного охлаждения ДВС.

Наиболее распространенная в настоящее время система охлаждения автомобильных ДВС включает в себя два контура жидкостный и воздушный. В первом из них насос обеспечивает циркуляцию охлаждающей жидкости, во втором – воздушное охлаждение радиатора осуществляется вентилятором.

Температура ДВС поддерживается на уровне, соответствующем заданному значению, благодаря функционированию этих двух контуров охлаждения. Основные элементы двухконтурной системы регулирования температуры ДВС, двигатель и радиатор со своими входными и выходными сигналами, приведены на рисунке 1. В статье рассматривается поддержание оптимальной температуры T после двигателя с помощью воздушного охлаждения.

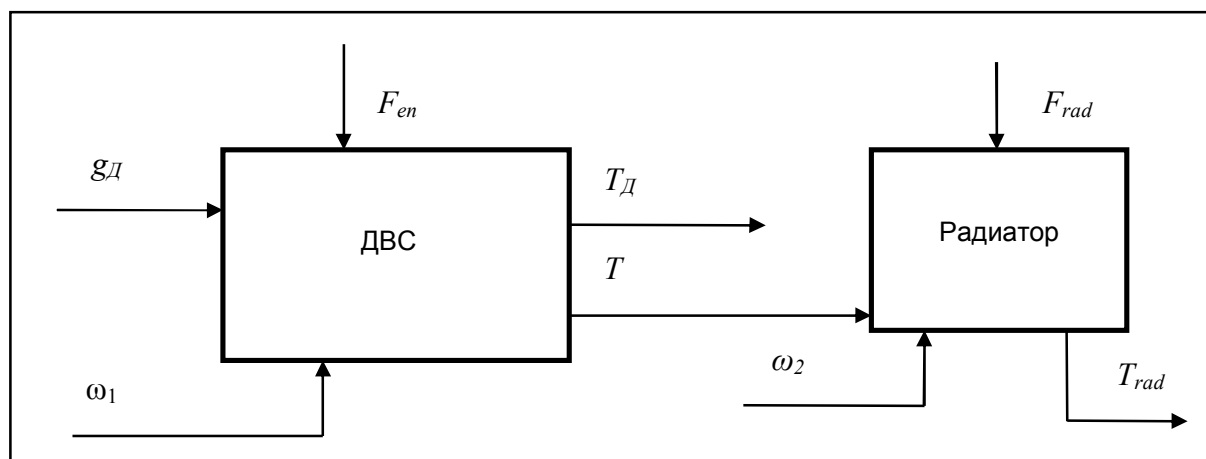


Рис. 1. Структурная схема двухконтурной системы регулирования температуры ДВС:
 F_{en} , F_{rad} – возмущающие воздействия на двигатель и радиатор; g_D – расход топлива;
 T_D – температура двигателя; T – температура теплоносителя после двигателя;
 T_{rad} – температура теплоносителя после радиатора; ω_1 – частота вращения привода
насосного агрегата, ω_2 – частота вращения вентилятора

Нанос и вентилятор автомобиля в недалеком прошлом приводились в действие от коленчатого вала двигателя. Таким образом, управляющим воздействием на механизмы насоса и вентилятора являлись обороты двигателя. В связи с тем, что условия эксплуатации автомобиля изменяются в очень широких пределах, использование в качестве управляющего воздействия оборотов двигателя без учета температуры не всегда позволяет поддерживать оптимальный температурный режим ДВС.

Шагом вперед к достижению оптимальности теплового режима двигателя являлось использование в системе охлаждения механической вязкостной муфты (вискомуфты). При повышении температуры вискомуфта, благодаря специальному наполнителю (вязкость которого зависит от температуры), передает на крыльчатку все больший крутящий момент. Таким образом, температура управляла частотой вращения вентилятора. Однако конструкция, реализующая такой метод, оказалась ненадежной, так как обладала малой долговечностью.

