



МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ РАЗРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

^{1,2}Альт В.В., ^{1,3}Добролюбов И.П., ^{1,3}Савченко О.Ф., ^{1,2}Клименко Д.Н., ¹Елкин О.В.

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук
Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный аграрный университет
Новосибирск, Россия

Рассмотрены вопросы повышения эффективности применения измерительных экспертных систем (ИЭС), решающих задачи снижения потерь мощности автотракторных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в производственных условиях при изменении их технического состояния. ИЭС осуществляют оперативный контроль энергетических параметров машинно-тракторного парка для принятия своевременных ремонтно-обслуживающих воздействий. Предложен методологический подход для создания системы автоматизации разработки ИЭС, повышающей эффективность формирования ИЭС за счет имеющегося опыта в этой предметной области. Методическая основа исследований – динамический метод диагностирования ДВС. Данный метод использует тестовое динамическое воздействие на ДВС, наиболее целесообразный для оценки состояния тракторных ДВС в производственных условиях, а также компьютерное моделирование рабочих процессов ДВС с целью нахождения информативных диагностических показателей, характеризующих энергетические параметры. На основе предложенной целевой функции определено математическое обеспечение в виде модели, описывающей множество элементов системы, их признаков и состояний, а также связей между ними. Организовано информационное обеспечение, осуществляющее функции сбора, обработки и предоставления информации по запросам. Сформирована методика построения логической схемы алгоритма разработки ИЭС, формализующая процесс решения взаимосвязанных задач при синтезе различных структур технических и программных средств на основе совокупности математических моделей. На примере моделирования агрегата ДВС – рабочая машина оценено влияние варьирования входных параметров модели: крутящих моментов и моментов сопротивлений на диагностические параметры технического состояния – угловые скорости и ускорения. Применение компьютерного моделирования рабочих процессов ДВС с использованием данного методологического подхода позволило создать цифровую технологию и измерительную систему автоматизированного энергетического мониторинга тракторного парка сельхозпредприятия. Компьютерные структурные схемы моделей ДВС и ИЭС могут использоваться в диагностических комплексах. Это даст возможность повысить точность и достоверность определения состояния ДВС и агрегируемых с ним механизмов и рабочих машин, а также улучшить качество выполняемых ими работ.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, мощность, динамический метод диагностирования, моделирование рабочих процессов, цифровые технологии

METHODOLOGICAL BASIS FOR MEASURING EXPERT SYSTEMS AUTOMATION OF MOTOR AND TRACTOR ENGINES

^{1,2}Victor V. Alt, ^{1,3}Ivan P. Dobrolyubov, ^{1,3}Oleg F. Savchenko,

^{1,2}Denis N. Klimenko, ¹Oleg V. Elkin

¹*Siberian Federal Scientific Centre of AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences*
Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia

²*Novosibirsk State Technical University*
Novosibirsk, Russia

³*Novosibirsk State Agrarian University*
Novosibirsk, Russia

The paper considers issues of increasing the efficiency of application of measuring expert systems (MES) that solve the problem of reducing power losses of motor and tractor internal combustion engines (ICE) in production conditions due to changes in their technical condition. MES carry out operational control of the energy parameters of the machine and tractor fleet for taking timely repair and maintenance actions. A methodological approach is proposed for creating an automation system for the development of MES, which increases the efficiency of the formation of MES due to the existing expertise in this subject area. The methodological basis of research is a dynamic method for diagnosing ICE. This method uses a test dynamic effect on ICE, which is the most practical for assessing the state of tractor ICE in production conditions, as well as computer modeling of the ICE work processes in order to find informative diagnostic indicators characterizing energy parameters. On the basis of the proposed target function, the software was determined in the form of the model describing a variety of system elements, their features and states, as well as links between them. Information provision was organized, carrying out the functions of collecting, processing and providing information upon request. A method for constructing a logical scheme of the development algorithm MES was formed, which formalizes the process of solving interrelated problems in the synthesis of various structures of hardware and software based on a set of mathematical models. On the example of modeling an ICE unit – a working machine, the effect of varying the input parameters of the model was estimated: torque effects and resistance moments on the diagnostic parameters of the technical state – angular velocities and accelerations. The use of computer modeling of ICE working processes using this methodological approach made it possible to create a digital technology and a measuring system for automated energy monitoring of the tractor fleet of an agricultural enterprise. The computer structural diagrams of ICE and MES models can be used in diagnostic complexes. This will make it possible to increase the accuracy and reliability of determining the state of the internal combustion engine and the mechanisms and working machines aggregated with it, as well as improve the quality of the work they perform.

Keywords: internal combustion engine, power, dynamic method of diagnostics, modeling of working processes, digital technologists

Для цитирования: Альт В.В., Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Клименко Д.Н., Елкин О.В. Методологические основы автоматизации разработки измерительных экспертных систем автотракторных двигателей // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2020. Т. 50. № 4. С. 80–92. DOI: 10.26898/0370-8799-2020-4-10.

For citation: Alt V.V., Dobrolyubov I.P., Savchenko O.F., Klimenko D.N., Elkin O.V. Methodological basis for measuring expert systems automation of motor and tractor Engines. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* = *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2020, vol. 50, no. 4, pp. 80–92. DOI: 10.26898/0370-8799-2020-4-10.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Низкая конкурентоспособность отечественной сельскохозяйственной техники во многом обусловлена ее недостаточной надежностью, что приводит к снижению производительности, увеличению непроизводительных затрат времени и средств на обеспечение работоспособности. Время простоев по техническим причинам составляет 25–30% от общего рабочего времени. В результате техническая готовность тракторов и сельскохозяйственных машин снижается до 60–70%, удлиняются сроки выполнения полевых работ, ухудшается качество выполнения технологических операций в растениеводстве, что увеличивает потери продукции [1, 2].

Существенное увеличение затрат, происходящих при выполнении полевых сельскохозяйственных работ, обусловлено ухудшением технического состояния тракторного парка сельхозпредприятия из-за износа деталей, нарушения регулировок и настроек механизмов и систем и приводит к потере мощности тракторов и повышению расхода топлива. Результаты исследований показывают, что при обеспечении непрерывного определения фактического состояния МТА возможно выявить скрытые резервы по мощности в пределах 6,0–15,6%, по расходу топлива – 12,0–18,7% [3].

