

virtual enterprise management system]. *Nauch.-tekhn. vestn. Informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Nauch.-tekhn. vestn. Information technology, mechanics and optics], 2011. No. 5 (75). Pp. 105–111.

13. Kulikov D.D., Yablochnikov E.I. Primenenie otsenochnykh metrik dlya analiza tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva [Application of evaluative metrics for the analysis of technological preparation of production]. *Nauch.-tekhn. vestn. informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical. vestn. information technology, mechanics and optics], 2011. No. 6 (76). Pp. 109–112.

14. Gozbenko V.E. Metody upravleniya dinamiki mekhanicheskikh sistem na osnove vibratsionnykh polei i inertsiionnykh svyazei [Methods of controlling the dynamics of mechanical systems based on vibrational fields and inertial couplings]. Moscow, 2004.

15. Yablochnikov E.I., Fomina Yu.N., Salomatina A.A. Organizatsiya tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva v raspredelennoi srede [Organization of technological preparation of production in a distributed environment]. *Izv. vuzov. Priborostroenie* [Izv. universities. Instrumentation], 2010. Vol. 53. No. 6. Pp. 12–15.

16. Averin V.V., Gusel'nikov V.S. Avtomatizatsiya proektirovaniya upravlyayushchikh programm [Design automation of control programs]. *Izv. vuzov. Priborostroenie* [Proceedings of universities. Instrument-making], 2010. No. 6 (53). Pp. 67–71.

17. Voronenko V.P., Sedykh M.I., Shashin A.D. Proektirovanie i effektivnaya ekspluatatsiya proizvodstvennykh uchastkov mnogonomenklaturnogo mashinostroitel'nogo proizvodstva [Design and efficient operation of production areas of multi-product machine-building production]. *Vestnik RGATU imeni P.A. Solov'eva* [The Vestnik of P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University], 2017. No. 1 (40). Pp. 182–189.

18. Voronenko V.P., Shashin A.D. Planirovanie opytного proizvodstva s uchetom ego tekushchego sostoyaniya [Planning a pilot production taking into account its current state]. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii: Materialy V mezhdunarodnoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Computer-aided design in mechanical engineering: Proceedings of the V international correspondence scientific and practical conference]. Novokuznetsk: SRC MS Publ., 2017. No. 5. 134 p.

19. Madanov A.V. Analiz problem pri obrabotke detalei slozhnoi geometrii i putei ikh resheniya na etape tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva [Analysis of problems in processing parts of complex geometry and ways to solve them at the stage of technological preparation of production]. *Problemy nauki* [Problems of science], 2015. No. 1 (1). Pp. 14–16.

20. Budushchee mashinostroeniya Rossii [The future of mechanical engineering in Russia]. *Sbornik trudov Vserossiiskoi konferentsii molodykh uchennykh i spetsialistov* [Proceedings of the All-Russian conference of young scientists and specialists]. Bauman MSTU Publ., 2008. Pp. 48.

#### Информация об авторах

**Карлина Юлия Игоревна** – научный сотрудник Научно-исследовательской части, аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: karlinigor@mail.ru

**Хоменко Андрей Павлович** – д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: homenko\_ap@irgups.ru

#### Information about the authors

**Yuliya I. Karlina** – Research officer of the Research Department, Ph.D. student, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: karlinigor@mail.ru

**Andrei P. Khomenko** – Doctor in Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: homenko\_ap@irgups.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).36-43

УДК 621,3; 629.14

## Методологические аспекты информационного-измерительных комплексов функционального диагностирования динамических объектов электрифицированного железнодорожного транспорта

**М. С. Якубов**✉, **У. Ш. Исроилов**, **И. А. Каримов**

*Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Республика Узбекистан*

✉ etkmyakubov@yandex.ru

#### Резюме

В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты разработки математических моделей информационно-измерительных комплексов функционального диагностирования и мониторинга технологических объектов тяговых подстанций, а также установок и элементов контактной сети высокоскоростного движения с преимущественным акцентом применения инновационных технологий. Отмечены характеристики электроснабжения находящихся под влиянием сложных динамических и взаимосвязанных технологических режимов энергонапряженных объектов контактной сети и тяговых подстанций, рассредоточенных на большой площади, которые должны обеспечивать надежное функционирование по требуемой мощности и параметрам качества электроэнергии, а также безопасности и устойчивости процесса управления подвижного состава. Для обеспечения взаимосвязанных технико-технологических режимов с учетом многокритериальных оптимальных показателей и формирования решений показана целесообразность непрерывной функциональной диагностики объектов посредством применения современных информационно-измерительных комплексов. Отмечена важность для эксплуатации наличия не только встроенных систем и достаточно достоверных средств для функционального диагностирования технологических объектов электроснабжения, но и конкретных методологических

