

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ИДЕНТИФИКАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ КОНТУРОМ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

Михайленко В. С., к.т.н., доцент кафедры электрооборудования и судовой автоматики Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: vlad_mihailenko@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2793-8966;

Харченко Р. Ю., старший преподаватель кафедры морской электроники Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: romann30@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3051-7513

Исследуется возможность применения метода динамической идентификации Калмана для определения математической модели контура охлаждения судовой дизельной установки. Определена математическая модель в виде передаточной функции на основе которой рассчитаны экспертные настройки для типового ПИ-регулятора АСР системы охлаждения. Результаты имитационного моделирования АСР с ПИ-регулятором, в пакете Matlab, показали перспективность предложенного метода и возможность его использования при адаптации локальных систем автоматического управления объектами СЭУ.

Ключевые слова: математическая модель, динамическая идентификация, судовая дизельная установка, контур охлаждения, ПИ-регулятор.

Вступление. Системы охлаждения современных главных судовых двигателей внутреннего сгорания (СДВС) служат для обеспечения максимально высоких технико-экономических показателей эксплуатации этих двигателей исключительно на номинальных режимах работы. Однако современная практика показывает, что судовые энергетические установки эксплуатируются продолжительное время на частичных режимах нагрузок [1]. В этой связи усовершенствование систем охлаждения главных СДВС является весьма актуальной задачей. В системах охлаждения цилиндров СДВС от температуры охлаждающей воды в зарубашечном пространстве в значительной мере зависит температура стенки, которая, в свою очередь, влияет на протекание рабочего процесса в цилиндре, величину работы трения в цилиндропоршневой группе и интенсивность ее износа [2, 3]. Повышение температуры охлаждающей воды до определенных пределов уменьшает износ цилиндропоршневой группы. Верхний предел температуры определяется условиями безопасной работы двигателя. В связи с применением сернистого и высоковязкого сортов топлива намечается тенденция к повышению температурного режима в системе охлаждения цилиндров и форсунок у мощных малооборотных двигателей до 62–85 °С. Система регулирования температуры охлаждающей воды главных судовых дизелей должна поддерживаться постоянной при различных нагрузках и температурах забортной воды. Наиболее приемлемой для дизелей, в настоящее время, считается температура воды на выходе из двигателя равная 80 °С (двигатели Зульцер, Бурмейстер, Ман и т.д.), при которой обеспечивается нормальный режим охлаждения. Повышение уровня поддержания температуры охлаждающей воды зависит от конструктивных особенностей двигателя, сорта применяемого масла и сорта топлива [3]. Для разработки автоматизированной системы регулирования (АСР) температурным режимом, необходимо знание математической модели объекта управления. И одним из сравнительно современных методов динамической идентификации [4], основанных на результатах наблюдения за изменениями значений контролируемых параметров объекта управления на определенном интервале времени, является метод Калмана [5]. Этапы реализации метода заключаются в следующем:

- в процессе эксплуатации через строго фиксированные интервалы времени записывают значения входных и выходных параметров;
- выбирают упрощенный вид аналитической модели, записанной в виде разностного уравнения того или иного порядка;

- по результатам наблюдения и принятого типа модели методом минимума суммы квадратов отклонений определяют коэффициенты разностного уравнения;
- решают разностное уравнение и сравнивают полученные динамические характеристики с экспериментом;
- при больших отклонениях задаются разностным уравнением более высокого порядка и повторяют расчет.

Для дифференциального линейного уравнения с k -го порядка, описывающего динамику объекта управления, аналогом будет разностное уравнение вида:

$$y_n = A_0 y_{n-1} + A_1 y_{n-2} + \dots + A_{k-1} y_{n-k} + B_0 x_{n-1} + B_1 x_{n-2} + \dots + B_{k-1} x_{n-k},$$

где n – номер точки эксперимента; A, B – коэффициенты разностного уравнения.

Оно может быть принято в качестве исходной модели при динамической идентификации. где n – номер точки эксперимента; A, B – коэффициенты разностного уравнения. Оно может быть принято в качестве исходной модели при динамической идентификации.

Поскольку порядок идентифицируемого объекта обычно неизвестен, следует начинать с наиболее простой модели, а именно – разностного уравнения первого порядка вида $y_n = A_0 y_{n-1} + B_0 x_{n-1}$.