Решение этой задачи возможно путем улучшения оперативности и точности контроля параметров техники, мониторинга энергетических параметров двигателя внутреннего сгорания (ДВС), что позволит принимать оперативные и качественные управляющие воздействия для постоянной поддержки работоспособного состояния техники в нормальном экономичном режиме. Очевидна необходимость автоматизации процесса контроля энергетических параметров машинно-тракторного парка и

управления состоянием техники. Для этого нужен углубленный анализ больших объемов информации, что требует привлечения быстродействующих технических средств и передовых технологий передачи и обработки данных, что становится реальностью в связи с существенным развитием цифровой техники [4–7].

Одним из перспективных направлений развития является обоснование, разработка и внедрение информационных измерительных систем в сочетании с системами искусственного интеллекта – измерительных экспертных систем (ИЭС), обладающих наибольшими потенциальными возможностями при решении такого рода задач и уже получивших значимые результаты. Исследование математических и технических аспектов идентификации технического состояния ДВС и его систем позволили создать информационное, метрологическое и техническое обеспечение и разработать измерительную экспертную систему, в значительной мере решающую задачи автоматизации оперативного определения параметров технического состояния ДВС [8–10].

Однако развитие ИЭС ДВС идет сложным путем, обусловленным необходимостью четкого обоснования ее будущей востребованности и перечня решаемых задач в выбранной предметной области. Повышению эффективности разработки ИЭС ДВС способствует ее автоматизация. Для этого можно успешно использовать уже рекомендовавшие себя методы автоматизированного проектирования перспективных систем, например [11, 12], исследования авторов по принципам моделирования динамических процессов ДВС, обоснованию совокупности диагностических параметров и измерительных каналов, а также принципам автоматизации разработки ИЭС^{1,2} [13–16]. В связи с этим весьма перспективны исследования, направленные на разработку системы

¹Пат. № 2665566 (Российская Федерация). Способ определения цикловой подачи топлива и устройство для его осуществления: /И.П. Добролюбов, В.В. Альт, С.Н. Ольшевский, О.Ф. Савченко, Д.Н. Клименко; заявл. 27.10.2015; опубл. 31.08.2018; Бюл. № 25.

²Альт В.В., Савченко О.Ф., Елкин О.В., Клименко Д.Н. Автоматизация энергетической оценки тракторного парка сельхозпредприятия с применением цифровых технологий // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса: сб. науч. трудов XII междунар. науч.-практ. конф. Ростов/Д., 2019. С. 74–79. DOI: 10.23947/interagro.2019.1.74-79.

автоматизации разработки ИЭС (САРИЭС), способствующую большей степени гарантированности получения желаемого результата. САРИЭС позволяет уменьшить уровень субъективности за счет учета в полной мере уже имеющегося опыта в этой предметной области, основанного на глубоком изучении физических процессов объекта исследований и применении наиболее приемлемых методов извлечения и анализа информации для определения информативных признаков состояния объекта с достаточной точностью.

Цель исследования – разработать методологические подходы к моделированию рабочих процессов автотракторных ДВС и проектированию системы автоматизации разработки ИЭС ДВС.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Важный научно-методический аспект исследований – определить процедуру разработки САРИЭС, этапов в создании видов обеспечения, определения функций исходя из характеристики объекта проектирования. ДВС как объект экспертизы (ОЭ) – сложная система, состоящая из ряда подсистем, охваченных прямыми и обратными связями, с множеством физических процессов, характеризующих состояние и режимы его работы. Аналогично сложной является система ДВС – рабочая машина.

САРИЭС ДВС основывается на широком использовании информационных компьютерных технологий в процедурах анализа и видоизменения технических решений [11, 12]. Характеризуется применением цифрового метода выполнения задач проектирования и представляет собой систему на основе совокупности программно-алгоритмических средств.

Основные преимущества САРИЭС:

- увеличение производительности труда разработчиков;
- сокращение длительности циклов производства;
- оперативное внесение изменений в схемы и конструкцию ИЭС;
- повышение точности и оперативности разработки ИЭС;

- сокращение объемов испытаний макетных и опытных образцов ИЭС;
- оптимизация программирования.

Этапы разработки САРИЭС можно представить в виде последовательного соединения следующих блоков обеспечения: методического, организационного, информационного, программного, технического.

Методическое обеспечение – указания по работе с моделями ДВС и логическими схемами разработки САРИЭС. Содержит методики: разработки моделей ДВС, его отдельных систем и механизмов, для которых создается ИЭС, а также процессов, протекающих в ИЭС; анализа и синтеза отдельных элементов и систем в целом; решения оптимизационных задач; построения технологической процедуры функционирования ИЭС. Задача организационного обеспечения – установление оптимального взаимодействия разработчиков в соответствии с этапами жизненного цикла разрабатываемой САРИЭС. Информационное обеспечение содержит необходимые средства для описания и накопления входной, выходной и промежуточной информации (библиотеки, архивы, банки данных и др.). Сущность программного обеспечения – разработать функционально полный набор управляющих и прикладных программ. Техническое обеспечение – оптимальный выбор состава и качества технических средств.

Из последовательных фаз жизненного цикла САРИЭС (разработка, конструирование и изготовление, эксплуатация) необходимо максимизировать (по длительности) последнюю фазу и минимизировать две предыдущие. Однако фаза разработки сложных САРИЭС имеет тенденцию возрастать и становится соизмеримой с фазой эксплуатации.

Главными компонентами САРИЭС являются набор интерактивных программ для анализа систем и сигналов объекта, прикладных программ и программ реального времени, связанных с экспериментальным оборудованием. Это позволяет проводить проверку алгоритмов идентификации и управления при испытаниях САРИЭС.

Задачи синтеза в САРИЭС решаются в два этапа:

- структурный синтез направлен на создание структуры;
- параметрический синтез направлен на поиск параметров разработанной структуры, при которых САРИЭС будет функционировать при действии всех дестабилизирующих факторов.