Использование электродвигателя в качестве устройства, приводящего в действие крыльчатку вентилятора, позволило как повысить надежность, так и улучшить качество управления температурным режимом двигателя путем использования в качестве управляющего воздействия температуры.

Наиболее распространенным способом управления вентилятором системы охлаждения двигателя внутреннего сгорания является включение вентилятора при одном значении

температуры, а выключение – при другом (меньшем) значении температуры. Такой режим работы соответствует алгоритму релейного регулирования, основу которого составляют три элемента – датчик, реле и вентилятор. Разница (гистерезис) между температурами включения и выключения реле обычно составляет 5-7 градусов.

Схема релейной системы регулирования проста, это является ее преимуществом, но температура постоянно колеблется от точки включения до точки выключения вентилятора, что приводит к эффекту термокачки и ударным нагрузкам на бортовую сеть, особенно для вентиляторов большой мощности. Кроме того, постоянное включение вентилятора может привести к существенному разряду аккумуляторной батареи. Эти недостатки привели к необходимости создания систем, стабилизирующих температуру двигателя, что позволяет снизить расход топлива, увеличить срок службы (ресурс) двигателя, уменьшить электрическую нагрузку на бортовую сеть автомобиля.

Методы конструирования дополнительных устройств управления частотой вращения вентилятора

Устройствами, позволяющими стабилизировать температуру, могут являться приборы, управление которых основано на традиционном пропорционально-интегрально-дифференциальном (ПИД) законе регулирования или на правилах, использующих современные информационные интеллектуальные технологии, например, реализованные на базе нечеткой логики (Fuzzy Logic) [4]. На прак-

тике настройка ПИД-регулятора крайне трудоемка, кроме того регулятор создаваемого механизма предназначен использоваться в качестве дополнительного устройства, управляющего работой электродвигателя вентилятора разных моделей автомобиля.

Параметры этих двигателей, такие, например, как динамическая постоянная времени изменения температуры, являются переменными, при этом изменяются в широких пределах. Это означает, что на практике поддержание температуры ДВС на заданном уровне при использовании традиционного ПИД-регулятора не всегда обеспечивается.

В работе [4] приведены результаты реализации системы управления охлаждением ДВС на основе метода, позволяющего принимать правильные решения в обстановке неполной и нечеткой информации при управлении частотой вращения вентилятора. Для управления в этих условиях спроектирован регулятор, основанный на правилах нечеткой логики. Цель управления при проектировании регулятора заключалась в поддержание оптимальной температуры ДВС.

Подробно динамика модели системы управления охлаждением двигателя представлена в работе [4,5]. Там же приведены результаты моделирования системы управления охлаждением двигателя в интерактивной среде для выполнения научных и инженерных расчетов MATLAB с пакетами расширения Simulink и Fuzzy Logic Toolbox. Анализ полученных результатов показал, что спроектированная система стабилизирует оптимальную температуру двигателя с хорошей точностью (ошибка регулирования температуры не превышает 1–2 градусов), несмотря на то, что один из основных параметров системы, постоянная времени двигателя, в процессе моделирования изменялась на порядок.

Следует заметить, что эксплуатация автомобиля часто сопровождается условиями, при которых возможен перегрев двигателя. Например, в жаркую погоду автомобиль может стоять в пробках или долго работать при большой нагрузке на двигатель и т. д. В работах [2,3] описан метод, реализующий возможность уменьшения температуры охлаждающей жидкости без изменения конструкции системы охлаждения путем управления частотой вращения вентилятора для увеличения турбулентности охлаждающего воздуха. В этих работах теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что случайное изменение скорости вращения вентилятора (пульсирующий режим) приводит к уменьшению температуры охлаждающей жидкости.

Для получения пульсирующего режима изменения скорости вращения вентилятора в микроконтроллере, используемом в цепи управления вентилятором системы охлаждения, реализуется случайный сигнал с полосовым частотным спектром. При этом автокорреляционная функция изменения скорости вращения вентилятора приближенно аппроксимируется выражением:

$$R(\tau) = \sigma^2 e^{-\tilde{\alpha}|\tau|} \cos \tilde{\beta}\tau,$$

где параметры $\tilde{\alpha}$ и $\tilde{\beta}$ – коэффициенты, характеризующие затухание автокорреляционной функции и частоту периодической составляющей процесса, соответственно; σ – среднее квадратичное отклонение сигнала; τ – временной лаг.