Если модель окажется недостаточно адекватной, следует взять в качестве модели разностное уравнение второго порядка:

$$y_n = A_0 y_{n-1} + A_1 y_{n-2} + B_0 x_{n-1} + B_1 x_{n-2}.$$

Далее, используя методику минимизации суммы квадратов отклонений, т.е. функционала вида:

$$F = \min \sum_{i=1}^n (y_{\text{э}i} - y_{\text{п}i})^2,$$

Получаем систему уравнений:

$$\frac{\partial F}{\partial A_0} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial A_1} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial B_0} = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial B_1} = 0.$$

Из которых можно определить коэффициенты A_0, A_1, B_0, B_1 , удовлетворяющие критерию оптимальности.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу идентификации на примере нахождения математической модели объекта судовой энергетической установки СЭУ (главного двигателя) для канала измерения «температура охлаждающей воды» [6]. На рис. 1 представлена схема регулирования температуры охлаждающей воды $t_2 = T_{\text{вых}}$, действующая по наиболее распространенному способу перепуска.

Результаты исследования. Приведем аналитическое описание представленной системы [2]. Количество отведенной теплоты определяется формулой теплового баланса:

$$q_{\text{отв}} = c_{\text{в}} G_{\text{в}} g (T_{\text{вых}} - T_{\text{х}}), \quad (1)$$

где $c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воды, $G_{\text{в}}$ – расход пресной воды через зарубашечное пространство, g – положение регулирующего органа (РО) (трехходового клапана), $T_{\text{х}}$ – температура воды после охладителя (t_1).

Количество подведенной теплоты выражается функцией температуры газов и регулируемой температуры на выходе из двигателя:

$$q_{\text{под}} = f(T_{\text{г}}; T_{\text{вых}}). \quad (2)$$

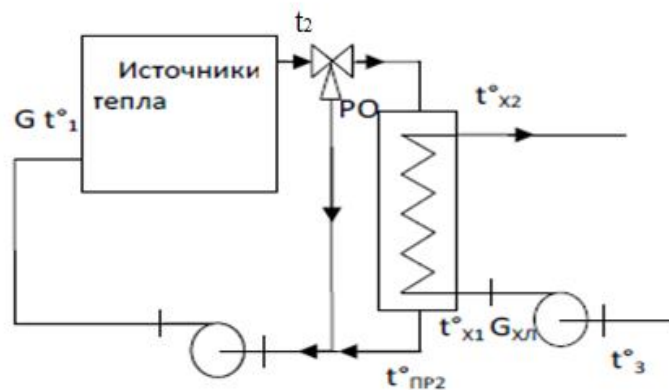


Рисунок 1 – Схема регулювання температури охолоджуючої води перепуском

В соответствии с выражением (1):

$$q_{отв} = f(g; T_{вых}; T_x). \quad (3)$$

После разложения зависимостей (1), (2) в ряд Тейлора и использовании его линейных членов подставим линеаризованные выражения для $q_{отв}$ $q_{под}$ в формулу 3 выражающую неустановившееся (динамическое) состояние системы (нарушение статического равновесия между количеством подводимой и отводимой теплоты):

$$c_{II} = dT_{вых}/dt = q_{под} - q_{отв}, \quad (4)$$

где c_{II} – приведенная теплоемкость системы охлаждения.

С учетом условий статического равновесия получаем уравнение динамики системы охлаждения двигателя:

$$c_n \frac{d\Delta T_{вых}}{dt} + \left[\left(\frac{\partial q_{отв}}{\partial T_{вых}} \right)_0 - \left(\frac{\partial q_{под}}{\partial T_{вых}} \right)_0 \right] \Delta T_{вых} = \left(\frac{\partial q_{под}}{\partial T_{газ}} \right)_0 \Delta T_{газ} - \left(\frac{\partial q_{отв}}{\partial g} \right)_0 \Delta g - \left(\frac{\partial q_{отв}}{\partial T_x} \right)_0 \Delta T_x. \quad (5)$$

Уравнение (4) разделим на фактор устойчивости температурного режима охлаждения дизеля (5):

$$F_s = \frac{\partial q_{отв}}{\partial T_{вых}} - \frac{\partial q_{под}}{\partial T_{вых}}. \quad (6)$$

