

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-238-251

THE PRINCIPLES OF FORMING A COMPUTER MODEL OF DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF MARINE POWER PLANTS

A. V. Soloviev

The Federal Autonomous Institute Russian River Register Upper Volga Branch-Office,
Nizhniy Novgorod, Russian Federation

In the present work using a systematic analysis of the proposed structural diagram of ship power plants (SPP) with the ranking of the objects in the levels to create a computer model of diagnosing the technical condition of SPP. The proposed numerical assessment of the SPP obtained by the system synthesis. Method is implemented by "convolution" at each hierarchical level the numerical values of estimates of technical condition of structural parts of the subsystem of lower level. To solve this problem we used a multiplicative strategy convolution of partial indicators. This method allowed the objective function to represent as a product of partial indices. The weight of each criterion is ranked with weighting factors, are presented as indicators of the degree of individual criteria. According to the results of a survey of experts determined the ranked indicators of the technical state of all selected (recorded) objects of SPP. This paper has presented a mathematical model for estimating the technical condition of the SPP implemented in the form of a computer program. Developed a computer model of diagnosis allows us to obtain a numerical estimate of the technical condition of objects of SPP and SPP in general, to install suitable or unsuitable technical condition of the appropriate object of SPP, and to analyze the dynamics of state changes of those objects over time to identify the prerequisites and conditions, the consequence of which potential failure. It is shown that knowledge of the patterns of change in the technical condition is of great practical importance because it allows to determine not only the optimal timing of maintenance and repair, but use them in organizations for the classification of ships.

Keywords: computer model, technical diagnostics, indicators of technical condition, ship power plants, systematic analysis.

For citation:

Soloviev, Alexey V. "The principles of forming a computer model of diagnosing the technical condition of marine power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiralov S. O. Makarova* 10.1 (2018): 238–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-238-251.

УДК 621.431.74:004.94

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

А. В. Соловьев

ФАУ «Российский Речной Регистр» Верхне-Волжский филиал
Российского Речного Регистра, Нижний Новгород, Российская Федерация

В настоящей работе с использованием системного анализа предложена структурная схема судовой энергетической установки (СЭУ) с ранжированием ее элементов по уровням, позволяющая составить компьютерную модель диагностирования технического состояния СЭУ. Предлагаемая в статье численная оценка состояния СЭУ получена методом системного синтеза. Данный метод реализован путем «свертки» на каждом иерархическом уровне численных значений оценок технического состояния структурных частей подсистемы более низкого уровня. Для решения данной задачи применена мультипликативная стратегия свертки частных показателей. Рассматриваемый метод позволил представить целевую функ-

цию в виде произведения частных показателей. Вес каждого критерия ранжирован с помощью весовых коэффициентов, представленных в виде показателей степени частных критериев. По результатам опроса экспертов определялись ранжированные показатели технического состояния всех выделенных (учитываемых) элементов СЭУ. В работе получена математическая модель оценки показателя технического состояния СЭУ, реализованная в виде компьютерной программы. Разработанная компьютерная модель диагностирования позволяет получить численную оценку технического состояния элементов СЭУ и СЭУ в целом, установить годное или негодное техническое состояние соответствующего элемента СЭУ, а также проанализировать динамику изменения состояния этих элементов во времени для выявления предпосылок и условий, следствием которых может быть потенциальный отказ. Показано, что знание закономерностей изменения технического состояния имеет большое практическое значение, поскольку позволяет определять не только оптимальные сроки технического обслуживания и ремонта, но и использовать их в деятельности организаций по классификации судов.

Ключевые слова: компьютерная модель, техническая диагностика, показатели технического состояния, судовая энергетическая установка, системный анализ.

Для цитирования:

Соловьев А. В. Принципы формирования компьютерной модели диагностирования технического состояния судовой энергетической установки / А. В. Соловьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 238–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-238-251.

Введение (Introduction)

В настоящее время изготовитель снабжает каждый ответственный элемент СЭУ автоматической системой параметрического диагностирования. Основной целью разработки и внедрения таких систем является повышение эксплуатационной надежности контролируемого оборудования, в связи с чем одним из важных компонентов теоретической базы разработчиков диагностического обеспечения являются сведения из теории надежности, теории вероятностей, математической статистики и, разумеется, теории рабочих процессов конкретного оборудования. Вместе с тем основной задачей, которую необходимо решать для достижения поставленной цели, является распознавание состояния технической системы, на это указывает и гносеология самого термина «диагностика» (от греч. — *diagnosis* — распознавание, определение). Непосредственно процесс оценки состояния технического объекта предполагает измерение параметров как в процессе эксплуатации, так и при выполнении экспериментальных исследований объектов и диагностических приборов, проведение которых не может быть организовано без учета теории измерений, метрологии, планирования экспериментов и обработки числовых данных.

Методы и материалы (Methods and materials)

Одной из важных предпосылок обеспечения технической безопасности плавания является техническая диагностика судовых дизелей (главных и вспомогательных) и других элементов СЭУ в процессе их эксплуатации. Анализ литературных источников [1] – [3] позволяет сделать вывод о том, что установка специализированных диагностических комплексов осуществлялась только для двигателей внутреннего сгорания (ДВС) достаточно высокой мощности, применяемых на морских судах, в то время как на речных и смешанных судах (*река – море*) такие системы не были использованы. Техническая диагностика на судах с классом Речного Регистра сводится к снятию индикаторных диаграмм, теплотехническому контролю и затем ручной обработке полученных результатов судовыми механиками или теплотехническими партиями. Однако современное положение дел на внутреннем водном транспорте требует пересмотра подходов в области безразборной технической диагностики, а именно в ее автоматизации.

Решение задачи технической диагностики судовых двигателей, а следовательно, и других, менее сложных элементов СЭУ речных судов становится возможным, поскольку современные электронные системы управления [4] – [6] позволяют осуществлять непрерывный мониторинг технических параметров, т. е. сбор и обработку информации, полученной от датчиков регулируемых величин и процессов. В этой связи задача установки специализированных диагностических

комплексов становится неактуальной, так как информация, полученная от электронных систем управления двигателем и другими элементами СЭУ, может обрабатываться центральным компьютером управления или компьютером машинного отделения в целях управления и диагностирования всей СЭУ [7] – [8], а не только ее отдельных элементов. При этом основной задачей технической диагностики становится разработка компьютерной модели диагностирования технического состояния СЭУ.

Любой элемент СЭУ можно рассматривать как техническую систему, представляющую упорядоченную совокупность некоторого количества совместно действующих элементов (агрегатов, узлов, деталей) и предназначенную для выполнения заданных функций [9], [10]. Каждая техническая система характеризуется вполне определенными структурой и способом функционирования. Под структурой системы подразумевают характер взаимосвязи и взаимодействия элементов системы, который определяется их геометрическими размерами, механическими, тепловыми, электрическими и другими параметрами. Числовые значения этих величин X_1, X_2, \dots, X_n достаточно полно характеризуют техническое состояние, работоспособность и качество функционирования любого технического средства, механизма в данный момент времени.