Пульсации сигнала с автокорреляционной функцией данного вида соответствуют стационарному случайному процессу с полосовым частотным спектром. Это делает возможным формировать пульсации в требуемой полосе частот, изменяя параметры $\tilde{\alpha}$ и $\tilde{\beta}$.

Для реализации в микроконтроллере случайного сигнала необходимо выполнить его дискретизацию [6,7]. Нормированная автокорреляционная функция соответствующего дискретного процесса

$$R(n) = e^{-\alpha n} \cos \beta n,$$

где $\alpha = \tilde{\alpha}t_0$; $\beta = \tilde{\beta}t_0$; t_0 – интервал дискретизации по времени.

В микроконтроллере этот сигнал реализуется формирующим фильтром с рекуррентной зависимостью

$$\tilde{\xi}(n) = a_0 \xi(n) + a_1 \xi(n-1) - b_1 \tilde{\xi}(n-1) - b_2 \tilde{\xi}(n-2), \quad (1)$$

где ξ , $\tilde{\xi}$ – входной и выходной сигналы формирующего фильтра, соответственно; a_0, a_1, b_1, b_2 – параметры формирующего фильтра, зависящие от α и β (подробно см. [4]). Параметры автокорреляционной функции α и β задаются в зависимости от условий эксплуатации двигателя.

Для перехода работы системы охлаждения в режим пульсирующего изменения скорости вращения вентилятора необходимо дополнить систему, содержащую регулятор, основанный на правилах нечеткой логики, блоком, реализующим алгоритм (1). Для оп-

ределения момента перехода работы системы в режим пульсирующего изменения скорости вращения вентилятора в соответствии с этим алгоритмом следует воспользоваться прогнозом температуры двигателя. Получение прогнозного значения температуры выполним с помощью адаптивной модели.

Так как эксплуатация автомобиля сопровождается широким спектром меняющихся условий, использование адаптивных моделей, учитывающих информационную неравномерность данных, является наиболее оправданным [1,8]. Реализуем адаптивную модель на базе на схемы скользящей средней (СС-модель). Согласно схеме скользящей средней оценкой текущего значения прогнозируемой переменной является взвешенное среднее значение всех предшествующих значений переменной, причем веса при переменных убывают по мере удаления от последнего значения переменной, т.е. информационная ценность значений признается тем большей, чем они ближе к концу интервала наблюдений.

Для получения прогнозного значения температуры воспользуемся наиболее часто используемой базовой СС-моделью – моделью Брауна [1]. Ниже приведен алгоритм перехода на режим случайного изменения скорости вращения вентилятора при превышении температурой ДВС критического значения, прогнозного значения которой вычисляется с помощью модели Брауна (рис. 2).

Рассмотрим подробнее алгоритм, положенный в основу методики управления частотой вращения вентилятора, позволяющего осуществлять поддержание температуры ДВС в требуемых пределах. Представленный алгоритм, реализованный в блоке управления частотой вращения вентилятора, содержит следующие этапы.

1. По первым пяти текущим значениям температуры теплоносителя (количество начальных измерений принято в соответствии с методикой построения модели) оцениваются значения a_{0i} и a_{1i} параметров модели с помощью метода наименьших квадратов для линейной аппроксимации временного ряда.

2. На втором этапе с использованием параметров a_{0i} и a_{1i} делается прогноз на

один шаг вперед для получения точечного прогнозного значения температуры:

$$T_{i+1}^{np} = a_{0i} + a_{1i}.$$

3. Далее сравниваются расчетное значение T_{i+1}^{np} с критическим значением температуры охлаждающей жидкости $T_{кр}$, и если $T_{i+1}^{np} > T_{кр}$, то включается режим увеличения турбулентности путем случайного изменения скорости вращения вентилятора.