и введем относительные координаты $y_m = \Delta T_x/T_{x0}$; $y_0 = \Delta T_{вых}/T_{вых0}$; $y_T = \Delta T_T/T_{T0}$; $x = \Delta g/g_0$. После введения постоянной времени T , коэффициентов усиления по исследуемым каналам K_z, K_g, K_x получим уравнение динамики системы охлаждения двигателя (инерционное звено):

$$(T_p + 1)y_0 = K_z y_z - K_g x_g - K_x y_m. \quad (7)$$

Для анализа температурного режима судового двигателя (СД) фиксировалось нарастание температуры охлаждающей воды при приложении номинальной нагрузки. Результаты измерений приведены в таблице 1. Требуется определить постоянную времени нагрева двигателя и получить математическую модель процесса для системы эргатического регулирования температуры охлаждающей воды на выходе из СД (АСР t_2).

Таблица 1 – Данные теплоэнергетического процесса

<i>t, мин</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Theta, ^\circ C$	12	38,7	54,9	64,8	70,7	74,3	76,6	77,9	78,7	80
$\Theta_{модели}, ^\circ C$	–	–	54,91	–	70,70	–	–	–	78,6	–

Из данных наблюдения видно, что температура изменилась от $\Theta_{нач} = 12^{\circ}C$ до $\Theta_{усм} = 80^{\circ}C$. Согласно методу Калмана [5], для идентификации математической модели объекта управления, используем разностное уравнение первого порядка:

$$\Theta_n = A_0 \Theta_{n-1} + B_0 \Theta_{усм}.$$

Для упрощения расчетов примем интервал времени измерений замеров $t = 2$ ч. Для минимизации суммы квадратов отклонений запишем функционал:

$$F = m \min \sum_1^m (\Theta_{эн} - \Theta_n)^2 = m \min \sum_1^m (\Theta_n - A_0 \Theta_{n-1} - B_0 \Theta_{усм})^2.$$

Приравняем нулю частные производные от функционала:

$$\frac{\partial F}{\partial A_0} = \sum_1^m 2(\Theta_n - A_0 \Theta_{n-1} - B_0 \Theta_{усм}) \Theta_{n-1} = 0;$$

$$\frac{\partial F}{\partial B_0} = \sum_1^m (\Theta_n - A_0 \Theta_{n-1} - B_0 \Theta_{усм}) \Theta_{усм} = 0.$$

И с учетом того, что

$$\sum_1^m \Theta_{усм} = m \Theta_{усм} \text{ и } \Theta_{усм} \neq 0,$$

получим систему канонических уравнений:

$$A_0 = \sum_1^m \Theta_{n-1} + B_0 m \Theta_{усм} \Theta_{усм} = \sum_1^m \Theta_n;$$

$$A_0 = \sum_1^m \Theta_{n-1}^2 + B_0 \Theta_{усм} \sum_1^m \Theta_{n-1} = \sum_1^m \Theta_n \Theta_{n-1}.$$

откуда:

$$A_0 = \frac{m \sum_1^m \Theta_n \Theta_{n-1} - \sum_1^m \Theta_{n-1} \sum_1^m \Theta_n}{m \sum_1^m \Theta_{n-1}^2 - \left(\sum_1^m \Theta_{n-1} \right)^2};$$

$$B_0 = \frac{\sum_1^m \Theta_n \sum_1^m \Theta_{n-1}^2 - \sum_1^m \Theta_{n-1} \sum_1^m \Theta_n \Theta_{n-1}}{\Theta_{усм} \left(m \sum_1^m \Theta_{n-1}^2 - \left(\sum_1^m \Theta_{n-1} \right)^2 \right)},$$

где m – число экспериментальных точек.

Так как интервал времени принят равным 2 ч, то из полученных экспериментально данных при $m = 4$ выбираем точки, представленные в табл. 2.