В процессе эксплуатации параметры технического состояния изменяются от паспортных значений $X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nn}$ до предельных $X_{n1}, X_{n2}, \dots, X_{nn}$, которые, как правило, обоснованы технико-экономической целесообразностью дальнейшей эксплуатации объекта. Разность между текущими и паспортными значениями параметров $\Delta X_{ii} = X_{ni} - X_{ii}$ характеризует степень отклонения значений параметров технического состояния объекта от норматива. Техническое состояние и работоспособность сложных объектов, каким, например, является ДВС, характеризуется набором параметров. Далее под техническим состоянием любого элемента СЭУ будем понимать уровень его работоспособности, исправности и соответствия требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Техническое состояние $TC_i(t)$ i -го элемента СЭУ в момент некоторой наработки t является функцией следующих параметров:

- начального технического состояния X_{ni} , обусловленного особенностями конструкции, качеством материалов и изготовления объекта;
- условий эксплуатации, характеризуемых параметрами Z_i ;
- закономерности изменения технического состояния F_i , которая формируется в зависимости от характера протекания процессов изнашивания и разрушения основных деталей, узлов и зависит от сложности конструкции, условий эксплуатации и качества сборки.

Тогда техническое состояние элемента СЭУ можно описать функционалом $TC_i(t) = f(X_{ni}, Z_i, F_i, t)$.

Характер изменения параметров технического состояния элементов СЭУ должен быть учтен при организации их эксплуатации. Знание закономерностей изменения этих параметров имеет большое практическое значение, поскольку позволяет определять не только оптимальные сроки технического обслуживания и ремонта, но и возможность их использования в классификационной деятельности организации для определения годного или негодного технического состояния элементов СЭУ.

В соответствии с требованиями системного анализа с целью наиболее достоверного описания системы (в данном случае — СЭУ с точки зрения её технического состояния) система условно «расчленяется» на подсистемы (составные части) различных иерархических уровней, причем чем ниже иерархический уровень подсистемы, тем проще входящие в него структурные части, и наоборот. Принятое в работе разбиение на подсистемы представлено на на схеме рис. 1, которая не включает отдельные элементы СЭУ (например, теплообменные аппараты и сосуды под давлением, холодильные установки, бытовые нагревательные установки, системы автоматизации и др.). Судовые системы (СС) и электроэнергетическая установка (ЭЭУ) формально не являются элементами СЭУ, однако автор посчитал необходимым включить в структурную схему основные элементы СС и ЭЭУ, техническое состояние которых, как показывает опыт, представляется важным для анализа техниче-

ского состояния СЭУ. Этим, в частности, объясняется отсутствие в числе анализируемых объектов электрических машин и приводов, аккумуляторов и других важных элементов ЭЭУ.

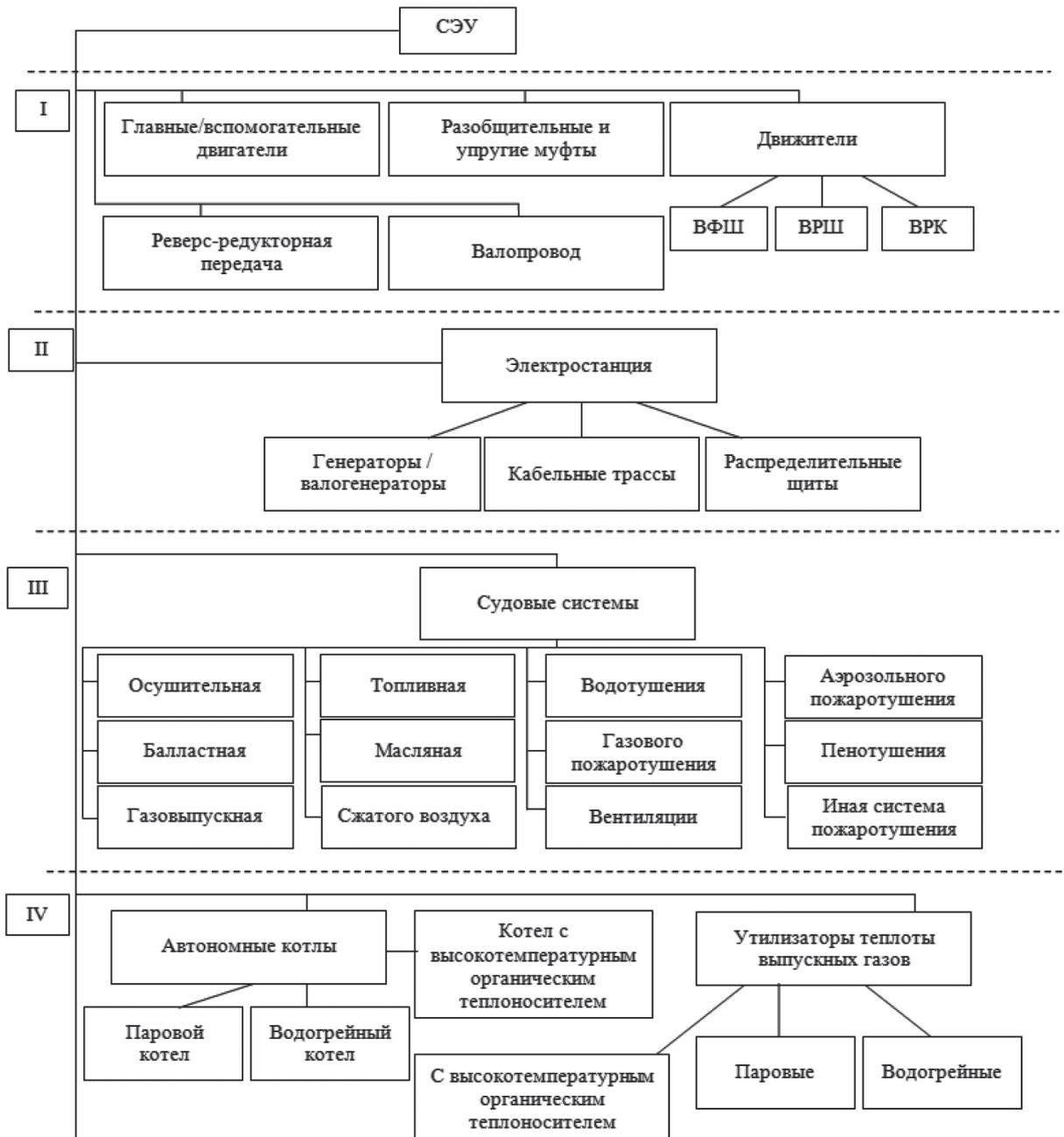


Рис. 1. Структурная схема СЭУ с ранжированием ее элементов по уровням I – IV

Техническое состояние СЭУ (численная оценка рассматриваемого свойства СЭУ) устанавливается методом системного синтеза, который в данном случае может быть реализован путем «свертки» на каждом иерархическом уровне численных значений оценок технического состояния, называемых в дальнейшем *уровнями оценок, структурных частей подсистемы более низкого иерархического уровня.*