Если расчетное значение меньше критического, то происходит корректировка параметров модели a_{0i} и a_{1i} , и продолжается работа вентилятора под управлением регулятора, использующего правила нечеткой логики.

4. На этом этапе расчетное (прогнозное) значение температуры сравнивают с фактическим (измеренным) значением температуры и находят величину отклонения:

$$\varepsilon_{i+1} = T_{i+1} - T_{i+1}^{np}.$$

5. Затем проводится корректировка параметров модели по следующим формулам:

$$a_{0(i+1)} = a_{0i} + a_{1i} + (1 - \gamma^2) \times \varepsilon_{i+1},$$

$$a_{1(i+1)} = a_{1i} + (1 - \gamma)^2 \times \varepsilon_{i+1},$$

где γ – коэффициент дисконтирования данных, отражающий большую степень доверия более поздним значениям температуры. Новые параметры модели используются для получения прогнозного значения (пункт 2).

6. Заключительный этап. Если в процессе работы вентилятора в режиме увеличенной турбулентности достигается диапазон рабочих температур двигателя, то осуществляется переход в базовый режим: управление передается регулятору, построенному на основе правил нечеткой логики. Таким образом, частота вращения вентилятора будет поддерживать оптимальную температуру ДВС, при этом возобновляется вычисление прогнозного значения температуры путем перехода к пункту 2.