Таблица 2 – Расчетные данные

t, ч	0	2	4	6	8
$\Theta_n, ^{\circ}C$	–	54,9	70,7	76,6	78,7
$\Theta_{n-1}, ^{\circ}C$	12	54,9	70,7	76,6	–

Тогда:

$$\sum_1^4 \Theta_n = 282 ; \sum_1^4 \Theta_{n-1} = 215 ; \sum_1^4 \Theta_{n-1}^2 = 14139 ;$$

$$\sum_1^4 \Theta_n \Theta_{n-1} = 16110 .$$

Подставляя полученные значения в выражения для A_0 и B_0 , получаем:

$$A_0 = 0.368 ; B_0 = 0.632 ,$$

и разностное уравнение при $\Theta_{ycm} = 80^{\circ}C$ принимает вид:

$$\Theta_n = 0.368 \Theta_{n-1} + 50.5 .$$

Для проверки адекватности модели по полученному выражению рассчитаны значения Θ в при тех же интервалах времени (табл. 2 (модели)). Сравнивая расчетные данные с данными эксперимента, убеждаемся в допустимой адекватности математической модели объекту управления. Это позволяет сделать вывод возможности описания объекта в виде дифференциального уравнения первого порядка вида:

$$T \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = \Theta_{ycm} . \quad (8)$$

где T – постоянная времени.

Решением которого является:

$$\Theta = \Theta_{ycm} (1 - e^{-t/T}) + \Theta_{нач} e^{-t/T} ,$$

где полагая $\Theta = \Theta_n$, $\Theta_{нач} = \Theta_{n-1}$ и $t = n \cdot t$, при $n = t$ получаем:

$$A_0 = e^{-t/T} ,$$

откуда

$$T = -t / \ln A_0 = -2 / \ln 0.368 = 2 / 0.9997 = 2 \text{ ч} .$$

Постоянная времени нагрева равна 2 мин., а дифференциальное уравнение (7) примет вид:

$$2 \frac{d\Theta}{dt} + \Theta = 80 . \quad (9)$$

Уравнение (8) является инерционным звеном первого порядка [7]. С учетом влияния возмущения (степень открытия клапана (рис. 1). Определяется коэффициент усиления K объекта по каналу регулирования: $K = \frac{\Delta Y}{\Delta N}$, возмущение клапаном $\Delta N = 10\%$, таким образом $K = 8$ ($^{\circ}C$ % УП), где УП – показания указателя положения клапана. Инерционное звено принимает следующий вид:

$$W(s) = \frac{8}{(2s + 1)} . \quad (10)$$

Примем транспортное запаздывание $\tau = 0.5$ мин., тогда передаточная функция объекта примет вид:

$$W(s) = \frac{8}{(2s+1)} e^{-0.5s} \quad (11)$$

Рассчитаем значения параметров настроек ПИ - регулятора K_p , T_i по формулам (табл. 3) табличного метода предложенного Копеловичем [8] для объектов с самовыравниванием, с целью получения наилучшего переходного процесса АСР температуры охлаждающей воды авторами была произведена экспертная подстройка параметров регулятора с усовершенствованием табличного метода т.к. известные формулы при устойчивости АСР не обеспечивают заданных показателей качества.

Таблица 3 – Параметры регулятора

Закон регулирования	Тип переходного процесса		
	апериодический	с 20 %-ным перерегулированием	минимальный интегральный критерий качества
ПИ	$K_p = \frac{0,4T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = 1,5T_{об}$	$K_p = \frac{0,7T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = 1,7T_{об}$	$K_p = \frac{0,5T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = 2T_{об}$

