

УДК [621.313.13+621.313.333+681.5.01]:371.693.4

EDN *UTBTCZ*

**ПРИМЕНЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО  
КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ТЕПЛОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ**

**А.О. Рогожников**ORCID: 0009-0002-8354-3766 e-mail: [aleksei17\\_90@mail.ru](mailto:aleksei17_90@mail.ru)Камчатский государственный технический университет  
*Петропавловск-Камчатский, Россия***А.Н. Рак**ORCID: 0000-0003-2809-6529 e-mail: [lion15ua@rambler.ru](mailto:lion15ua@rambler.ru)Камчатский государственный технический университет  
*Петропавловск-Камчатский, Россия***Е.У. Чье**ORCID: 0000-0003-2055-6789 e-mail: [000487@pnu.edu.ru](mailto:000487@pnu.edu.ru)Тихоокеанский государственный университет  
*Хабаровск, Россия***О.А. Белов**ORCID: 0000-0002-7382-9034 e-mail: [boa-1@mail.ru](mailto:boa-1@mail.ru)Научно-исследовательский институт –  
Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы  
*Москва, Россия*

Представлена методика определения постоянных времени, которые оказывают влияние на количественные и качественные показатели тепловых процессов на различных стадиях теплового переходного процесса. Такой подход позволит более строго учитывать влияние тепловых воздействий на срок службы электродвигателя и своевременно принимать меры по устранению неисправностей, вызванных тепловыми перегрузками. Для практических расчетов применительно к электрической изоляции необходимо знать время, в течение которого изоляция определенного класса достигает своего критического состояния. Очевидно, что чем выше класс изоляции, тем медленнее происходит ее старение при тепловом воздействии. Так, кремнийорганические материалы мало подвержены термоокислительному разрушению, в то время как изоляционные материалы на основе целлюлозы, относящиеся к классу А, по мере повышения температуры стареют значительно быстрее. Поскольку температура изоляции в процессе эксплуатации электрических машин меняется, целесообразно определение не общего, а остаточного ресурса или остаточного срока службы изоляции. Приведена информация для выбора устройств защиты электродвигателей и определения срока службы изоляции, которая получена путем экспериментальных исследований тепловых переходных процессов с определением постоянных времени.

**Ключевые слова:** изоляция; обмотка; постоянная времени; превышение; срок службы; температура; электродвигатель.

**Для цитирования:** Рогожников А.О., Рак А.Н., Чье Е.У., Белов О.А. Применение измерительно-вычислительного комплекса для определения параметров тепловых переходных процессов в асинхронных электродвигателях // Интеллектуальная Электротехника. 2026. № 1. С. 67-77. EDN UTBTCZ

## APPLICATION OF MEASUREMENT AND COMPUTING COMPLEX FOR DETERMINING PARAMETERS OF THERMAL TRANSIENT PROCESSES IN ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS

**A.O. Rogozhnikov**

ORCID: **0009-0002-8354-3766** e-mail: **aleksei17\_90@mail.ru**  
Kamchatka State Technical University  
*Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

**A.N. Rak**

ORCID: **0000-0003-2809-6529** e-mail: **lion15ua@rambler.ru**  
Kamchatka State Technical University  
*Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

**E. U. Chye**

ORCID: **0000-0003-2055-6789** e-mail: **000487@pnu.edu.ru**  
Pacific National University  
*Khabarovsk, Russia*

**O.A. Belov**

ORCID: **0000-0002-7382-9034** e-mail: **boa-1@mail.ru**  
Republican Research Scientific and Consulting Center for Expertise  
*Moscow, Russia*

**Abstract.** This article presents a technique for determining the time constants that influence the quantitative and qualitative parameters of thermal processes at various stages of the thermal transient process. This approach will allow for a more accurate assessment of the impact of thermal effects on the service life of electric motors and prompt action to eliminate malfunctions caused by thermal overloads. For practical calculations related to electrical insulation, it is necessary to know the time it takes for insulation of a given class to reach its critical state. Obviously, the higher the insulation class, the slower its aging under thermal influences. For example, organosilicon materials are less susceptible to thermal-oxidative degradation, while cellulose-based insulation materials, classified as Class A, age significantly faster with increasing temperature. Since the insulation temperature changes during operation of electrical machines, it is advisable to determine not the total lifespan, but rather the residual lifespan or service life of the insulation. Information is provided for selecting electric motor protection devices and determining the service life of insulation, which was obtained through experimental studies of thermal transient processes with the determination of time constants.