Структурный синтез включает в себя три основных этапа: генерацию или поиск варианта структуры; оценку сгенерированного варианта; принятие решения о его пригодности или непригодности и о продолжении (или прекращении) дальнейшего поиска вариантов.

Параметрический синтез определяет область работоспособности в пространстве входных, внутренних и выходных параметров, где САРИЭС будет правильно функционировать в течение требуемого срока при наличии различного рода дестабилизирующих факторов. Параметрический синтез САРИЭС с непрерывно изменяющимися параметрами базируется на методах, являющихся основой также для параметрической оптимизации. Основные различия этих двух процессов разработки заключаются в том, что процессы параметрического синтеза ИЭС и УЭС еще плохо изучены. В связи с этим для параметрического непрерывного синтеза наиболее пригодны методы случайного поиска.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Целевая функция. Для процесса разработки ИЭС используется целевая функция F :

$$F : (\psi \circ \varphi(\vec{A}_0)) \rightarrow \vec{V}; \quad \psi \subset (\vec{P} \times \vec{X}); \\ \varphi \subset (\times \vec{P}); \quad \vec{A}_0 \subseteq \vec{A},$$

где ψ – бинарное отношение между элементами множеств $\vec{P}$ и $\vec{X}$; φ – бинарное отношение между элементами множеств $\vec{A}$ и $\vec{P}$; $\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ – множество целей; $\vec{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – множество признаков; $\vec{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ – множество технических

решений; $\vec{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_l\}$ – множество оценок.

Бинарное отношение φ между множествами $\vec{A}$ и $\vec{P}$ означает отношение между целями и признаками, бинарное отношение ψ между $\vec{P}$ и $\vec{X}$ – между признаками и техническими решениями. Поскольку каждой цели может соответствовать несколько признаков, то подмножество $\vec{P}_i$, с которым a_i находится в отношении φ , является срезом через элемент a_i .

Если выбрано подмножество $\vec{A}_0$ множества целей $\vec{A}$, то можно найти срез через $\vec{A}_0$:

$$\varphi(\vec{A}_0) = ((p) (\cup a)) [a \in \vec{A}_0 \cap (a, p) \in \varphi];$$

$$\psi(\vec{A}_0) = ((x) (\cup p)) [p \in \vec{P}_0 \cap (p, x) \in \psi];$$

где $\vec{P}_0$ – срез множества $\vec{P}$ по подмножеству $\vec{A}_0$; $\cap$ и $\cup$ – знаки пересечения и объединения (конъюнкции и дизъюнкции).

Произведение бинарных отношений

$$\psi \circ \varphi = ((a, x) (\cup p)) [(a, p) \in \varphi \cap (p, x) \in \psi];$$

представляет собой множество упорядоченных пар (a, x) таких, что для них существует элемент p множества $\vec{P}$, с которым a находится в отношении φ , а сам он вступает в отношение ψ с элементом x .

Срез произведения по подмножеству $\vec{A}_0$ выражается

$$\psi \circ \varphi \vec{A}_0 = ((a, x) (\cup p)) [(a, p) \in \varphi \cap (p, x) \in \psi \cap a \in \vec{A}_0].$$

Отображение среза произведения бинарных отношений на множество оценок означает функцию, определенную на множестве $\psi \circ \varphi(\vec{A}_0)$ и принимающую значение на множестве $\vec{V}$. Каждый элемент множества $\vec{V}$ при этом представляет собой в общем случае n -мерный вектор, компоненты которого – стоимостные характеристики, характеристики полезности и др.

Математическое обеспечение. Описывается в форме модели и включает следующие компоненты и правила: A – цель функционирования; $\vec{E} = \{e_i\}$ – множество элементов, составляющих систему;

$\vec{T} = \{t_\tau\}$ – множество элементов времени;
 $\vec{P} = \{p_i^j\}$ – множество признаков, характеризующих систему в целом на всех этапах жизненного цикла; $\vec{P}_\zeta = \{p_\zeta^j\}$ – множество признаков, характеризующих элементы на всех этапах жизненного цикла; $\vec{S}^\tau = \{s_i^\tau\}$ – множество состояний элементов в рассматриваемый промежуток времени; $H = \vec{S}^\tau \times T$ – правило упорядочения смены состояний; $\vec{Q} = \{e_p, e_k\}$ – множество связей между всеми элементами системы; $F : \{p_\zeta^j = f_M(p_i^j)\}$ – математические зависимости, описывающие отношения между признаками элементов и признаками систем; $\vec{P}_\zeta = \{p_\zeta\}$ – множество признаков, определяющих взаимодействие системы со средой.

Множество состояний включает определенный набор значений признаков системы, подсистемы или элементов в момент времени t_τ . Элемент e_i или вся система за рассматриваемое время $t_0 - t_k$ определенное число раз переходят из начального s_n в конечное состояние s_k . Порядок смены состояний системы может быть описан дифференциальным уравнением, конечным или вероятностным автоматом, цепью Маркова, булевыми функциями, функциями предикат и др.

Переход от одного описания системы к другому отображается в виде

$$O_0 = OP_1 \rightarrow OP_2 \rightarrow \dots \rightarrow OP_r$$

где O_0 – процесс разработки системы; OP_i – описание системы на разных этапах разработки: $OP_1 = \vec{A}_0 = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ – целевое; $OP_2 = \{\vec{A}_0, \vec{P}_i\}$ – концептуальное; $OP_3 = \{\vec{P}_\zeta, H\}$ – функциональное; $OP_4 = \{\vec{E}, \vec{P}_\zeta, \vec{Q}\}$ – структурное; $OP_5 = \{\vec{P}_\zeta, \vec{T}, F : (p_\zeta^j = f_M(p_i^j))\}$ – динамическое; $OP_6 = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n\}$ – параметрическое.