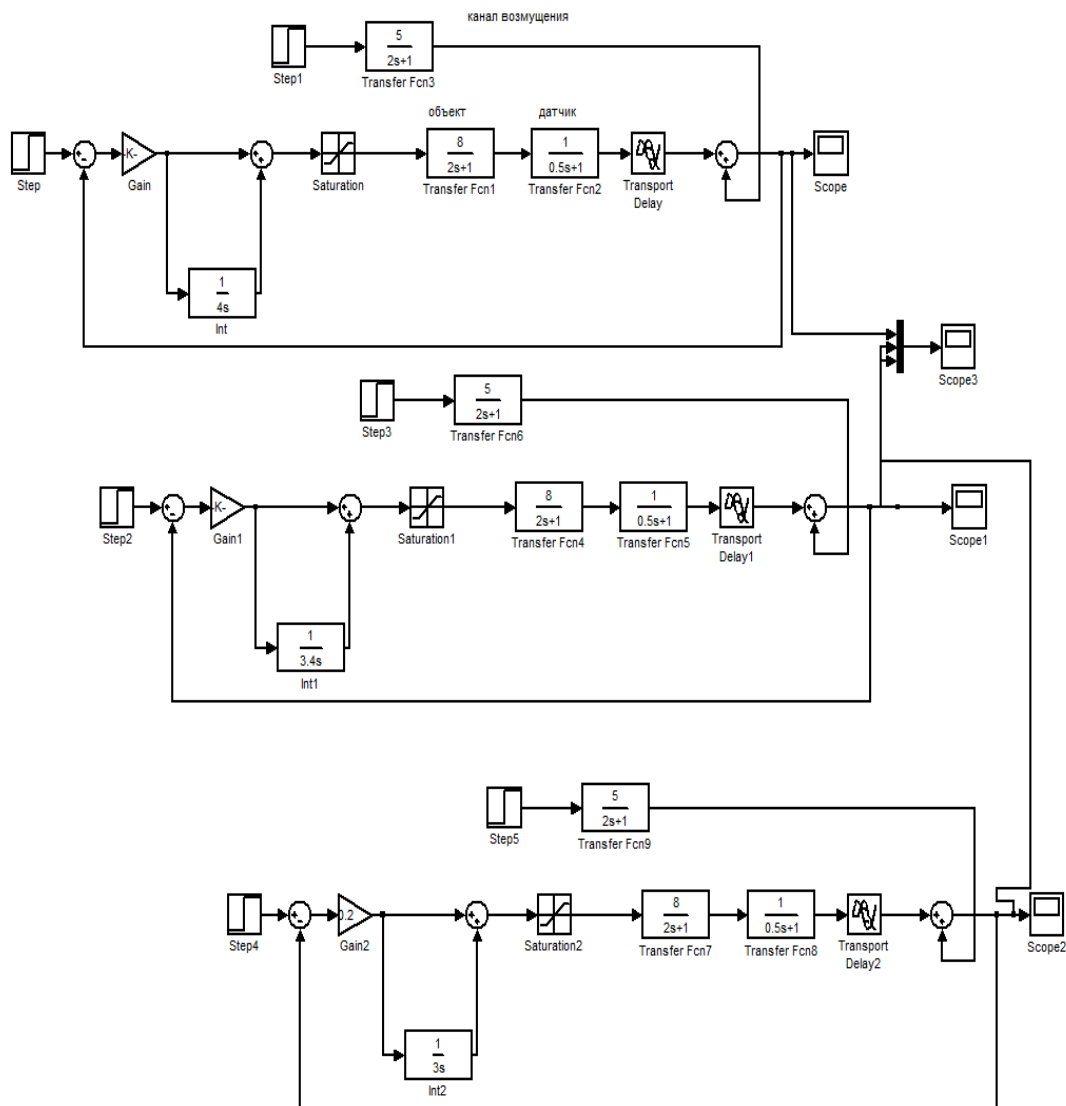


Рисунок 2 – АСР температуры охлаждающей воды дизеля

Программний експеримент. Для сравнительного анализа по выбору наилучшего типа переходного процесса, по критериям времени регулирования и заброса, проведем программный эксперимент по апробации значений настроечных параметров типового регулятора. Выполнив соответствующие расчеты по формулам табл. 3, получены значения настроек ПИ-регулятора: $K_p = 0,2$, $T_i = 3$ (апериодический); $K_p = 0,35$, $T_i = 3,4$ (с 20 % перерегулированием); $K_p = 0,25$, $T_i = 4$ (с интегральным критерием). Для анализа эффективности действия АСР (рис.2) с разными настроечными параметрами проведен программный эксперимент в пакете MathLab (Simulink) [9,10], температура воды на выходе из дизеля $t = 80$ °С. Переходные процессы АСР при рассчитанных параметрах ПИ-регулятора представлены на рис. 3 (1 – 20 % перерегулирование, 2 – интегральный, 3 – апериодический).