Компьютерная модель диагностирования элементов СЭУ должна включать в себя построения, конечной целью которых является формирование следующих показателей (критериев) технического состояния:

$$TC_{ДВС}, TC_{РРП}, TC_M, TC_{ПВ}, TC_{ДВЖ}, TC_{ЭЭУ}, TC_{СС}, TC_{АК}, TC_{УК},$$

где $ТС_{двс}$ — показатель технического состояния ДВС; $ТС_{ррп}$ — показатель технического состояния реверс-редукторной передачи (РРП); $ТС_{м}$ — показатель технического состояния муфт между двигателем и редуктором и муфт валопровода (М); $ТС_{пв}$ — показатель технического состояния валопровода (для целей настоящей работы техническое состояние валопровода оценивается по техническому состоянию его подшипников (ПВ)); $ТС_{двж}$ — показатель технического состояния движителей (ДВЖ); $ТС_{эу}$ — показатель технического состояния электроэнергетической установки (ЭУ); $ТС_{сс}$ — показатель технического состояния судовых систем (СС); $ТС_{ак}$ — показатель технического состояния автономных котлов (АК); $ТС_{ук}$ — показатель технического состояния утилизаторов теплоты выпускных газов (УК).

Каждый показатель представляется в виде функции частных показателей технического состояния подсистем элемента. В соответствии с требованиями Речного Регистра — организации по классификации судов внутреннего и смешанного плавания — негодное техническое состояние любого элемента СЭУ означает негодное состояние всей СЭУ. Однако для прогнозирования технического состояния важна количественная оценка технического состояния СЭУ в целом.

Каждый частный показатель технического состояния зависит от группы параметров, т. е. от определенного числа критериев. В этой связи в статье рассматривается задача многокритериального анализа, одним из способов решения которой является сведение множества критериев к одному (свертка критериев). Поскольку все параметры, от которых зависят частные показатели технического состояния, имеют определенную важность (вес), целесообразно воспользоваться сверткой, учитывающей эту важность. Для решения данной задачи воспользуемся мультипликативной стратегией свертки частных показателей, в результате использования которой целевая функция представляется произведением частных критериев, вес каждого из которых ранжирован с помощью весовых коэффициентов, представляемых в виде показателей степени частных критериев. Ясно, что чем больше весовой показатель, тем большая важность придается критерию. Использование мультипликативной свертки объясняется ее высокой чувствительностью к значениям частных показателей (низкие значения хотя бы одного частного критерия влекут резкое снижение целевой функции). Это обстоятельство признано экспертным сообществом чрезвычайно важным для системного описания технического состояния элементов СЭУ. Так, обобщенный показатель технического состояния ДВС представлен в виде

$$ТС_{двс} = ЧП_{ЭП}^{b_1} \cdot ЧП_{РП}^{b_2} \cdot ЧП_{СТ}^{b_3} \cdot ЧП_{ЦПГ}^{b_4} \cdot ЧП_{КВ}^{b_5} \cdot ЧП_{ССО}^{b_6} \cdot ЧП_{СУ}^{b_7} \cdot ЧП_{ТН}^{b_8} \cdot ЧП_{ЭК}^{b_9} \quad (1)$$

где $b_1 \dots b_9$ — весовые коэффициенты, учитывающие влияние частных показателей ЧП на обобщенный показатель $ТС_{двс}$ (их весомость); ЧП — частные показатели технического состояния ДВС по эффективным показателям (ЭП), рабочему процессу (РП), системе топливоподачи (СТ), цилиндро-поршневой группе (ЦПГ), коленчатому валу (КВ), системам смазывания и охлаждения (ССО), системе управления (СУ), турбоагнетателю (ТН), экологическим характеристикам (ЭК).

Шкалирование контролируемых параметров осуществлялось по результатам обработки данных, полученных в результате опроса экспертов. На оси абсцисс всех графиков шкалирования откладывалось отношение значения параметра к его нормированному значению, которое выбиралось либо в соответствии с нормами, указанными в нормативных документах (например, в Правилах Российского Речного Регистра) либо согласно указаниям технической документации на элементы СЭУ.

По оси ординат всех графиков шкалирования откладывались шкалированные значения параметров в диапазоне от нуля до значений больше единицы. Значению 1,0 на оси абсцисс на всех графиках соответствует шкалированное значение 1,0 — требуемое значение шкалированного показателя на номинальном режиме работы элемента СЭУ, соответствующее годному техническому состоянию. Шкалированное значение параметра больше единицы соответствует благоприятным для элемента СЭУ условиям работы при годном его состоянии, шкалированное значение параметра меньше единицы соответствует ухудшению условий работы элемента, что и отражает шкалированное значение данного показателя технического состояния. Стремление шкалированного

значения показателя к нулю символизирует ухудшение технического состояния элемента СЭУ вплоть до негодного технического состояния и отказа.

По результатам опроса экспертов определялись ранжированные показатели технического состояния всех выделенных (учитываемых) элементов СЭУ. В качестве примера приведем описание показателя ТС технического состояния ЭЭУ, представленного в виде функции

$$TC_{ЭЭУ} = ЧП_{\Gamma}^{b_{13}} \cdot ЧП_{К}^{b_{14}} \cdot ЧП_{РЩ}^{b_{15}}$$

где ЧП_Г, ЧП_К, ЧП_{РЩ} — частные показатели технического состояния ЭЭУ, соответственно, генераторов/валогенераторов (Г), кабельных трасс (К), распределительных щитов (РЩ); $b_{13} \dots b_{15}$ — весовые коэффициенты, учитывающие влияние ЧП на обобщенный показатель $TC_{ЭЭУ}$.

Частные показатели представлены в виде функций:

$$ЧП_{\Gamma} = X_{52}^{a_{52}} \cdot X_{53}^{a_{53}} \cdot X_{54}^{a_{54}} \cdot X_{55}^{a_{55}} \cdot X_{56}^{a_{56}} \cdot X_{57}^{a_{57}} \cdot X_{58}^{a_{58}};$$

$$ЧП_{К} = X_{59}^{a_{59}};$$

$$ЧП_{РЩ} = X_{60}^{a_{60}} \cdot X_{61}^{a_{61}},$$

где $X_{52} \dots X_{61}$ — шкалированные значения показателей технического состояния ЭЭУ, являющихся функцией контролируемых параметров соответственно; $a_{52} \dots a_{61}$ — весовые коэффициенты, учитывающие влияние контролируемых параметров на частные показатели технического состояния ЭЭУ.