Система может быть описана любым из следующих способов, причем осуществляется переход между моделями во временной области, в пространстве состояний и в частотной области:

- последовательностью детерминированных иных или стохастических входных и (или) выходных сигналов;

- последовательностью значений автокорреляционных или взаимных корреляционных функций;
- дискретными значениями импульсной и (или) переходной функции;
- передаточной функцией (матрицей) в s -области (преобразованием Лапласа) и (или) в z -области (дискретным преобразованием Лапласа);
- дискретными значениями частотных характеристик (спектрами);
- матрицами непрерывной модели в пространстве состояний;
- матрицами дискретной модели в пространстве состояний;
- полиномиальными матрицами описания систем матричными дробями.

Информационное обеспечение. Осуществляется с помощью автоматизированной информационной системы (АИС). Основная функция АИС САРИЭС – представление всем категориям пользователей и программам необходимой им информации в требуемой форме в установленные сроки по соответствующим запросам. При этом обработка информации включает сбор и подготовку, ввод и вывод, хранение, представление по запросам, поиск в установленные сроки, формирование в требуемом виде, обновление в установленные сроки с целью учета внешних изменений, размножение и распределение по блокам.

Функции сбора и подготовки информации предназначены для первоначального формирования информационной базы и подготовки информации к вводу ее в АИС в процессе ее функционирования для пополнения и обновления состава информации. При вводе и выводе информации проводится также преобразование ее форм, ее распознавание и классификация, организация общения пользователей с АИС. Обеспечивается также хранение такой информации, как библиотеки моделей ОЭ и процесса разработки САРИЭС, решающих процедур, типовых решений и др. Функции организации информационной базы, доступ к которой обеспечен разработчикам всех функциональных уровней и этапов разработки САРИЭС,

являются вспомогательными по отношению к функциям хранения и поиска.

Задачи формирования информации: построение новых решающих процедур; преобразование моделей ОЭ и процесса разработки САРИЭС, а также информации в базах данных. При размножении и распределении информации осуществляется ее передача, предоставление пользователям копий информации. Функции анализа функционирования АИС используются для сбора статистических данных о работе АИС.

Методика построения логической схемы алгоритма разработки. При системном подходе необходимо формализованное представление процесса решения взаимосвязанных задач разработки САРИЭС в виде некоторой логической схемы алгоритма разработки (ЛСАР). Эта схема создается на базе формализованных элементов – векторов (множеств): $\vec{M}$ – моделей ОЭ, ИЭС и УЭС, $\vec{A}$ – исходных данных, $\vec{C}$ – ограничений, $\vec{R}$ – вариантов решения, $\vec{K}$ – оценок принятого решения, $\vec{T}$ – решающих процедур (методик). При этом формируется принцип декомпозиции исходных задач $\vec{S}$ на логически взаимосвязанную систему подзадач $\vec{S}^d$, где d – уровни декомпозиции, i – этапы решений, представленных упорядоченными шестерками $(\vec{M}, \vec{A}, \vec{C}, \vec{R}, \vec{K}, \vec{T})$. Если задана пятерка множеств $(\vec{S}, \dots, \vec{A}, \vec{C}, \vec{R}, \vec{K}, \vec{T})$, то задана схема разработки системы H , где $\vec{S}$ – непустое множество, элементы которого являются задачами разработки САРИЭС. При этом последовательно выбираются варианты решений $\vec{R}_i \in \vec{R}$, из полученного решения R_k предыдущей задачи S_k формулируется определяющее ограничение S_{k+1} или исходная информация A_{k+1} в решающей процедуре T_{k+1} следующего этапа. Каждое из промежуточных решений R_k задачи S_k представляется основанием ветвящегося дерева вариантов по отношению к решаемым задачам S_l ($l > k$) следующего этапа.

ЛСАР содержит конечные множества: $\vec{D} = \{d\}$ – уровней формирования задач разработки САРИЭС; $\vec{T} = \{i\}$ – этапов разработки САРИЭС; $\vec{N} \{v\}$ – цепей в «вертикальном» поддереве моделей $\vec{M} = \{\vec{M}_v^d\} \in \vec{M}^D$ –

цепей в «горизонтальном» поддереве этих моделей. Каждому уровню соответствует система моделей $\vec{M}^d \in \vec{M}^D$, представляющая подмножество полного множества моделей $\vec{M}^D$. В пределах каждого из уровней выделяются классы моделей композиционной, функциональной и конструктивной структур. Модели s -го уровня упорядочены также в соответствии с дедуктивно-параллельным принципом: на d -м уровне упорядочению подлежит множество моделей $\vec{M}^d = \bigcup_{iel} \vec{M}^d$. Модель системы для решения задачи d -го уровня на i -м этапе с использованием v -й цепи решения между уровнями и λ -й цепи решения между этапами обозначается $M_{v\lambda}^{d_i}$. Для случая существования единственной цепи решения между уровнями получим M^{D_i} . Если между этапами также существует единственное решение, имеем модель M^{D_i} , принадлежащую матричной структуре моделей.

ЛСАР организует объединенную решающую процедуру $\vec{T} = \{\vec{T}_{v\lambda}^{d_i}\}$, элементы которой следующие:

- реализации отдельных формальных методов разработки САРИЭС;
- процедуры общения разработчика с компьютером для применения эвристик при отсутствии готовых (сконструированных) решающих процедур;
- оценка и выбор вариантов технических решений, единственность которых не определена из-за слабой структуризации процессов разработки САРИЭС.

Достаточно полно разработанная ЛСАР – необходимый элемент синтеза структуры комплекса технических средств с его проблемно-ориентированным программным обеспечением. Это достигается представлением функционально полной совокупности моделей ДВС, ИЭС $\vec{M} = \{M_{v\lambda}^{d_i}\}$, элементов этих моделей $\vec{m} = \{m^{d_i}\}$, связей между ними $\vec{r} = \{r_m^{d_i}\}$, а также полного состава операций преобразования моделей $\vec{P}_M = \{P_M^{d_i}\}$ и их связей $\vec{P}_M = \{P_r^{d_i}\}$ на всей совокупности решающих процедур $\vec{T} = \{\vec{T}_{v\lambda}^{d_i}\}$.

Универсальным средством единства представления информации о разрабатываемой САРИЭС является разработка совокупности ее математических моделей $\vec{M}_i^S \in \vec{M}$, обладающих определенными структурными свойствами.