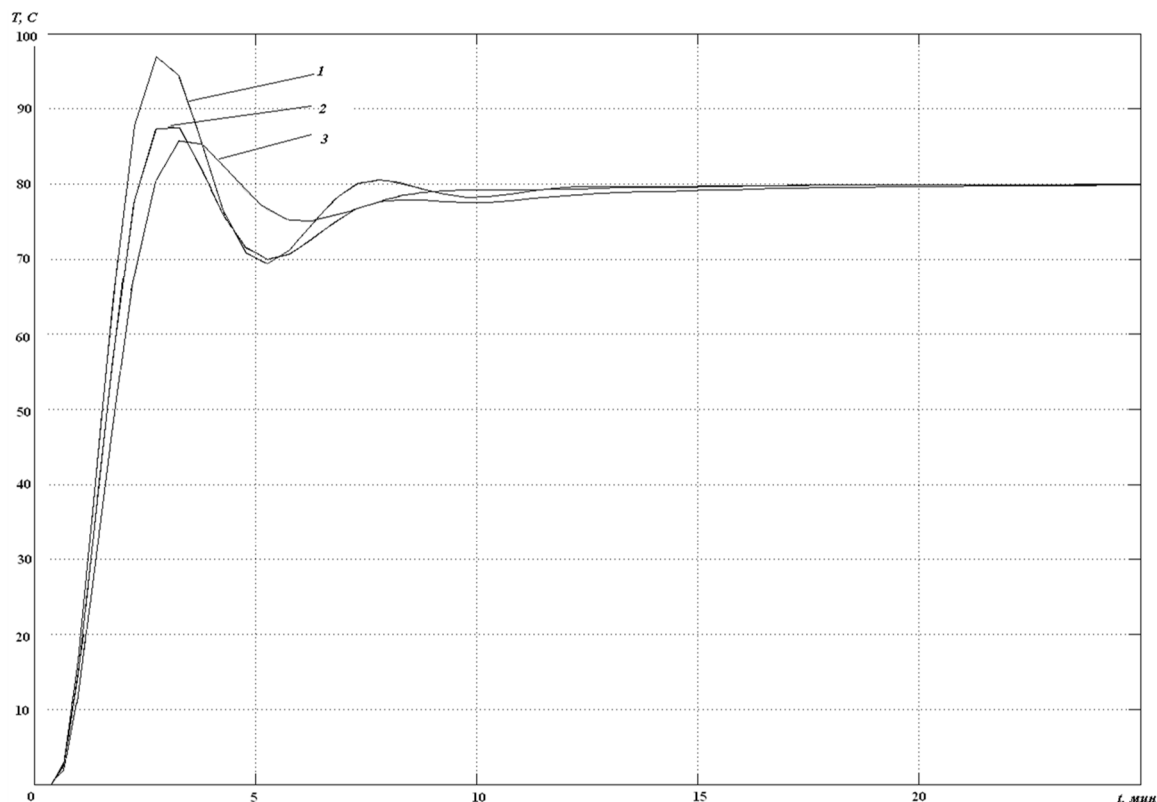


Рисунок 3 – Переходные процессы АСР

Таким образом, проведена динамическая идентификация, рассчитаны и апробированы на модели настройки ПИ – регулятора для АСР температуры охлаждающей воды дизеля (СДВС).

Выводы. Сравнительный анализ типов переходных процессов АСР позволяет прийти к заключению о преимуществе экспертных табличных формул для апериодического процесса по критериям заброса и времени регулирования. Представленный метод идентификации математических моделей объектов управления, позволяет получить, для дальнейшего исследования, модели широкого класса тепловых объектов СЭУ. Аналитический метод Калмана позволяет более точно, в отличие от экспериментальной методики и без дополнительных затрат на экспериментальное оборудование, определить параметры моделей, а в последующем и рассчитать значения настроечных параметров для ПИ и ПИД - регуляторов в автоматизированных системах регулирования судовых объектов. Внедрение данного метода в компьютерные системы управления объектами СЭУ является перспективной практической задачей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев С. К. Судовые ДВС. Пособие для подготовки вахтенных механиков. Diesel Engines / С. К. Чернышев. – М. : Негициант, 2006. – 303 с.
2. Ланчуковский В. И. Автоматизированные системы управления судовых дизельных и газотурбинных установок : учебник / В. И. Ланчуковский, А. В. Козьминых. – М. : Транспорт, 1983. – 320 с.
3. Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Том 1. / И. В. Возницкий. – М. : Моркнига, 2008. – 282 с.
4. Kalman R. E. Contribution to the Theory of Optimal Control / R. E. Kalman. // Bull. Soc. Mat. Mech. 1960. – Vol. 5, № 1. – P. 102–119.
5. Дилигенская А. Н. Идентификация объектов управления / А. Н. Дилигенская. – Самара : СГТУ, 2009. – 136 с.
6. Михайленко В. С. Решение задачи идентификации математической модели судового энергетического оборудования / В.С. Михайленко // Матеріали 8-ї Міжнародної науково-практичної конференції СЕУТТОО. – Херсон : ХДМА, 2017. – С.114–118.
7. Ротач В. Я. Теория автоматического управления / В. Я. Ротач. – М. : МЭИ, 2008. – 396 с.
8. Копелович А.П. Инженерные методы расчета автоматических регуляторов, / А.П. Копелович. – М.: ГНТИ, 1960. – 190 с.
9. Дьяконов В. П. MATLAB. Самоучитель / В. П. Дьяконов.– М. : ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
10. Черных И.В. Simulink. Среда создания инженерных приложений / И. В. Черных. – М. : Диалог МИФИ, 2014. – 491 с.