Шкалирование контролируемых параметров осуществлялось по результатам обработки данных опроса экспертов. Результаты опросов экспертов с ранжированием показателей технического состояния сведены в табл. 1.

Графики шкалирования аппроксимированы следующими уравнениями для определения показателей технического состояния $X_{52} \dots X_{61}$:

$$X_{52} = 1 - 100 \cdot (Z - 1)^2; X_{53} = Z^{-16}; X_{54} = 1 - 100 \cdot (Z - 1)^2; \begin{cases} X_{55} = -0,5 \cdot Z^3 + 1,5 [0; 1]; \\ X_{55} = Z^{-2} (1; \infty). \end{cases}$$

Таблица 1

Ранжированные показатели технического состояния ЭЭУ

ЧП	Контролируемый параметр	Обозначение	Шкалированный показатель ТС в порядке важности для каждого ЧП	Отношение X_i/X_{i+1}	a_i	Отношение ЧП по уровням	b_i
1. ЧП _Г	Напряжение U_p , В	x_{52}	X_{52}	$X_{52}/X_{53}=1,00$	$a_{52} = 0,163820$	ЧП _Г /ЧП _К =1,20	$b_{13}=0,395605$
	Ток I_p , А	x_{53}	X_{53}	$X_{53}/X_{54}=1,00$	$a_{53} = 0,163820$		
	Частота тока ν_p , Гц	x_{54}	X_{54}	$X_{54}/X_{55}=1,00$	$a_{54} = 0,163820$		
	Сопротивление изоляции ω_{ip} , МОм	x_{55}	X_{55}	$X_{55}/X_{56}=1,30$	$a_{55} = 0,163820$		
	Температура $t_{ст0i}$ статорной обмотки, °С	x_{56}	X_{56}	$X_{56}/X_{57}=1,10$	$a_{56} = 0,126015$		
	Температура $t_{прi}$ подшипников, °С	x_{57}	X_{57}	$X_{57}/X_{58}=1,10$	$a_{57} = 0,114560$		
	Вибрация (виброскорость $\nu_{генi}$ мм/с) генератора	x_{58}	X_{58}		$a_{58} = 0,104145$		
2. ЧП _К	Сопротивление изоляции $\omega_{ктi}$, МОм	x_{59}	X_{59}		$a_{59} = 1,000000$	ЧП _К /ЧП _{РЩ} =1,20	$b_{14} = 0,329670$

Таблица 1
(Окончание)

3. ЧП _{РЩ}	Равномерность распределения активной и реактивной нагрузки параллельно работающим генераторов	x_{60}	X_{60}	$X_{60}/X_{61}=1,26$	$a_{60} = 0,557522$	$b_{15} = 0,274725$
	Правильное функционирование автоматики	x_{61}	X_{61}		$a_{61} = 0,442478$	

$$X_{56} = Z^{-16}; X_{57} = Z^{-16}; X_{58} = Z^{-4}; \begin{cases} X_{59} = -0,5 \cdot Z^3 + 1,5[0;1]; \\ X_{59} = Z^{-2}(1;\infty); \end{cases} \begin{cases} X_{60} = 0 \text{ при } Z=[0;1]; \\ X_{60} = 1 \text{ при } Z=(1;\infty); \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_{61} = 0 \text{ при } Z=[0;1]; \\ X_{61} = 1 \text{ при } Z=(1;\infty); \end{cases}$$

где Z — отношение соответствующего контролируемого параметра к номинальному значению, а для X_{55}, X_{59} — к установленным Правилами Российского Речного Регистра нормам.

Результаты (Results)

Полученные зависимости ориентированы на использование в компьютерной модели диагностирования технического состояния СЭУ, которая должна включать в себя количественные модели определения технического состояния всех принятых к рассмотрению в настоящем исследовании элементов СЭУ. Таким образом, компьютерная модель диагностирования технического состояния СЭУ должна включать в себя модели для определения частных показателей технического состояния $TC_{ДВС}$, $TC_{РРП}$, TC_M , $TC_{ПВ}$, $TC_{ДВЖ}$, $TC_{ЭЭУ}$, $TC_{СС}$, $TC_{АК}$, $TC_{УК}$. Тогда численная оценка технического состояния СЭУ может быть определена с помощью следующей модели:

$$TC_{СЭУ} = TC_{ДВС}^{c_1} \cdot TC_{РРП}^{c_2} \cdot TC_M^{c_3} \cdot TC_{ПВ}^{c_4} \cdot TC_{ДВЖ}^{c_5} \cdot TC_{ЭЭУ}^{c_6} \cdot TC_{СС}^{c_7} \cdot TC_{АК}^{c_8} \cdot TC_{УК}^{c_9} \quad (2)$$

где $TC_{СЭУ}$ — обобщенный количественный показатель технического состояния СЭУ; $c_1 \dots c_9$ — весовые коэффициенты, учитывающие влияние технического состояния элементов СЭУ на обобщенный показатель. Эти коэффициенты получены по методике, аналогичной описанной выше.

Ранжирование выполнено с учетом принятой в работе структурной схемы СЭУ с разбиением на подсистемы. Обработанные результаты опросов экспертов с ранжированием показателей технического состояния после их стандартной обработки сведены в табл. 2.

Подставляя в уравнение (2) весовые коэффициенты из табл. 2, получим количественную модель определения технического состояния СЭУ в следующем виде:

$$TC_{СЭУ} = TC_{ДВС}^{0,157795} \cdot TC_{РРП}^{0,143451} \cdot TC_M^{0,136606} \cdot TC_{ПВ}^{0,136606} \cdot TC_{ДВЖ}^{0,136606} \cdot TC_{ЭЭУ}^{0,10449} \cdot TC_{СС}^{0,089273} \cdot TC_{АК}^{0,055107} \cdot 107 TC_{УК}^{0,055107} \quad (3)$$

Таблица 2

Ранжированные показатели технического состояния элементов СЭУ

Обобщенный показатель технического состояния СЭУ	Показатели технического состояния элементов СЭУ	Отношение показателей ТС по уровням	c_i
$TC_{СЭУ}$	$TC_{ДВС}$	$TC_{ДВС}/TC_{РРП} = 1,10$	$c_1 = 0,157795$
	$TC_{РРП}$	$TC_{РРП}/TC_M = 1,09$	$c_2 = 0,143451$
	TC_M	$TC_M/TC_{ПВ} = 1,00$	$c_3 = 0,136606$

Таблица 2
(Окончание)