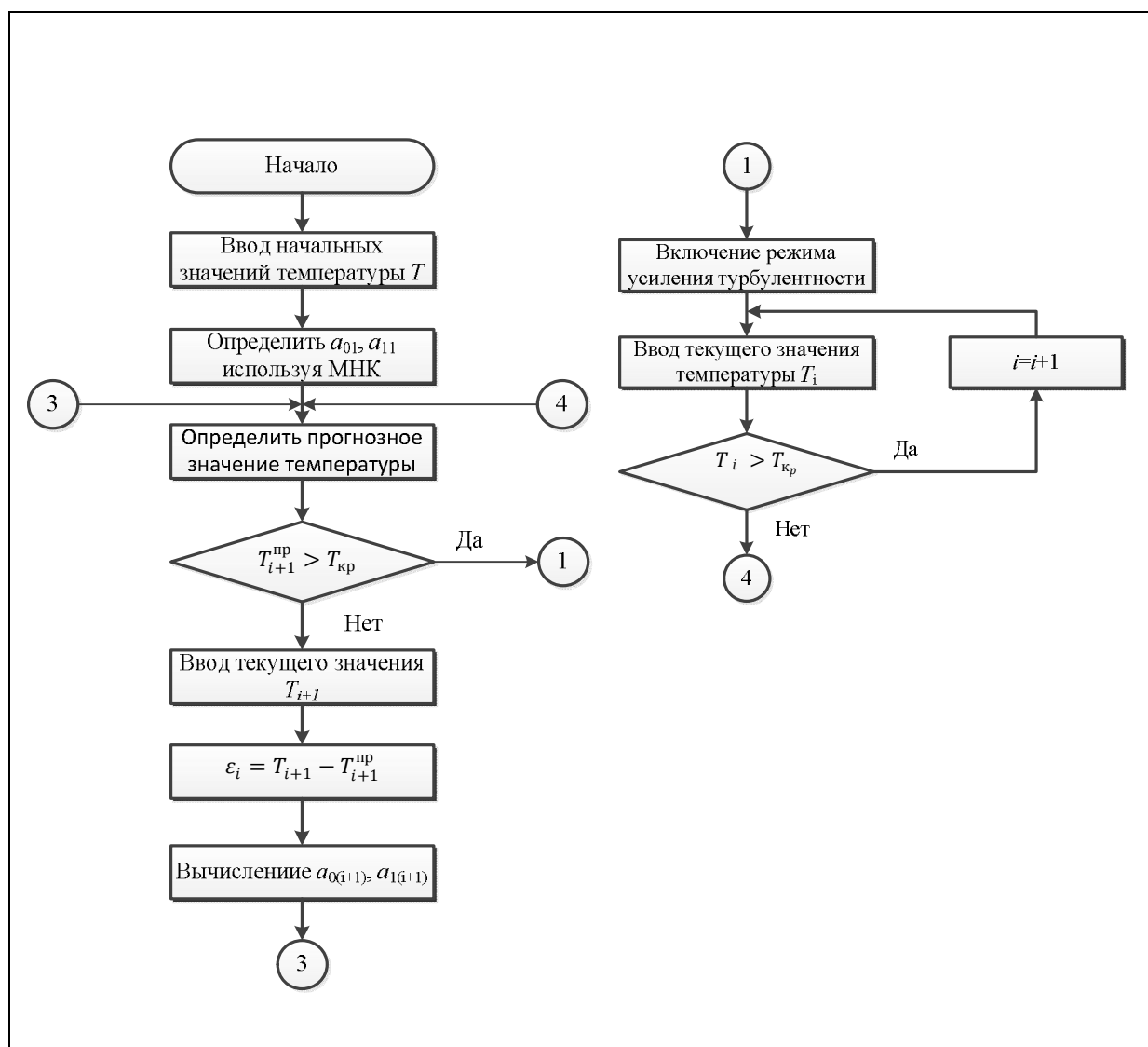


Рис. 2. Алгоритм работы блока управления частотой вращения вентилятора

Заключение

В результате проведенных исследований получена методика управления частотой вращения вентилятора, позволяющего осуществлять поддержание температуры ДВС, отличающейся от оптимального значения не более, чем на 1–2 градуса.

Предложенная методика основана на прогнозировании температуры работы двигателя, которое осуществляется непрерывно во время его работы. Для прогнозирования используется адаптивная модель Брауна, позволяющая учитывать непрерывно меняющиеся условия работы двигателя.

Если прогнозируемое значение температуры двигателя не превышает критического уровня, то частотой вращения вентилятора управляет регулятор, реализованный на базе

нечеткой логики, обрабатывающий незначительные возмущения (базовый режим управления). При превышении прогнозируемым значением температуры двигателя критического значения система охлаждения переводится в режим пульсирующего изменения частоты вращения вентилятора, увеличивающего турбулентность теплоносителя. Использование этого режима позволяет уменьшить температуру двигателя.

При понижении температуры ДВС ниже критического значения управление частотой вращения вентилятора осуществляется в базовом режиме регулятором на базе нечеткой логики. Тем самым реализация предлагаемой методики позволяет повысить экономичность и долговечность работы двигателя.