Создаются следующие структуры САРИЭС:

- системная (архитектура);
- алгоритмическая (алгоритм функционирования);
- логическая (функциональная схема);
- конструктивная (монтажная схема).

Применение результатов исследований.

Моделирование агрегата ДВС – рабочая машина (ДВС – РМ). Если выходными координатами являются угловые скорости валов [9, 10, 13, 14], то для двухмассовой системы ДВС – РМ (см. рис. 1) уравнения в безразмерных величинах с учетом зазора и нелинейной зависимости трения от скорости):

$$\left. \begin{aligned} T_{m1} \frac{d\tilde{\omega}_1}{dt} &= \tilde{M}_\delta - \tilde{M}_y - k_c(\tilde{\omega}_1 - \tilde{\omega}_2) - k_{f1}\tilde{\omega}_1; \\ T_c \frac{d\tilde{M}_y}{dt} &= (\tilde{\omega}_1 - \tilde{\omega}_2); \\ T_{m2} \frac{d\tilde{\omega}_2}{dt} &= \tilde{M}_y + k_c(\tilde{\omega}_1 - \tilde{\omega}_2) - \tilde{M}_c - k_{f2}\tilde{\omega}_2, \end{aligned} \right\}$$

где $T_{m1} = J_1 \omega_6 / M_6$, $T_{m2} = J_2 \omega_6 / M_6$ – механические постоянные времени сосредоточенных масс ДВС и рабочей машины; J_1 – момент инерции вала двигателя и муфты; J_2 – приведенный к валу двигателя момент инерции

редуктора и РМ; $T_c = M_6 / (c\omega_6)$; – постоянная времени жесткости кинематической связи ДВС – РМ (c – постоянный коэффициент жесткости); ω_1 и ω_2 – угловые скорости валов ДВС и РМ; ω_6 и M_6 – базовые значения скоростей и моментов на валу двигателя; $k_c = b\omega_6 / M_6$ – относительный коэффициент внутреннего трения (b – постоянный коэффициент); M_6 – момент двигателя; M_y – упругий момент; M_c – момент нагрузки на РМ; k_{f1} , k_{f2} – относительные коэффициенты, характеризующие зависимости моментов трения от скоростей ω_1 и ω_2 ; величины со знаком $\sim$ – отнесенные к соответствующим базовым значениям моменты и скорости; величины, связанные с ДВС, имеют индекс 1, с РМ – индекс 2.

Разработанная компьютерная модель агрегата ДВС – РМ в соответствии со схемой (см. рис. 1) представлена на рис. 2 (без раскрытия субблоков). Вводя в структурную схему модели (см. рис. 2) значения параметров, характерные для конкретной марки ДВС, путем варьирования параметров крутящих моментов ДВС, РМ и моментов сопротивлений (упругостей, нелинейностей и нагрузки) можно в статическом и динамическом режимах оценить их влияние на угловые скорости и ускорения, а также на техническое состояние ДВС и РМ.

Единым звеном ЛСАР, на базе которого можно производить декомпозицию задачи системной разработки САРИЭС S , распараллеливание подзадач, их упорядочение

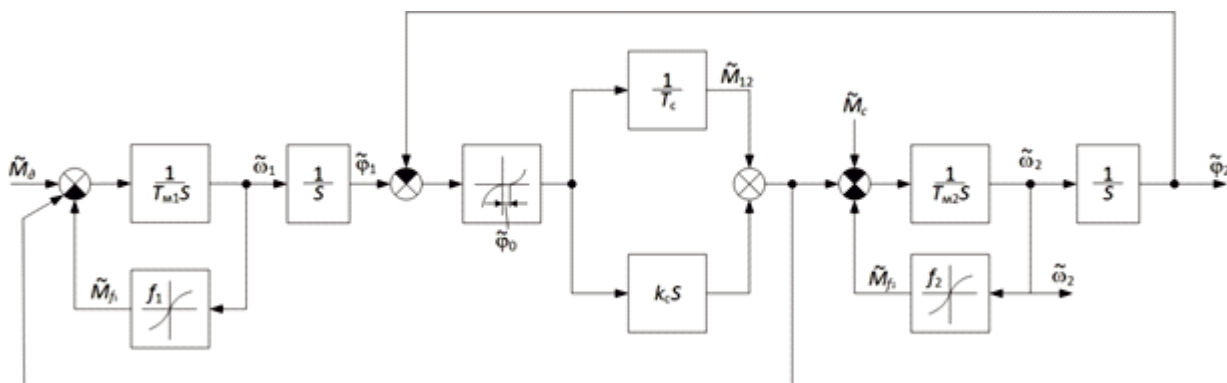


Рис. 1. Структурная схема двухмассовой модели системы ДВС – РМ:

s – дифференциатор, $1/s$ – интегратор, $\oplus$ – сумматор (с зачерненным сектором – вычитающее устройство)

Fig. 1. Structural diagram of two-mass model of the ICE system – RM: s – differentiator, $1/s$ – integrator, $\oplus$ – adder (with blackened sector – subtraction device)