$ТС_{СЭУ}$	$ТС_{ПВ}$	$ТС_{ПВ}/ТС_{ДВЖ} = 1,00$	$c_4 = 0,136606$
	$ТС_{ДВЖ}$	$ТС_{ДВЖ}/ТС_{ЭЭУ} = 1,26$	$c_5 = 0,136606$
	$ТС_{ЭЭУ}$	$ТС_{ЭЭУ}/ТС_{СС} = 1,17$	$c_6 = 0,104449$
	$ТС_{СС}$	$ТС_{СС}/ТС_{АК} = 1,62$	$c_7 = 0,089273$
	$ТС_{АК}$	$ТС_{АК}/ТС_{УК} = 1,00$	$c_8 = 0,055107$
	$ТС_{УК}$		$c_9 = 0,055107$

Все уравнения для расчета частных показателей, необходимых для определения показателей технического состояния элементов СЭУ: $ТС_{ДВС}$, $ТС_{РРП}$, $ТС_{М}$, $ТС_{ПВ}$, $ТС_{ДВЖ}$, $ТС_{ЭЭУ}$, $ТС_{СС}$, $ТС_{АК}$, $ТС_{УК}$, сами модели элементов СЭУ («свертки» частных показателей) и модель определения технического состояния СЭУ (3) образовали математическую модель определения показателя технического состояния СЭУ, реализованную в виде компьютерной программы для MS Excel.

Выбор платформы объясняется тем, что записанные в MS Excel программные коды на языке Visual Basic вместе с возможностями самой среды позволяют получить программный продукт, весьма удобный для проведения численных исследований тем, что он позволяет мгновенно получать результат (значения частных показателей, показателей технического состояния элементов СЭУ и СЭУ в целом) при изменении значения любого из контролируемых параметров без дополнительного управления программой. Это свойство электронных таблиц MS Excel дает возможность считать разработанную компьютерную модель калькулятором технического состояния элементов СЭУ и СЭУ в целом (далее — калькулятор). Выходные формы результатов вычисления $ТС_{ДВС}$ и $ТС_{СЭУ}$ с помощью калькулятора в виде электронных таблиц представлены на рис. 2 и 3.

c_1	0,157796	ТСдвс	0,794569	ТСсэу	0,964365
c_2	0,143451	ТСррп	1		
c_3	0,131606	ТСм	1		
c_4	0,131606	ТСпв	1		
c_5	0,131606	ТСдвж	1		
c_6	0,104449	ТСээу	1		
c_7	0,089273	ТСсс	1		
c_8	0,055107	ТСак	1		
c_9	0,055107	ТСук	1		

Рис. 2. Пример выходной формы результатов расчета $ТС_{СЭУ}$ с помощью разработанного калькулятора

Необходимо отметить, что в соответствии с требованиями Правил Российского Речного Регистра негодное техническое состояние любого элемента СЭУ означает негодное техническое состояние всей СЭУ. Это позволяет разделить процедуру определения технического состояния элементов СЭУ и СЭУ в целом на две независимые части. Одна часть рассматриваемой процедуры имеет целью определение состояния «годен – не годен» с указанием негодного элемента и его параметров. Эта часть является важным инструментом эксперта Речного Регистра при освидетельствовании судов, так как позволяет на несколько порядков сократить время, затрачиваемое на освидетельствование, при значительном увеличении качества проверок. Для правильного функционирования этой части процедуры определения технического состояния элементов СЭУ и СЭУ в целом необходимо установить «браковочные» значения ТС каждого элемента СЭУ, т. е. значения ТС, соответствующие выходу хотя бы одного параметра за границы диапазона допускаемых значений. «Браковочные» значения показателей «зашиваются» в компьютерную модель диагностирования СЭУ (калькулятор является только частью этой модели), благодаря чему эта модель устанавливает годное или негодное техническое состояние соответствующего элемента СЭУ.

a_1	0,333333	X_1	0,75933	Z_1	0,989	ЧП _н	0,79547
a_2	0,333333	X_2	0,72845	Z_2	1,02		
a_3	0,333333	X_3	0,91	Z_3	1,015		
a_4	0,206896	X_4	0,94652	Z_4	0,99	ЧП _{рн}	0,8416
a_5	0,206896	X_5	0,94652	Z_5	0,99		
a_6	0,206896	X_6	0,80103	Z_6	0,98		
a_7	0,206896	X_7	0,72845	Z_7	1,02		
a_8	0,172414	X_8	0,80103	Z_8	0,98		
a_9	0,221476	X_9	0,94652	Z_9	0,99	ЧП _{ср}	0,92152
a_{10}	0,221476	X_{10}	1	Z_{10}	1		
a_{11}	0,221476	X_{11}	0,84	Z_{11}	1,02		
a_{12}	0,201342	X_{12}	0,9216	Z_{12}	1,014		
a_{13}	0,134228	X_{13}	0,8976	Z_{13}	1,016		
a_{14}	0,423076	X_{14}	0,8236	Z_{14}	1,021	ЧП _{цнр}	0,54069
a_{15}	0,384615	X_{15}	0,29189	Z_{15}	1,08		
a_{16}	0,192308	X_{16}	0,73503	Z_{16}	1,08		
a_{17}	0,5	X_{17}	0,88849	Z_{17}	1,03	ЧП _{кв}	0,8045
a_{18}	0,5	X_{18}	0,72845	Z_{18}	1,02		
a_{19}	0,195548	X_{19}	0,8704	Z_{19}	1,018	ЧП _{ссо}	0,88341
a_{20}	0,16129	X_{20}	0,95991	Z_{20}	0,96		
a_{21}	0,16129	X_{21}	0,83205	Z_{21}	1,05		
a_{22}	0,16129	X_{22}	0,99976	Z_{22}	0,99		
a_{23}	0,16129	X_{23}	0,88314	Z_{23}	0,93		
a_{24}	0,16129	X_{24}	0,77798	Z_{24}	0,99		
a_{25}	0,3	X_{25}	0,8227	Z_{25}	1,05	ЧП _{су}	0,85586
a_{26}	0,3	X_{26}	0,98025	Z_{26}	1,005		
a_{27}	0,2	X_{27}	0,88849	Z_{27}	1,03		
a_{28}	0,2	X_{28}	0,71365	Z_{28}	1,088		
a_{29}	0,230769	X_{29}	0,77798	Z_{29}	0,99	ЧП _{тн}	0,76517
a_{30}	0,192307	X_{30}	0,78941	Z_{30}	1,03		
a_{31}	0,192307	X_{31}	0,71103	Z_{31}	1,089		
a_{32}	0,192307	X_{32}	0,75933	Z_{32}	0,989		
a_{33}	0,192307	X_{33}	0,7884	Z_{33}	1,023		
a_{34}	0,393939	X_{34}	0,92991	Z_{34}	1,037		
a_{35}	0,30303	X_{35}	0,82645	Z_{35}	1,1		
a_{36}	0,30303	X_{36}	0,81162	Z_{36}	1,11		

Рис. 3. Пример выходной формы расчета $ТС_{ДВС}$ с помощью разработанного калькулятора

Цель другой части процедуры определения технического состояния рассматриваемых элементов состоит в получении значений показателей ТС элементов СЭУ для проведения анализа динамики изменения технического состояния этих элементов во времени и выявления предпосылок и условий, следствием которых может быть потенциальный отказ. Это и компьютерное моделирование всевозможных эксплуатационных ситуаций, и прогнозирование развития неисправностей элементов СЭУ во времени вплоть до отказа в границах установленных «браковочных» значений. Последнее возможно по мере накопления данных обследований во времени.