**Key words:** isolation; winding; permanent time; excess; service life; temperature; electric motor.

**For citation:** A.O. Rogozhnikov, A.N. Rak, E.U. Chye and O.A. Belov, “Application of information and computing complex for determining parameters of thermal transient processes in asynchronous electric motors”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 67-77, 2026. EDN UTBTCZ

### I. Введение

В процессе эксплуатации электрических машин изоляция их обмоток подвергается различным нагрузкам: механическим, химическим, электрическим, тепловым. Со временем, даже при нормальных условиях эксплуатации, предписываемых ГОСТами, изоляция теряет сопротивляемость электрическим и механическим нагрузкам. Особенно опасны для изоляции динамические тепловые воздействия, характеризующиеся длительностью их воздействия перепадом температуры. Все эти параметры влияют на срок службы электродвигателя, который тесно связан с понятием «разрушение» изоляции. Изоляционный материал считается разрушенным, когда он не может безукоризненно обеспечить свою номинальную механическую и электрическую прочность. Внешними признаками нарушения изоляции являются образование трещин, повышенная твердость и хрупкость. В соответствии с современными представлениями, старению изоляции и сокращению срока ее службы способствуют многие химические процессы [1-3]: окисление, процесс полимеризации, гидrolитическая деструкция материала за счет взаимодействия с остаточной влагой под действием тепла и т.д.

Цель работы – определение постоянных времени тепловых переходных процессов для выбора устройств теплового контроля и защиты электродвигателей.

### II. Методика для определения постоянных времени при экспериментальных исследованиях

Порядок и объем тепловых испытаний определяется ГОСТ 183-74 и ГОСТ 11677-85 для всех видов промышленных испытаний электродвигателей: приемочных, периодических, типовых. На нагревание электрические машины испытывают в полностью собранном состоянии, со всем оборудованием, предназначенным для охлаждения, а также для выполнения измерений.

Измерение температуры можно выполнять следующими основными методами: термометра, сопротивления, заложенных или встраиваемых термопреобразователей [4-6]. Каждому из методов присущи свои преимущества и недостатки. Также отдельно взятый из них можно применять для контроля только определенных частей электрической машины. Например, метод термометра наиболее предпочтителен для измерения температуры сер-

дечников, коллекторов и т.д. В методе сопротивления производится сравнение результатов измерений сопротивления обмотки в холодном и нагретом состояниях. На основании этого определяется превышение температуры обмотки в соответствии с соотношениями, приведенными в [3, 5, 6]. Метод заложенных или встраиваемых термопреобразователей позволяет выполнять измерения тех частей машин, в которых ожидаются наиболее высокие значения температуры, но они позволяют измерять непосредственно температуру в месте заложения [7]. В зависимости от доступности той или иной части электрической машины, измерение ее температуры при испытании на нагревание может производиться либо через определенные интервалы времени на протяжении всего испытания, либо после полной остановки машины по его окончании.

Если в машине нет заложенных термопреобразователей, то основным является метод сопротивления [8]. Для этого по окончании испытания на нагревание машина должна быть отключена от нагрузки или от источника питания и остановлена. Если первое измерение сопротивления обмотки произведено не позже 30 сек после отключения машины мощностью до 50 кВт, то за сопротивление обмотки в нагретом состоянии принимается наибольшее из нескольких значений, измеренных через равные промежутки, не превышающие время, прошедшее между моментом отключения и первым измерением. Если же первое измерение произведено позже указанного времени, может быть выполнена экстраполяция результатов измерений. Ее удобно выполнять, откладывая логарифмы измеренных превышений температуры в зависимости от времени; через полученные точки проводится линия, обычно близкая к прямой, по которой определяется логарифм искомого превышения температуры. Такая экстраполяция предполагает, что после отключения машины условия ее охлаждения остаются неизменными как до полной ее остановки, так и после нее [5, 6].