Библиографический список

1. Лукашин, Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов / Ю.П. Лукашин. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 185 с.
2. Пат. 2513881 Р.Ф.: Способ управления системой охлаждения двигателя внутреннего сгорания / В.П. Денисов, А.П. Домбровский, О.О. Мироничева, И.И. Матяш; СибАДИ. – № 2012138053/11; заявл. 05.09.2012; опубл. 20.04.2014.
3. Денисов, В.П. Повышение надежности эксплуатации автомобиля при управлении системой охлаждения двигателя внутреннего сгорания / В.П. Денисов, А.П. Домбровский, О.О. Мироничева // Вестник СибАДИ. – № 5 (27) – 2012. – С. 25–30.
4. Денисов, В.П. Управление системой охлаждения двигателей внутреннего сгорания на основе нечеткого логического вывода / В.П. Денисов, И.И. Матяш, О.О. Мироничева // Вестник СибАДИ – № 2 (25) – 2012. – С. 11–17.
5. Крутов, В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания / В.И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1989. – 417 с.
6. Изерман, Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М.: Мир, 1984. – 541 с.
7. Денисова, Л.А. Математическая модель цифровой системы регулирования с переменными параметрами / Л.А. Денисова // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 9. – С. 45–48.
8. Александров, А.Г. Оптимальные и адаптивные системы / А.Г. Александров. – М.: Высшая школа, 1989. – 263 с.
9. Денисов В.П., Домбровский А.П., Мироничева О.О. Повышение надежности эксплуатации автомобиля при управлении системой охлаждения двигателя внутреннего сгорания [Increase of an automobile's reliability at operation of the cooling system of an internal combustion engine]. *Vestnik SibADI*, no 5 (27), 2012. pp. 25–30.
10. Денисов В.П., Матяш И.И., Мироничева О.О. Управление системой охлаждения двигателей внутреннего сгорания на основе нечеткого логического вывода [Controlling the cooling system of internal combustion engines on the basis of an indistinct logical conclusion]. *Vestnik SibADI*, no 2 (25), 2012. pp. 11–17.
11. Крутов В.И. *Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания* [Automatic control and management of internal combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 417 p.
12. Изерман Р. *Цифровые системы управления* [Digital control systems]. Moscow, Mir, 1984. 541 p.
13. Денисова Л.А. Математическая модель цифровой системы регулирования с переменными параметрами [Mathematical model of digital system of regulation with variable parameters]. *Avtomatizacija v promyshlennosti*, 2011. no 9. pp. 45–48.
14. Александров А.Г. *Оптимальные и адаптивные системы* [Optimum and adaptive systems]. Moscow, Vysshaja shkola, 1989. 263 p.

Денисов Владимир Петрович (Россия, г. Омск) – доктор технических наук, профессор кафедры «Тепловые двигатели и электротехника и автотракторное электрооборудование», ФГБОУ ВПО «СибАДИ»; профессор кафедры «Информатика и информационные технологии», Омский филиал Финансового университета при правительстве РФ. (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: vpdenisov@mail333.com).

Домбровский Андрей Петрович (Россия, г. Омск) – аспирант ФГБОУ ВПО «СибАДИ». (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: dombrovskiy@list.ru).

Журавлев Сергей Сергеевич (Россия, г. Омск) – аспирант ФГБОУ ВПО «СибАДИ». (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: zhuravliovss@list.ru).

Denisov Vladimir Petrovich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor of The Siberian state automobile and highway academy (SibADI); professor of the department "Informatics and Information Technologies" Omsk branch of Financial University under the Government of the Russian Federation. (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: vpdenisov@mail333.com).

Dombrovsky Andrey Petrovich (Russian Federation, Omsk) –graduate student of The Siberian state automobile and highway academy (SibADI). (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: dombrovskiy@list.ru)

Zhuravlev Sergey (Russian Federation, Omsk) – graduate student of The Siberian state automobile and highway academy (SibADI). (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: zhuravliovss@list.ru).

FORECASTING TEMPERATURE OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE USING ADAPTIVE MODEL

V P. Denisov, A.P. Dombrovsky, S.S. Zhuravlev

Abstract. The article presents an algorithm of obtaining prognostic parameters of a dynamic object on the example of forecasting temperature of the internal combustion engine. The value of temperature predicted on the basis of Brown's adaptive model is used for switching operating modes of the cooling fan. At exceeding admissible value of predicted temperature there is implemented a transition to an operating mode of the fan upon which there is a strengthening of turbulence of a heat carrier. The advanced control of the cooling fan of the internal combustion engine allows to increase the reliability of the engine.

Keywords: cooling system of an internal combustion engine, adaptive model, forecasting, indistinct logic.

References

1. Lukashin Y.P. *Adaptivnye metody kratkoscrochnogo prognozirovaniya vremennyh rjadov* [Adaptive methods of short-term forecasting of temporary ranks]. Moscow, Finansy i statistika, 2003. 185 p.
2. Denisov V.P., Dombrovskij A.P., Mironicheva O.O., Matjash I.I. *Sposob upravlenija sistemoy ohlazhdenija dvigatelja vnutrennego sgoranija* [Method of controlling cooling system of an internal combustion engine]. Patent R.F.no 2012138053 /11, 2014.