рекомендаций по обработке результатов измерения на основе аналитических законов распределения случайной величины с использованием нормально-гауссовского, экспоненциального, логарифмически нормального и Вейбулла – Гнеденко законов для более точного определения глубины применения интегрированных совместных диагностических признаков. Указана материальная основа нового информационно-измерительного комплекса на основе современных измерительных средств с высокими метрологическими, динамическими и надежностными характеристиками, которые обеспечиваются микропроцессорными устройствами с частотным выходом в канал передачи данных.

#### Ключевые слова

информационно-измерительный комплекс, функциональное диагностирование, диагностические признаки, динамические объекты, системы тягового электроснабжения, законы распределения случайных величин

#### Для цитирования

Якубов М. С. Методологические аспекты информационно-измерительных комплексов функционального диагностирования динамических объектов электрифицированного железнодорожного транспорта / М. С. Якубов, У. Ш. Исроилов, И. А. Каримов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 2 (70). – С. 36–43. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).36-43

#### Информация о статье

поступила в редакцию: 08.04.2021, поступила после рецензирования: 17.04.2021, принята к публикации: 21.04.2021

## Methodological aspects of information and measurement systems for functional diagnostics of dynamic objects of electrified railway transport

M. S. Yakubov✉, U. Sh. Isroilov, I. A. Karimov

Tashkent State Transport University, Tashkent, the Republic of Uzbekistan

✉ etkmyakubov@yandex.ru

#### Abstract

The article considers theoretical and practical aspects of developing mathematical models of information and measurement systems (IMS) of functional diagnostics and monitoring of propulsion substations and high-speed transmission systems and network components, with a preemptive focus on the application of innovative technologies. It notes the characteristics of the electricity supply, influenced by the complex dynamic and interconnected technological regimes of the energy-stressed units of contact and traction substations spread over a large area. They should provide reliable operation according to the required capacity and parameters of electrical quality, as well as safety and stability of the rolling stock management process. In order to ensure mutually coherent technical and technological regimes, taking into account multi-criteria optimum indicators and the formation of solutions, the usefulness of continuous functional diagnostics of objects with the application of modern information and measurement systems has been demonstrated. It is considered important to have not only built-in systems and sufficiently reliable means for functional diagnostics of technological power supply facilities, but also specific methodological recommendations for processing measurement results on the basis of analytical laws of random distribution using normal Gaussian, exponential, logarithmic normal and Weibull-Gnedenko laws to better define the application of integrated shared diagnostic features. The material framework of the new information and measurement system is specified on the basis of modern measuring means with high metrological, dynamic and reliable characteristics, provided by microprocessor devices with frequency output into the data transmission channel.

#### Keywords

information and measurement system, functional diagnostics, diagnostic features, dynamic objects, traction power supply systems, random values distribution laws

#### For citation

Yakubov M. S., Isroilov U. Sh., Karimov I. A. Metodologicheskie aspekty informatsionnogo-izmeritel'nykh kompleksov funktsional'nogo diagnostirovaniya dinamicheskikh ob'ektov elektrifitsirovannogo zheleznodorozhnogo transporta [Methodological aspects of information and measurement systems for functional diagnostics of dynamic objects of electrified railway transport]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 2 (70), pp. 36–43. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.2(70).36-43

#### Article Info

Received: 08.04.2021, Revised: 17.04.2021, Accepted: 21.04.2021

#### Введение

Эффективность функционального диагностирования динамических объектов электрифицированного

железнодорожного транспорта зависит от того, насколько разрешен вопрос получения достоверной измерительной информации об их техническом со-

стоянии, т. е. измеримостью, информативностью и инвариантностью диагностических признаков.