Существенным недостатком данных методов является возможность определения лишь установившихся значений температур, которых достаточно только при проведении промышленных, приемочных, типовых и т.д. испытаний. Кроме того, метод термометра требует частичной разборки машины, что нарушает ее тепловое равновесие. Для создания системы динамического теплового контроля необходимо вести непрерывный контроль изменения температуры [9]. Поэтому необходима разработка специальных средств, на которых были проведены исследования.

Так, измерение температуры отдельных узлов машины во время испытаний можно выполнять с использованием встроенных или заложенных термодатчиков в виде термопар. Способы и правила их укладки приведены в [3, 5]. Контроль и измерение температуры, с целью повышения точности измерений, ранее осуществлялся компенсационным методом посредством

потенциометра КСП-4, выполненного на базе самопишущего прибора, способного регистрировать величину превышений температуры одновременно в нескольких точках машины. Также можно осуществлять тепловой контроль косвенным методом с помощью тепловых аналогов электродвигателей.

Для оценки постоянных времени тепловых переходных процессов был разработан измерительно-вычислительный комплекс, представленный на рис. 1.



**Рис. 1. Измерительно-вычислительный комплекс для проведения тепловых испытаний асинхронных электродвигателей:**  
 (а) – силовая часть (1 – испытуемый двигатель, 2 – нагрузочный двигатель, 3 – нагрузочный ламповый реостат, 4 – программируемое реле ПР 205, 5 – преобразователь частоты);  
 (б) – вычислительно-информационное устройство (1 – микрокомпьютер, 2 – программируемое реле ПР 205, 3 – модуль сбора данных, 4 – монитор)

**Fig. 1. A measuring and computing system for thermal testing of asynchronous electric motors:**

- (a) – power section (1 – test motor, 2 – load motor, 3 – load tube rheostat, 4 – programmable relay PR 205, 5 – frequency converter);  
 (b) – computing and information unit (1 – microcomputer, 2 – programmable relay PR 205, 3 – data acquisition module, 4 – monitor)

Измерительно-вычислительный комплекс состоит из: исследуемого двигателя *C.E.SET. CIM 2/55-132/AD4* (195 В, 310 Гц, 600 Вт), программируемого реле ПР 205 фирмы ОВЕН, модуля сбора данных МСД-200, частотного преобразователя ПЧВ1-1К5-А, нагрузочного универсального коллекторного двигателя 1ВА6755-0RI (220 В, 580 Вт), выступающего в роли генератора постоянного тока, датчиков измерения температуры ДТС014-РТ1000.А4.25/1,5. Информация с датчиков измерения температуры, пропорциональной току нагрузки поступает в программируемое реле

ПР205. Где она преобразуется из аналоговой формы в цифровую, далее она передается по интерфейсу RS-485 в модуль сбора данных МСД-200, где архивируется на установленную SD карту. После проведения экспериментальных исследований осуществляется вывод на экран полученной информации в виде кривых нагрева посредством программы для построения графиков фирмы ОВЕН на микрокомпьютере.

Программой экспериментальных исследований предусматривалось: выполнение нагрева двигателя с номинальной нагрузкой в продолжительном режиме, проверка значений превышений температуры: обмотки статора, сердечника статора, корпуса; охлаждение двигателя.

Результаты измерения температуры в различных частях двигателя и в процессе остывания приведены на рис. 2.

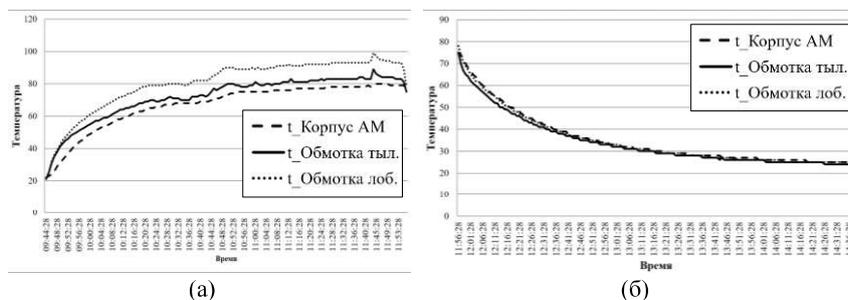


Рис. 2. Кривые нагрева (а) и охлаждения (б) узлов электродвигателя

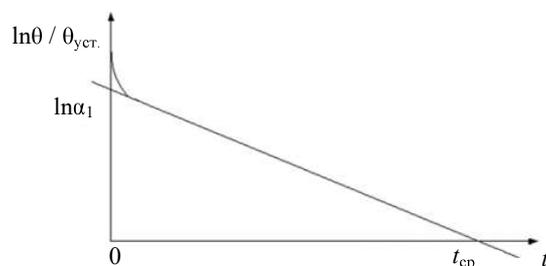
Fig. 2. Curves of heating (a) and cooling (b) of electric motor components