Для определения «браковочного» значения технического состояния ДВС проводилось моделирование с помощью калькулятора путем последовательного изменения значений контролируемых параметров на границах диапазона допускаемых значений, при этом значение одного из параметров принималось на границе указанного диапазона, а остальные принимались с номинальными (паспортными) годными значениями. Результаты моделирования ситуаций изменения контролируемых параметров до своих предельных значений для определения «браковочного» значения технического состояния ДВС сведены в табл. 3. Границы диапазона допускаемых значений приняты с учетом установленных производителями ДВС и правилами Правил Российского Речного Регистра норм. В таблицу внесены наибольшие из рассчитанных «браковочных» значений ЧП и соответствующее им значение $ТС_{ДВС}$.

Таблица 3

Результаты моделирования «браковочных» значений технического состояния ДВС

Значение «браковочного» ЧП	ЧП _{ЭП}	0,558716	1	1	1	1	1	1	1	1
	ЧП _{РП}	1	0,578837	1	1	1	1	1	1	1
	ЧП _{СТ}	1	1	0,556959	1	1	1	1	1	1
	ЧП _{ЦПГ}	1	1	1	0,423131	1	1	1	1	1
	ЧП _{КВ}	1	1	1	1	0,466507	1	1	1	1
	ЧП _{ССО}	1	1	1	1	1	0,418357	1	1	1
	ЧП _{СУ}	1	1	1	1	1	1	0,435275	1	1
	ЧП _{ТН}	1	1	1	1	1	1	1	0,418479	1
	ЧП _{ЭК}	1	1	1	1	1	1	1	1	0,420811
Значение «браковочного» ТС _{ДВС}	0,919036	0,935006	0,930588	0,89968	0,910537	0,909565	0,924968	0,921561	0,943673	
Наибольшее значение «браковочного» ТС _{ДВС}	0,943673									

Моделирование показало, что частные показатели, входящие в ТС_{ДВС}, имеют высокую чувствительность к отклонению контролируемых параметров. Например, при снижении максимального давления цикла p_{max} на 10 % (предельное значение) шкалированное значение контролируемого параметра снижается до 0,071179, а значение ЧП_{РП} становится равным 0,578837 (данное значение получено при отклонении только одного из контролируемых показателей до своего предельного значения). При этом ТС_{ДВС} = 0,935006, т. е. произошло его снижение на 7 %. Необходимо учитывать, что моделирование проведено при отклонении от номинального значения всего лишь одного из 36 контролируемых параметров, а поскольку многие параметры взаимосвязаны (например, давление наддува и частота вращения ротора турбонагнетателя, давление впрыскивания топлива и максимальное давление цикла и т. п.), обобщенный показатель технического состояния ТС_{ДВС} будет еще более чувствителен к возникающим отклонениям в работе. Разработанная компьютерная модель определения технического состояния позволяет осуществлять контроль протекающих процессов в подсистемах ДВС с целью получения упреждающей информации о возможном отклонении показателей процессов от заданных значений в связи с появлением неисправности в какой-либо подсистеме ДВС.

В соответствии с алгоритмом моделирования компьютерная модель диагностирования СЭУ (эта модель включает в себя и калькулятор) производит сравнение текущего значения ТС_{ДВС} с «браковочным» значением, «защитым» в модель. При достижении ТС_{ДВС} «браковочного» значения анализируются ЧП и в случае, если любой из текущих ЧП становится меньше соответствующего «браковочного» значения из табл. 3 или равным ему, компьютерной моделью устанавливается негодное техническое состояние соответствующего ДВС и, соответственно, всей СЭУ.

На рис. 4 представлены функции $ТС_{ДВС} = f(ЧП_{ЭП}, ЧП_{РП}, ЧП_{СТ}, ЧП_{ЦПГ}, ЧП_{КВ}, ЧП_{ССО}, ЧП_{СУ}, ЧП_{ТН}, ЧП_{ЭК})$ для «браковочных», паспортных (номинальных) и текущих значений ЧП. Обобщенный технический показатель ТС_{ДВС} будет пропорционален площади под кривой, полученной путем соединения точек, характеризующих значения ЧП. Данное свойство можно использовать для отслеживания динамики изменения ТС_{ДВС} и прогнозирования приближения предельного технического состояния ДВС, при котором для ДВС устанавливается негодное техническое состояние. При достижении всех ЧП «браковочных» значений ТС_{ДВС} = 0,479287, т. е. ДВС имеет годное техническое состояние при значении каждого ЧП выше «браковочного» и ТС_{ДВС} > 0,479287.

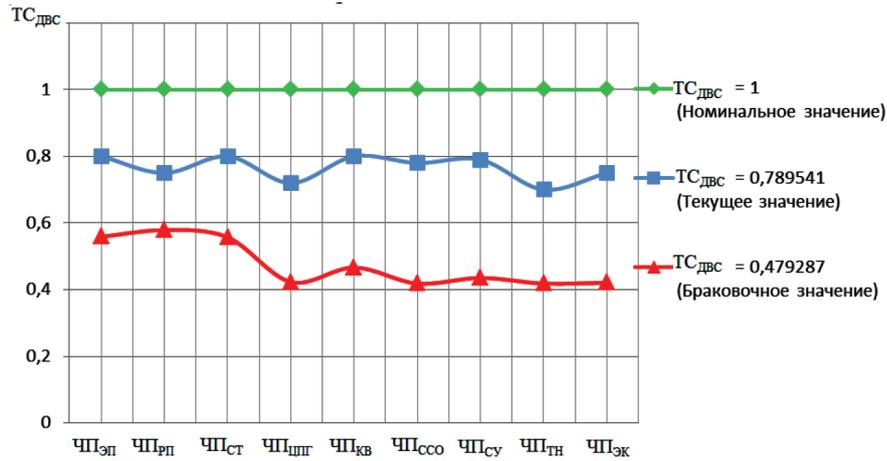


Рис. 4. Функции $TC_{ДВС} = f(ЧП_{ЭП}, ЧП_{РП}, ЧП_{СТ}, ЧП_{ЦПГ}, ЧП_{КВ}, ЧП_{ССО}, ЧП_{СУ}, ЧП_{ТН}, ЧП_{ЭК})$ для «браковочных», паспортных (номинальных) и текущих значений ЧП

Отметим, что значение $TC_{ДВС}$ рассчитывается компьютерной моделью диагностирования для каждого ДВС, при этом в расчет включаются (учитываются) наиболее «худшие» значения контролируемых параметров. Так, например, если двигатель имеет шесть цилиндров, то в расчет $TC_{ДВС}$ попадут наиболее низкие шкалированные значения контролируемых параметров, полученные для любого из шести цилиндров.