REFERENCES

1. Chernihshev S. K. Sudovihe DVS. Posobie dlya podgotovki vakhtennihk mekhanikov. Diesel Engines / S. K. Chernihshev. – M. : Negociant, 2006. – 303 s.
2. Lanchukovskiy V. I. Avtomatizirovannihe sistemih upravleniya sudovihk dizeljnihkh i gazoturbinnihkh ustanovok : uchebnik / V. I. Lanchukovskiy, V. Kozjminihk. – M. : Transport, 1983. – 320 s.
3. Voznickiy I. V. Sudovihe dvigateli vnutrennego sgoraniya. Tom 1. / I. V. Voznickiy. – M. : Morkniga, 2008. – 282 s.
4. Kalman R. E. Contribution to the Theory of Optimal Control / R. E. Kalman. // Bull. Soc. Mat. Mech. 1960. – Vol. 5, № 1. – P. 102–119.
5. Diligenskaya A. N. Identifikaciya objhektov upravleniya / A. N. Diligenskaya. – Samara : SGTU, 2009. – 136 s.
6. Mikhayjlenko V. S. Reshenie zadachi identifikacii matematicheskoyj modeli sudovogo ehnergeticheskogo oborudovaniya / V.S. Mikhayjlenko // Materiali 8-ї Mizhnarodnoї nauково-практичної конференції SEUTTOO. – Kherson : KhDMA, 2017. – S.114–118.
7. Rotach V. Ya. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya / V. Ya. Rotach. – M. : MEhI, 2008. – 396 s.
8. Kopelovich A.P. Inzhenernihe metodih rascheta avtomaticheskikh regulyatorov, / A.P. Kopelovich. – M.: GNTI, 1960. – 190 s.
9. Djyakonov V. P. MATLAB. Samouchitelj / V. P. Djyakonov.– M. : DMK Press, 2012. – 768 s.
10. Chernihkh I.V. Simulink. Sreda sozdaniya inzhenernihk prilozheniyj / I. V. Chernihkh. – M. : Dialog MIFI, 2014. – 491 s.

Михайленко В. С., Харченко Р. Ю. РІШЕННЯ ЗАДАЧ ІДЕНТИФІКАЦІЇ І УПРАВЛІННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ КОНТУРОМ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЯ

Досліджується можливість застосування методу динамічної ідентифікації Калмана для визначення математичної моделі контуру охолодження суднової дизельної установки. Визначено математична модель у вигляді передавальної функції на основі якої розраховані експертні настройки для типового ПІ регулятора АСР системи охолодження. Результати імітаційного моделювання АСР з ПІ - регулятором, в пакеті Matlab, показали перспективність запропонованого методу і можливість його використання при адаптації локальних систем автоматичного управління об'єктами СЕУ.

Ключові слова: математична модель, динамічна ідентифікація, суднова дизельна установка, контур охолодження, ПІ-регулятор.

Mikhailenko V. S., Kharchenko R. Yu. SOLVING THE PROBLEMS OF IDENTIFICATION AND CONTROL IN TEMPERATURE CIRCUIT OF THE COOLING SYSTEM ON THE SHIP DIESEL

The possibility of using the Kalman dynamic identification method to determine the mathematical model of the cooling circuit of a ship diesel unit is investigated. A mathematical model is defined in the form of a transfer function on the basis of which the expert settings for a typical PI regulator of the ACS of the cooling system are calculated. Results of simulation modeling of ACS with PI-regulator, in the package Matlab, showed the promise of the proposed method and the possibility of its use when adapting local systems for automatic control of SPP objects.

Keywords: mathematical model, dynamic identification, ship diesel installation, cooling circuit, PI-regulator.

© Михайленко В. С., Харченко Р. Ю.

Статтю прийнято
до редакції 14.11.17