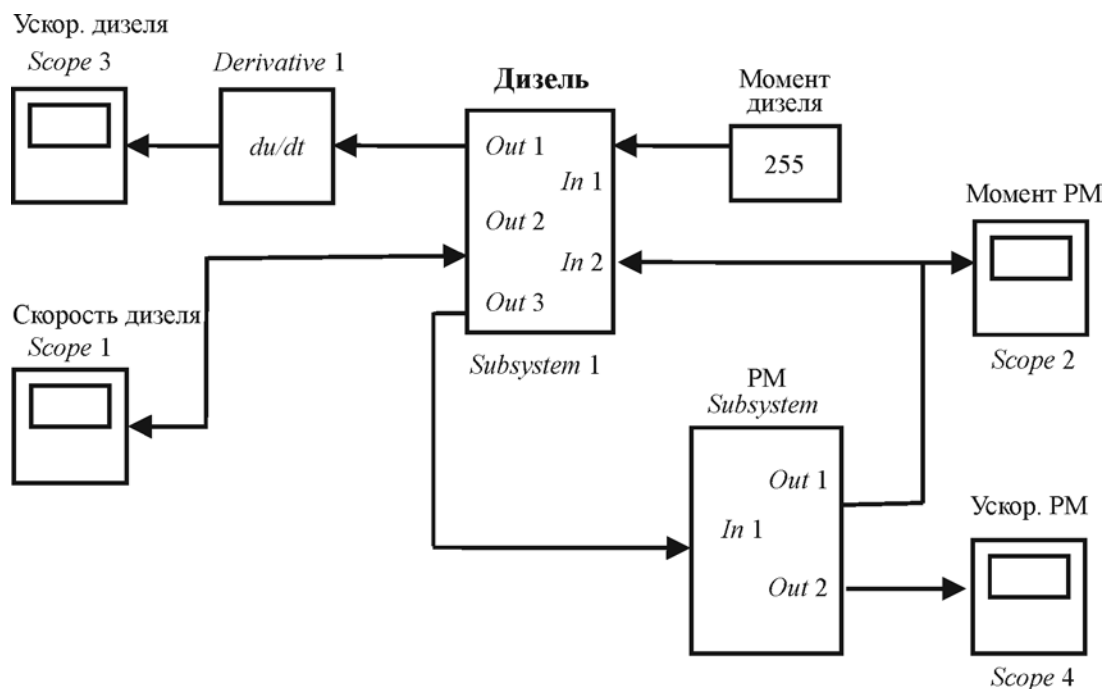


Рис. 2. Структурная схема компьютерной модели двухмассовой системы ДВС – рабочая машина
Fig. 2. Structural diagram of computer model of two-mass system of ICE – working machine

в смысле представления исходной информации и построения решающих процедур $\vec{T} = \{\vec{T}_{v\lambda}^{d_i}\}$, является ячейка ЛСАР.

Ячейки ЛСАР формируются на основе конечной совокупности моделей $\vec{M} = \{\vec{M}_{v\lambda}^{d_i}\}$ разрабатываемой системы. Полнота и эффективность модели позволяют интерпретировать полученные технические решения $\vec{R} = \{\vec{R}_{v\lambda}^{d_i}\}$ по системе оценок $\vec{K} = \{\vec{K}_{v\lambda}^{d_i}\}$. Под ячейкой понимается существование принципиально разрешимой задачи $S_{v\lambda}^{d_i}$ разработки САРИЭС с помощью определенной решающей процедуры $T_{v\lambda}^{d_i}$ (в том числе неформальной) по исходным данным $\vec{A}^*$, $\vec{C}^*$. Решения такой задачи могут быть представлены категориями модели $M_{v\lambda}^{d_i}$ разрабатываемой САРИЭС и сравнимы по оценкам $K_{v\lambda}^{d_i}$.

Автоматизация энергетического мониторинга тракторного парка сельхозпредприятия. Невозможность определения энергетических параметров тракторов в эксплуатационных условиях стандартны-

ми методами, требующими, как правило, стендового оборудования, обуславливает необходимость применения динамического метода диагностики тракторных двигателей для автоматизации процесса оперативного определения эффективной мощности ДВС.

Для разработки использовали методологические положения САРИЭС с привлечением цифровых технологий при реализации алгоритмов компьютерного моделирования переходных процессов, расчета скоростных характеристик и энергетических параметров ДВС. В результате создан алгоритм расчета мощности ДВС, общая структурная схема которого представлена на рис. 3.

Обоснована наиболее эффективная структурная схема и разработана автоматизированная измерительная информационная система – «МОТОР-ТЕСТЕР СибФТИ 2», реализующая цифровую технологию определения мощности ДВС в производственных условиях³ [17, 18]. Обеспечивается информационное сопровождение операций технологического процесса энергетической оценки ДВС

³ Пат. № 2721992 (Российская Федерация). Способ определения технического состояния двигателей внутреннего сгорания и устройство для его осуществления / И.П. Добролюбов, В.В. Альт, С.Н. Ольшевский, О.Ф. Савченко, Д.Н. Клименко; заявл. 18.12.2018; опублик. 25.05.2020; Бюл. № 15.

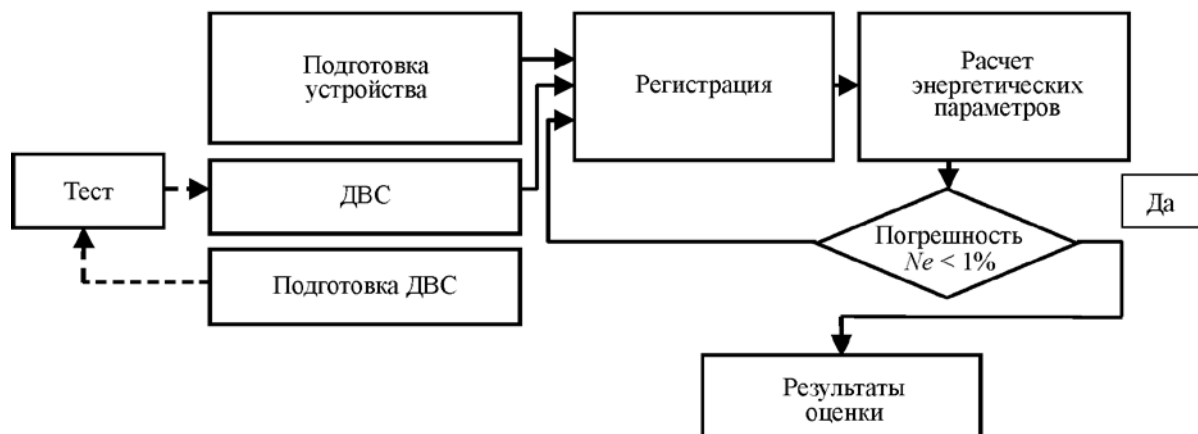


Рис. 3. Общая структурная схема алгоритма информационной технологии расчета мощности
Fig. 3. The general structural scheme of the information technology algorithm for power calculation



Рис. 4. Окно интерфейса пользователя МОТОР-ТЕСТЕРА СибФТИ 2
Fig. 4. SibFTI MOTOR-TESTER 2 user interface

с возможностью непосредственного контроля процесса подачи тестовых воздействий и регистрации данных (см. рис. 4).