С помощью калькулятора технического состояния элементов СЭУ определены «браковочные» значения технического состояния всех выделенных элементов СЭУ, а также СЭУ в целом, что показано на рис. 5.

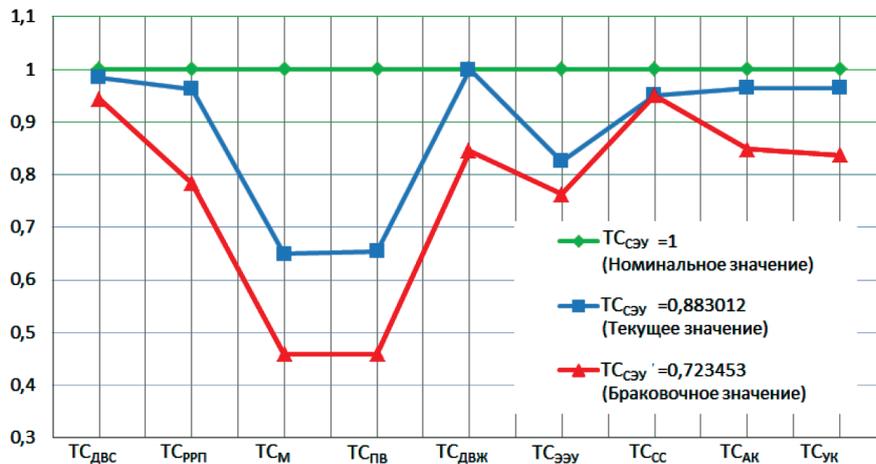


Рис. 5. Функции $TC_{СЭУ} = f(ТС_{ДВС}, ТС_{РРП}, ТС_{М}, ТС_{ПВ}, ТС_{ДВЖ}, ТС_{ЭЭУ}, ТС_{СС}, ТС_{АК}, ТС_{УК})$ для «браковочных», паспортных (номинальных) и текущих значений элементов СЭУ

На основании результатов проведенных предварительных исследований был разработан алгоритм функционирования компьютерной модели диагностирования технического состояния элементов СЭУ. Укороченная блок-схема алгоритма представлена на рис. 6. При функционировании блока анализа текущего технического состояния элементов СЭУ производится сравнение рассчитанных с помощью калькулятора значений ТС элементов СЭУ с «браковочными» и определяется состояние «годен – не годен» с указанием негодного элемента и его параметров.

Целью функционирования блока прогнозирования технического состояния элементов СЭУ является определение времени до достижения ТС i -го элемента СЭУ «браковочного» значения, т. е. прогнозирование продолжительности периода «годного» состояния.

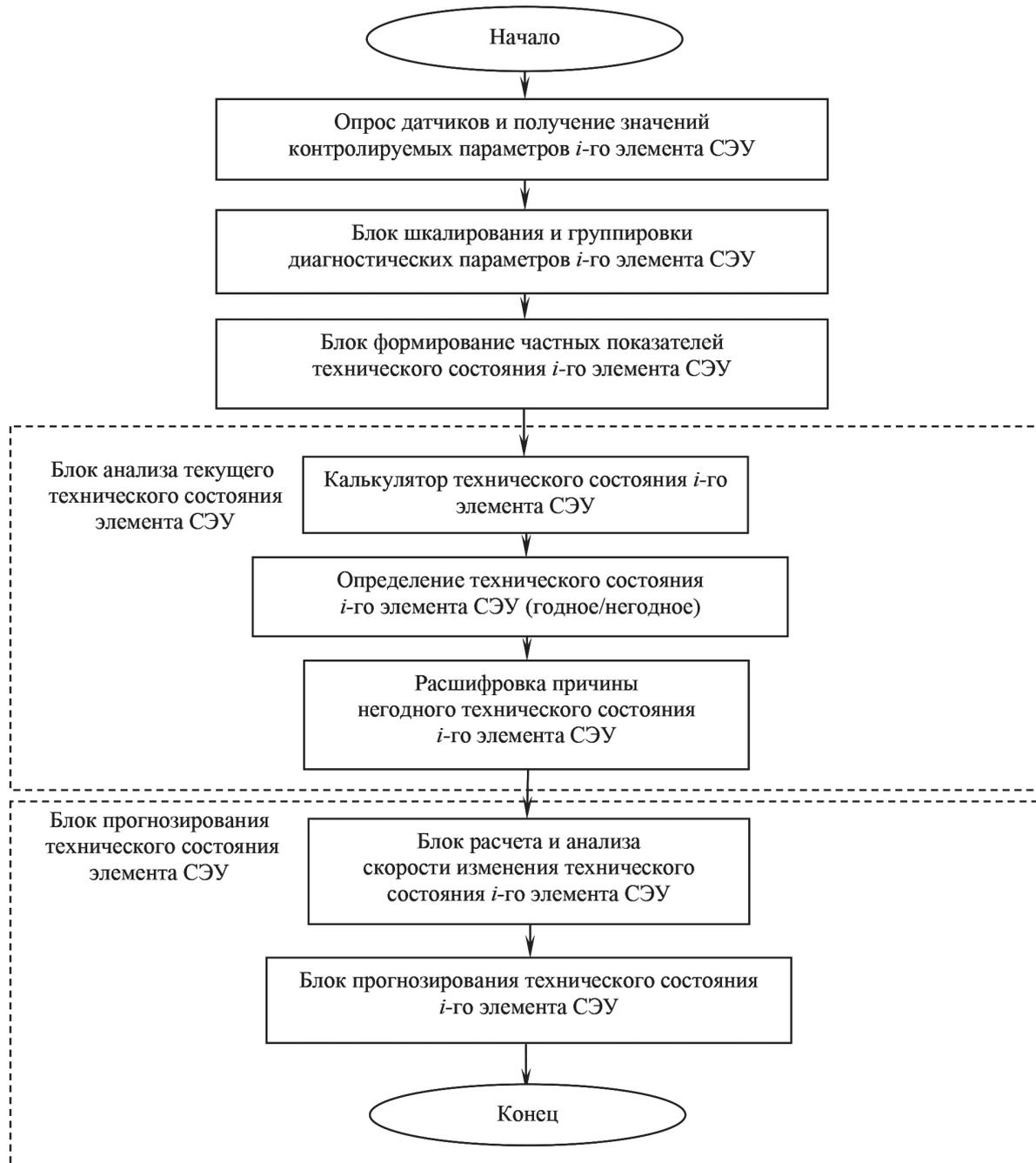


Рис. 6. Блок-схема алгоритма функционирования компьютерной модели диагностирования технического состояния элементов СЭУ

При невыполнении условия $TC_{i,n} > TC_{i,брак}$ ($TC_{i,n}$ — значение технического состояния i -го элемента СЭУ при текущем измерении, $TC_{i,брак}$ — значение «браковочного» TC i -го элемента) компьютерная модель диагностирования выведет информацию о достижении TC_i «браковочного» значения, и активируется подпрограмма анализа скорости изменения частных показателей i -го элемента СЭУ. Необходимо отметить, что анализ скорости изменения частных показателей является важным элементом процедуры прогнозирования, поскольку позволяет, во-первых, настроить модель прогнозирования или при более развитом алгоритме выбрать модель прогнозирования из заранее предусмотренного набора (экспоненциальное сглаживание, регрессионное оценивание, цепи Маркова, передаточные функции и т. д.), а во-вторых оценить, по какому из ЧП возможен отказ в границах установленных «браковочных» значений.