Для анализа тепловых переходных процессов использована специальная методика, позволяющая проводить анализ переходных процессов путем аппроксимации кривых нагрева двумя экспоненциальными зависимостями [10, 11]. При этом уравнение изменения температуры  $\theta$  можно представить в виде:

$$\theta = \theta_{\text{уст.}} \left( 1 - a_1 e^{-\frac{t}{T_1}} - a_2 e^{-\frac{t}{T_2}} \right), \quad (1)$$

где  $T_1$  – постоянная времени, определяющая общую длительность тепловых процессов в минутах;  $T_2$  – постоянная времени, определяющая характер протекания тепловых переходных процессов в начальный период в минутах;  $a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты аппроксимирующих экспонент;  $\theta_{\text{уст.}}$  – установившаяся температура соответствующего узла.

Порядок построений для определения коэффициентов аппроксимирующих экспонент представлен на рис. 3.

Рис. 3. Получение коэффициента аппроксимирующей экспоненты  $a_1$ Fig. 3. Obtaining the coefficient of the approximating exponent  $a_1$ 

Коэффициент  $a_2$  найден из соотношения:

$$a_1 + a_2 = 1. \quad (2)$$

Постоянная  $T_1$  отыскивается следующим образом из условия:

$$\theta = a_1 e^{-\frac{t}{T_1}}. \quad (3)$$

Прологарифмировав (3):

$$\ln \theta = \ln a_1 - \frac{t}{T_1}. \quad (4)$$

При условии  $\ln \theta = 0$ , как видно из рис. 4:

$$T_1 = \frac{t_{\text{ср}}}{\ln a_1}, \quad (5)$$

где точка  $t_{\text{ср}}$  – точка пересечения кривой с осью времени.

Аналогичным образом отыскивается  $T_2$ .

Следующим очень важным параметром, характеризующим тепловой переходный процесс, является длительность теплового переходного процесса, которая, согласно ГОСТ 183-74, определяется как изменение температуры узла  $\Delta\theta$  не более  $1^\circ\text{C}/\text{час}$  по формуле:

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \theta_{\text{уст.}} \left( a_1 e^{-\frac{t_{\text{мн}}-60}{T_1}} + a_2 e^{-\frac{t_{\text{мн}}-60}{T_2}} - a_1 e^{-\frac{t_{\text{мн}}}{T_1}} + a_2 e^{-\frac{t_{\text{мн}}}{T_2}} \right) = \\ &= \theta_{\text{уст.}} \left( a_1 e^{-\frac{t_{\text{мн}}}{T_1}} \left( e^{\frac{60}{T_1}} - 1 \right) + a_2 e^{-\frac{t_{\text{мн}}}{T_2}} \left( e^{\frac{60}{T_2}} - 1 \right) \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $t_{\text{пн}}$  – длительность переходного процесса в часах при  $\Delta\theta = 1^\circ\text{C}$ .

Если принять во внимание тот факт, что основное влияние на длительность переходного процесса оказывает большая постоянная времени  $T_1$ , то можно пренебречь влиянием  $T_2$ , и тогда уравнение (6) примет вид:

$$\Delta\theta = \theta_{\text{уст.}} \left( a_1 e^{\frac{t_{\text{пн}}}{T_1}} \left( e^{\frac{60}{T_1}} - 1 \right) \right). \quad (7)$$

Выполнив некоторые преобразования получено:

$$t_{\text{пн}} = T_1 \ln \left( \frac{\Delta\theta}{\theta_{\text{уст.}}} a_1 \left( e^{\frac{60}{T_1}} - 1 \right) \right) = T_1 \ln \left( 1 / \theta_{\text{уст.}} a_1 \left( e^{\frac{60}{T_1}} - 1 \right) \right). \quad (8)$$

Результаты расчетов коэффициентов аппроксимирующих экспонент, постоянных времени, длительности переходных процессов и установившихся превышений температуры для двигателя *C.E.SET. CIM 2/55-132/AD4* приведены в табл. 1.