Разработаны методические положения по диагностированию ДВС динамическим методом и сформирована дополнительная технологическая карта к технологии диагностирования тракторов с помощью установки КИ-13940 ГОСНИТИ в части измерения частоты вращения коленчатого вала и определения мощности дизеля тракторов⁴. Экспериментальная проверка технологии

в производственных условиях подтвердила возможность мониторинга мощностных параметров ДВС во время полевых работ.

ВЫВОДЫ

1. Показана целесообразность применения измерительных экспертных систем (ИЭС) для решения задач оперативного контроля энергетических параметров машинно-тракторного парка с целью снижения потерь мощности двигателей внутреннего сгорания

⁴Альт В.В., Ольшевский С.Н., Савченко О.Ф., Елкин О.В., Добролюбов И.П., Клименко Д.Н., Орехов А.К., Борисов А.А. Методические положения по диагностике двигателей внутреннего сгорания энергонасыщенной техники динамическим методом. Новосибирск: СФНЦА РАН, 2017. 56 с.

тракторов из-за изменения их технического состояния в производственных условиях.

2. Обоснована необходимость проектирования системы автоматизации разработки ИЭС (САРИЭС), повышающая эффективность создания ИЭС за счет учета уже имеющегося опыта в этой предметной области, основанного на глубоком изучении физических процессов объекта исследований и применении наиболее передовых цифровых методов извлечения и анализа информации.

3. Сформировано методическое, программное и техническое обеспечение САРИЭС, описывающее множество элементов системы, осуществляющее функции сбора, обработки и представления информации. Методика построения логической схемы алгоритма разработки позволяет синтезировать различные структуры комплекса технических и программных средств.

4. Показана результативность предложенной методологии на примере создания компьютерной модели двухмассовой системы ДВС – РМ, обеспечивающей оценку параметров технического состояния. Производственными испытаниями подтверждена эффективность системы автоматизации энергетического мониторинга тракторного парка сельхозпредприятия на основе компьютерной динамической модели ДВС.

5. Реализация представленной методологии разработки САРИЭС обеспечивает увеличение производительности труда разработчиков, сокращение объемов испытаний макетных и опытных образцов ИЭС, оптимизацию программирования, что позволит повысить точность и достоверность определения состояния ДВС. Разработанные в САРИЭС компьютерные структурные схемы моделей ДВС, ИЭС можно использовать в диагностических комплексах и адаптивных системах автоматического управления работой агрегатов, построенных на базе компьютерных технологий и электронных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев Р.Ю., Горячев С.А. Ресурсосбережение при техническом сервисе сельскохозяйственной техники // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 2. С. 37–49.
2. Немцев А.Е., Коротких В.В. Методология формирования системы обеспечения работоспособности сельскохозяйственной техники: монография. Новосибирск: СФНЦА РАН, 2018. 208 с.
3. Калачин С.В. Прогнозирование изменения контролируемых эксплуатационных параметров МТА // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 6. С. 29–31.
4. Черноиванов В.И., Габитов И.И., Неговора А.В. Цифровые технологии и электронные средства в системе технического обслуживания и ремонта автотракторной и комбайновой техники // Технический сервис машин. 2018. № 130. С. 74–81.
5. Тимонин С.Б., Тимонина А.С. Внедрение цифровых технологий в процессы обеспечения оптимального функционирования машинно-тракторного агрегата // Нива Поволжья. 2018. № 3. С. 124–132.
6. Голубев И.Г., Мишуров Н.П., Гольяпин В.Я., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С. Системы телеметрии и мониторинга сельскохозяйственной техники: монография. М.: Росинформагротех, 2020. 76 с.
7. Головин С.И., Ревякин М.М., Жосан А.А. К вопросу о мониторинге и управлении техническим состоянием мобильных энергетических средств // Агротехника и энергообеспечение. 2019. № 3 (24). С. 111–116.
8. Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Альт В.В. Идентификация состояния сельскохозяйственных объектов измерительными экспертными системами: монография. Новосибирск: СО РАСХН, 2003. 209 с.
9. Савченко О.Ф., Добролюбов И.П., Альт В.В., Ольшевский С.Н. Автоматизированные технологические комплексы экспертизы двигателей: монография. Новосибирск: СО РАСХН, 2006. 272 с.
10. Альт В.В., Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Ольшевский С.Н. Техническое обеспечение измерительных экспертных систем машин и механизмов в АПК: монография. Новосибирск: СО РАСХН, 2013. 523 с.