Заключение (Conclusion)

Разработанная компьютерная модель диагностирования позволяет получить численную оценку ТС элементов СЭУ и СЭУ в целом, установить годное или негодное техническое состояние соответствующего элемента СЭУ, а также проанализировать динамику изменения технического состояния этих элементов во времени для выявления предпосылок и условий, следствием которых может быть потенциальный отказ. Как отмечалось ранее, знание закономерностей изменения ТС имеет большое практическое значение, поскольку позволяет рассчитывать не только оптимальные сроки технического обслуживания и ремонта, но и возможность их использования в классификационной деятельности организации для определения годного или негодного технического состояния элементов СЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ивановский В. Г.* Мониторинг рабочего процесса судовых дизелей в эксплуатации / В. Г. Ивановский, Р. А. Варбанец // Всеукраинский научно-технический журнал. — 2004. — № 2. — С. 138–141.
2. *Епихин А. И.* Модуль диагностики двигателя внутреннего сгорания в системе поддержки принятия решений экипажем танкера-газовоза / А. И. Епихин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 4. — С. 31–39. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-4-31-39.
3. Характеристики систем диагностики судовой дизельной установки [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://vdvzhke.ru/sudovye-dizelnye-ustanovki/puskoreversivnye-sistemy-dvigatelja/harakteristika-sistem-diagnostiki-sudovoj-dizelnoj-ustanovki-v-sudovyh-dizeljah.html> (дата обращения: 15.12.2017).
4. *Лашко В. А.* Перспективы развития интеллектуальных поршневых ДВС / В. А. Лашко // Ученые заметки ТОГУ. — 2014. — Т. 5. — № 1. — С. 260–287.
5. *Елизаров И. А.* Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры: учеб. пособие / И. А. Елизаров, Ю. Ф. Мартемьянов, А. Г. Схиртладзе, С. В. Фролов. — М.: Машиностроение, 2004. — 180 с.
6. *Грошева Л. С.* Разработка комплексной системы контроля и управления на базе промышленных контроллеров FASTWEL / Л. С. Грошева, В. И. Мерзляков, С. И. Перевезенцев, В. И. Плющев // Современные технологии автоматизации. — 2015. — № 3. — С. 46–50.
7. *Соловьёв А. В.* Концепция единого целеориентированного управления судовой энергетической установкой / А. В. Соловьёв // Вестник Государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1027–1039. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1027-1039.
8. *Соловьёв А. В.* Принципы взаимодействия судоводителя с единой целеориентированной системой управления судовой энергетической установкой / А. В. Соловьёв // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2017. — № 53. — С. 42–47.
9. *Васильев Б. В.* Диагностирование технического состояния судовых дизелей / Б. В. Васильев, Д. И. Кофман, С. Г. Эренбург; под ред. Б. В. Васильева. — М.: Транспорт, 1982. — 144 с.
10. *Моек Е.* Техническая диагностика судовых машин и механизмов / Е. Моек, Х. Штрикерт; пер. с нем. Э. Б. Кублановой. — Л.: Судостроение, 1986. — 231 с.

REFERENCES

1. Ivanovskii, V.G., and R.A. Varbanets. "Monitoring rabocheho protsessha sudovykh dizelei v ekspluatatsii." *Vseukrainskii nauchno-tekhnicheskii zhurnal* 2 (2004): 138–141.
2. Epikhin, Alexey Ivanovich. "Module for diagnosis of the internal combustion engine in the decision support system by the crew of the tanker-gas carrier." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 4 (2017): 31–39. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-4-31-39.
3. Kharakteristiki sistem diagnostiki sudovoi dizel'noi ustanovki. Web. 15 Dec. 2017 <<http://vdvzhke.ru/sudovye-dizelnye-ustanovki/puskoreversivnye-sistemy-dvigatelja/harakteristika-sistem-diagnostiki-sudovoj-dizelnoj-ustanovki-v-sudovyh-dizeljah.html>>.

4. Lashko, V.A. "Prospects of development of intellectual of the piston internal combustion engine." *Uchenye zametki TOGU* 5.1 (2014): 260–287.

5. Elizarov, I.A., Yu.F. Martem'yanov, A.G. Skhirtladze, and S.V. Frolov. *Tekhnicheskie sredstva avtomatizatsii. Programmno-tekhnicheskie komplekсы i kontroллery: ucheb. posobie*. M.: Mashinostroenie, 2004.

6. Grosheva, L.S., V.I. Merzlyakov, S.I. Perevezentsev, and V.I. Plyushchaev. "Razrabotka kompleksnoi sistemy kontrolya i upravleniya na baze promyshlennykh kontroллerov FASTWEL." *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* 3 (2015): 46–50.

7. Soloviev, Alexey V. "The concept of a unified goal directed management of marine power plant." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 1027–1039. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1027-1039.

8. Solovyov, A.V. "Principles of interaction of the navigator with a unified target-oriented management system of marine power plant." *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta* 53 (2017): 42–47.

9. Vasil'ev, B.V., D.I. Kofman, and S. G. Erenburg. *Diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh dizelei*. Edited by B.V. Vasil'ev. M.: Transport, 1982.

10. Moek, E., and Kh. Shtrikert. *Tekhnicheskaya diagnostika sudovykh mashin i mekhanizmov*. L.: Sudostroenie, 1986.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Соловьёв Алексей Валерьевич —
кандидат технических наук,
заместитель директора
ФАУ «Российский Речной Регистр»
Верхне-Волжский филиал Российского Речного
Регистра
603001, Российская Федерация,
г. Нижний Новгород, ул. Рождественская, 38в
e-mail: solovev@rivregnn.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Soloviev, Alexey V. —
PhD, deputy director
The Federal Autonomous Institute
Russian River Register
Upper Volga Branch-Office
38v Rozhdestvenskaya Str.,
Nizhniy Novgorod, 603001,
Russian Federation
e-mail: solovev@rivregnn.ru

*Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.
Received: January 15, 2018.*