**Таблица 1.**

**Результаты расчетов параметров переходных процессов при нагреве**

**Table 1.**

**Results of calculations of parameters of transient processes during heating**

№	$\theta_{\text{уст.}},$ °C	$a_1$	$T_1,$ мин.	$a_2$	$T_2,$ мин.	$t_{\text{пн}},$ ч	$a_1/T_1,$ мин <sup>-1</sup>	$a_2/T_2,$ мин <sup>-1</sup>	$\theta_{\text{уст.}}(a_1/T_1 + a_2/T_2),$ °C/мин.
1	90	0,615	48	0,385	12	1,8	0,0128	0,032	4,03
2	80	0,621	48	0,379	12	1,9	0,0129	0,0316	3,56
3	78	0,665	256	0,335	64	2	0,00259	0,00523	0,6

Аналогичным образом определяются и параметры процесса охлаждения.

### III. Заключение

Приведенные расчеты показывают: несмотря на близость коэффициентов аппроксимирующих экспонент, тепловые переходные процессы при нагреве имеют различные постоянные времени и, соответственно, длительности переходных процессов.

Постоянные времени нагрева для обмотки статора  $T_1 = 48$  мин и  $T_2 = 12$  мин. Коэффициенты аппроксимирующих экспонент  $a_1 = 0,615$  и  $a_2 = 0,385$ . Скорость нарастания температуры в частях обмотки статора –  $4^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Более низкий нагрев лобовой части обмотки со стороны привода (тыл) объясняется наличием дополнительного вентилятора, который улучшает процесс теплообмена.

Постоянные времени нагрева для корпуса статора  $T_1 = 256$  мин. и  $T_2 = 64$  мин. Коэффициенты аппроксимирующих экспонент  $a_1 = 0,665$  и

$a_2 = 0,335$ . Скорость нарастания температуры корпуса машины составляет  $0,6^\circ\text{C}/\text{мин.}$ , что значительно ниже, чем для лобовых частей обмотки статора, что можно объяснить естественным охлаждением корпуса машины.

Для процесса охлаждения постоянные времени составляют  $T_1 = 24$  мин,  $T_2 = 8$  мин. Коэффициенты аппроксимирующих экспонент  $a_1 = 0,841$  и  $a_2 = 0,159$  для частей обмотки статора и корпуса практически идентичны. Длительность переходного процесса в режиме охлаждения составляет 1 час 40 мин. Скорость снижения температуры в частях обмотки статора, для которых выполнялись исследования,  $1,37^\circ\text{C}/\text{мин.}$

Постоянные времени нагрева  $T_1$  и  $T_2$ , а также коэффициенты аппроксимирующих экспонент  $a_1$  и  $a_2$  для режимов нагрева и охлаждения отличаются в 1,5-2 раза.

Разработанная методика для определения постоянных времени при экспериментальных исследованиях и применение современных измерительно-вычислительных средств позволяют качественно улучшить визуализацию процесса динамических измерений температуры и облегчает анализ результатов.

© Рогожников А.О., 2026

© Рак А.Н., 2026

© Чье Е.У., 2026

© Белов О.А., 2026

*Поступила в редакцию 25.11.2025*

*Принята к публикации 25.11.2025*

*Received 15.01.2026*

*Accepted 15.01.2026*

#### Библиографический список

- [1] Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. М.; Ленинград: Госэнергоиздат, 1961. – 480 с.
- [2] Johnson L.M., Brankato E.L., Walker H.P. Navy's philosophy of thermal classification of insulation materials and systems // *Insulation*. 1963. № 9 (2). P. 31-34.
- [3] Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. М.: Высшая школа, 1988. – 323 с.
- [4] Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. М.: Высшая школа, 1989. – 239 с.
- [5] Гуревич Э.И. Тепловые испытания и исследования электрических машин. Ленинград: Энергия, 1977. – 296 с.
- [6] Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Ленинград: Энергия, 1968. – 574 с.
- [7] Панферов М.М., Цыбин А.А., Кузнецов Л.М. Тензорезисторные измерительные системы - Приборы и системы управления 1985. № 9. С.17-21.
- [8] Шефтель И.Т. Терморезисторы. М.: Наука, 1973. – 415 с.