11. John de S. Coutinho. Advanced Systems Development Management. New York: Wiley, 1977. 433 s.
12. Системы автоматизированного проектирования. Пер. с англ. / под ред. Дж. Аллана. М.: Наука. 1985. 376 с.
13. Добролюбов И.П. Точностные и информационные показатели измерительных каналов экспертной системы двигателей // Измерительная техника. 2011. № 6. С. 43–47.
14. Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Ольшевский С.Н. Оптимизация обнаружения и измерения параметров ДВС измерительной экспертной системой // Ползуновский вестник. 2011. № 2/2. С. 275–279.
15. Добролюбов И.П., Савченко О.Ф., Альт В.В., Ольшевский С.Н., Клименко Д.Н. Моделирование процесса оптимального определения параметров состояния двигателя внутреннего сгорания измерительной экспертной системой // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20. № 6. С. 22–35.
16. Савченко О.Ф., Альт В.В., Добролюбов И.П., Ольшевский С.Н. Развитие средств автоматизации измерений и анализа рабочих процессов при испытаниях ДВС // Двигателестроение. 2014. № 2. С. 26–31.
17. Альт В.В., Савченко О.Ф., Ольшевский С.Н., Елкин О.В., Клименко Д.Н. Автоматизированная технология энергетического мониторинга тракторного парка сельхозпредприятия // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 129. С. 36–44.
18. Альт В.В., Савченко О.Ф., Елкин О.В. Цифровая технология оценки мощности тракторного парка сельхозпредприятия // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13. № 4. С. 25–31. DOI 10/22314/2073-7599-2019-13-4-25-31.
3. Kalachin S.V. Prediction of changes in the monitored operational parameters of the machine and tractor aggregates. *Traktory i sel'khoz mashiny = Tractors and agricultural machinery*, 2013, no. 6, pp. 29–31. (In Russian).
4. Chernoi vanov V.I., Gabitov I.I., Negovora A.V. Digital technologies and electronic means in the system of technical maintenance and repair of tractor and combine harvesters. *Tekhnicheskii servis mashin = Machinery Technical Service*, 2018, no. 130, pp. 74–81. (In Russian).
5. Timonin S.B., Timonina A.S. The introduction of digital technologies in the processes of ensuring the optimal functioning of the machine-tractor unit. *Niva Povolzh'ya = Niva Povolzhya*, 2018, no. 3, pp. 124–132. (In Russian).
6. Golubev I.G., Mishurov N.P., Gol'tyapin V.Ya., Apatenko A.S., Sevryugina N.S. *and monitoring systems for agricultural machinery*. M.: Rosinformagrotekh Publ., 2020, 76 p. (In Russian).
7. Golovin S.I., Revyakin M.M., Zhosan A.A. On the issue of monitoring and managing the technical condition of mobile energy means. *Agrotekhnika i energoobespechenie = Agricultural machinery and energy supply*, 2019, no. 3 (24), pp. 111–116. (In Russian).
8. Dobrolyubov I.P., Savchenko O.F., Al't V.V. *Identification of the state of agricultural objects by measuring expert systems*. Novosibirsk: SO RASKhN = Novosibirsk: SB RAS, 2003, 209 p. (In Russian).
9. Savchenko O.F., Dobrolyubov I.P., Al't V.V., Ol'shevskii S.N. *Automated technological complexes for engine examination*. Novosibirsk: SO RASKhN = Novosibirsk: SB RAS, 2006, 272 p. (In Russian).
10. Al't V.V., Dobrolyubov I.P., Savchenko O.F., Ol'shevskii S.N. *Technical support of measuring expert systems of machines and mechanisms in the agro-industrial complex*. Novosibirsk: SO RASKhN = Novosibirsk: SB RAS, 2013, 523 p. (In Russian).
11. John de S. Coutinho *Advanced Systems Development Management*. New York: Wiley, 1977. 433 s.
12. *Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya*. Per. s angl. Pod red. Dzh. Allana [Automated design systems. Translated from English. Edited by J. Allan.]. M.: Nauka Publ., 1985, 376 p. (In Russian).

REFERENCES

1. Solov'ev R.Yu., Goryachev S.A. Resource saving in the technical maintenance of agricultural machinery. *Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*, 2013, no. 2, pp. 37–49. (In Russian).
2. Nemtsev A.E., Korotkikh V.V. *Methodology for the formation of the system for ensuring the operability of agricultural machinery*. Novosibirsk: SFNTsA RAN = Novosibirsk: SFSCA RAS, 2018, 208 p. (In Russian).

13. Dobrolyubov I.P. Accuracy and information indicators of the measuring channels of the engine expert system. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring Techniques*, 2011, no. 6, pp. 43–47. (In Russian).
14. Dobrolyubov I.P., Savchenko O.F., Ol'shevskii S.N. Optimization of detection and measurement of ICE parameters by a measuring expert system. *Polzunovskii vestnik = Polzunovsky vestnik*, 2011, no. 2/2, pp. 275–279. (In Russian).
15. Dobrolyubov I.P., Savchenko O.F., Al't V.V., Ol'shevskii S.N., Klimenko D.N. Modeling the process of optimal determination for the parameters of the condition of internal combustion engine by a measurement expert system. *Vychislitel'nye tekhnologii = Computational technologies*, 2015, vol. 20, no. 6, pp. 22–35. (In Russian).
16. Savchenko O.F., Al't V.V., Dobrolyubov I.P., Ol'shevskii S.N. Instrumentation and means of automatic combustion analysis for diesel engines test facilities. *Dvigatelistroenie = Engines construction*, 2014, no. 2, pp. 26–31. (In Russian).
17. Al't V.V., Savchenko O.F., Ol'shevskii S.N., Elkin O.V., Klimenko D.N. Automated technology of energy monitoring of the tractor fleet of an agricultural enterprise. *Trudy GOSNITI = Proceedings of GOSNITI*, 2017, vol. 129, pp. 36–44. (In Russian).
18. Al't V.V., Savchenko O.F., Elkin O.V. Digital technology of assessment the power capacity of tractor fleet of an agricultural enterprise. *Sel'skokhozyaistvennye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 25–31. (In Russian). DOI 10/22314/2073-7599-2019-13-4-25-31.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Альт В.В., доктор технических наук, руководитель научного направления; e-mail: altviktor@ngs.ru

Добролюбов И.П., доктор технических наук, главный научный сотрудник; e-mail: sof-oleg46@yandex.ru

✉ **Савченко О.Ф.**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник; **адрес для переписки:** Россия, 630501, Новосибирская область, р.п. Краснообск, а/я 463; e-mail: sof-oleg46@yandex.ru

Клименко Д.Н., кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник; e-mail: angryn@mail.ru

Елкин О.В., кандидат технических наук, заведующий сектором; e-mail: oleg348@yandex.ru

AUTHOR INFORMATION

Victor V. Alt, Doctor of Science in Engineering, Director of Research Division; e-mail: altviktor@ngs.ru

Ivan P. Dobrolyubov, Doctor of Science in Engineering, Head Researcher; e-mail: sof-oleg46@yandex.ru

✉ **Oleg F. Savchenko**, Candidate of Science in Engineering, Lead Researcher; **address:** PO Box 463, SFSCA RAS, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, 630501, Russia; e-mail: sof-oleg46@yandex.ru

Denis N. Klimenko, Candidate of Science in Engineering, Lead Researcher; e-mail: angryn@mail.ru

Oleg V. Elkin, Candidate of Science in Engineering, Sector Head; e-mail: oleg348@yandex.ru

Дата поступления статьи 10.05.2020

Received by the editors 10.05.2020