- [9] Линеveg Ф. Измерение температур в технике. Справочник. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1980. – 544 с.
- [10] Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах. Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1986. – 156 с.
- [11] Федоров М.М., Михайлов В.Е., Паркесов В.Г. Особенности моделирования теплового состояния двигателя в повторно-кратковременном режиме // Перспективы развития производства асинхронных двигателей. 1983. С. 141-145.

#### References

- [1] G. Gotter, *Nagrevanie i ohlazhdenie elektricheskikh mashin [Heating and cooling of electrical machines]*. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1961 (in Russian).
- [2] L.M. Johnson, E.L. Brankato and H.P. Walker, “Navy’s philosophy of thermal classification of insulation materials and systems”, *Insulation*, vol. 9, no. 2, pp. 31-34, 1963.
- [3] N.F. Kotelenec and N.L. Kuznecov, *Ispytaniya i nadezhnost' elektricheskikh mashin [Testing and reliability of electrical machines]*. Moscow: Higher School, 1988 (in Russian).
- [4] G.A. Sipajlov, D.I. Sannikov and V.A. Zhadan, “*Teplovye, gidravlicheskie i aerodinamicheskie raschety v elektricheskikh mashinah [Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electrical machines]*”. Moscow: Higher School, 1989 (in Russian).
- [5] E.I. Gurevich, *Teplovye ispytaniya i issledovaniya elektricheskikh mashin [Thermal testing and research of electrical machines]*. Leningrad: Energiya, 1977 (in Russian).
- [6] G.K. Zherve, *Promyshlennyye ispytaniya elektricheskikh mashin [Industrial testing of electrical machines]*. Leningrad: Energiya, 1968 (in Russian).
- [7] I.F. Filippov, *Teploobmen v elektricheskikh mashinah [Heat transfer in electrical machines]*. Leningrad: Energoizdat, Leningrad Branch, 1986 (in Russian).
- [8] SHEftel' I.T. *Termorezistory [Thermistors]* - М.: Nauka, 1973. - 415 s.
- [9] Lineveg F. *Izmerenie temperatur v tekhnike. Spravochnik. Per. s nem. [Temperature measurement in technology]* М.: Metallurgiya, -1980.- 544 s.
- [10] I.F. Filippov, *Teploobmen v elektricheskikh mashinah [Heat transfer in electrical machines]*. *Uchebnoe posobie dlya VUZov*. L.: Energoatomizdat, Leningr. отделение, 1986 (in Russian).
- [11] M.M. Fedorov, V.E. Mihajlov and V.G. Parkesov, “*Osobennosti modelirovaniya teplovogo sostoyaniya dvigatelya v povtorno-kratkovremennom rezhime [Features of modeling the thermal state of an engine in intermittent short-term mode]*”, *Perspektivy razvitiya proizvodstva asinhronnykh dvigatelej [Prospects for the development of production of asynchronous motors]*, pp. 141-145, 1983 (in Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ  
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Рогожников Алексей Олегович**, старший преподаватель Камчатского государственного технического университета, г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация. **Alexey O. Rogozhnikov**, senior lecturer of the Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation.

**Рак Александр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент Камчатского государственного технического университета, г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация. **Alexander N. Rak**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation.

**Чье Ен Ун**, доктор технических наук, профессор Тихоокеанского государственного университета, г. Хабаровск, Российская Федерация. **Chye En Un**, Dr. Sci. (Eng.), professor of the Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation.

**Белов Олег Александрович**, кандидат технических наук, эксперт Научно-исследовательского института – Республиканского исследовательского научно-консультационного центра экспертизы, г. Москва, Российская Федерация. **Oleg A. Belov**, Cand. Sci. (Eng.), expert of the Research Institute – Republican Research Scientific and Consulting Center for Expertise, Moscow, Russian Federation.