Под измеримостью понимают прямое измерение с помощью соответствующего датчика. Информативность означает наличие существенной информации о дефектах объекта и возможность количественного определения их характеристик. Свойство инвариантности характеризует нечувствительность к помехам возмущения [1–3].

Железнодорожный транспорт является фундаментальной отраслью экономики, обеспечивающей топливными, сырьевыми ресурсами промышленность, энергетику, сельское хозяйство, сферу перевозки пассажиров, он приносит существенную часть валютных поступлений.

Важнейшей частью тягового электроснабжения железной дороги является единая система контактной сети, питаемая тяговыми подстанциями, имеющими между собой технологические границы. Каждая часть тягового электроснабжения – исключительно сложная система, состоящая из рассредоточенных на большой площади тяговых подстанций и контактной сети [4, 5].

Система электроснабжения железной дороги должна обеспечивать устойчивое, надежное функционирование всех технологических объектов, устройств, которое заключается в обеспечении требуемой мощности и параметров качества электроэнергии: симметричности, синусоидальности, минимальных потерь электроэнергии посредством снижения потребления реактивной мощности, за счет экономической эффективности технического обслуживания и ремонта, а также повышения безопасности и устойчивости процесса управления подвижным составом.

Устойчивость и надежность электроснабжения обеспечивается путем использования информационно-измерительных систем автоматического регулирования и управления, а также системой оперативно-диспетчерского управления [5, 6].

В условиях большой протяженности контактной системы, высокого напряжения (27,5 кВ) и больших токов (порядка 500 А и более), многообразия и стохастического характера воздействия различных факторов возрастают требования к их эксплуатационной надежности, а, следовательно, и повышению надежности информационно-измерительных систем.

Из анализа статистики аварийных ситуаций, возникающих в системе тягового электроснабжения, видно, что основная часть повреждений и аварий различной степени сложности происходит в тяговой подвеске из-за износа контактного провода (более 232), обрыва струн (13 %), неисправностей зажимов и деталей (5,3 %), несущего троса (11,2 %), воздушных стрелок (3,4 %), анкеров и оттяжки (5,4 %) и др. [3].

Однако повреждения и отказы происходят и в установках тяговых подстанций, работающих в непрерывно энергонапряженном режиме: высоко-

вольтные выключатели (42 %), тяговые трансформаторы (16,4 %), разъединители и отделители (17,6 %), измерительные трансформаторы тока и напряжения (18,9 %). Отказы энергоустановок сопряжены, как правило, со значительным материальным и экономическим ущербом.

Задача обеспечения надежности, безопасности и эффективности энергоустановок непосредственно связана с применением инновационных информационно-измерительных комплексов (ИИК). При их функциональном диагностировании в системе тягового электроснабжения должно происходить формирование нового ИИК, который должен изменить роль существующей информации во всех его технологических процессах [1, 2, 7].

Материальной основой новой информационной среды будет ИИК с современными измерительными средствами, с высокими метрологическими и динамическими характеристиками, обеспечиваемыми микропроцессорными устройствами с выходом в канал передачи данных [6].

Новая информационная среда создаст условия для эффективного повышения функционального диагностирования технического состояния объектов электроснабжения и более точечных оценок надежности электроустановок.

Можно утверждать, что качество ИИК, особенно виброакустического диагностирования, определяется как метрологическими и надежностными характеристиками измерительных средств, так и информационными параметрами обрабатываемых массивов [8–12].

Для повышения качества информационного обеспечения функционального диагностирования и новой информационной среды необходимо совершенствовать математические модели обработки результатов измерения [11–14].

Изложенные факты обосновывают актуальность рассматриваемой в работе проблемы разработки теоретических и методических основ построения многофункционального ИИК, предназначенного для применения функционального диагностирования объектов тягового электроснабжения, создания самой системы в виде аппаратно-программной среды. Для решения указанной проблемы необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить и системно проанализировать недостатки существующих информационно-измерительных систем, разработать теоретические и методологические основы построения многофункционального ИИК, являющегося одним из основных факторов высокой надежности функционального диагностирования объектов тягового электроснабжения.

2. Разработать математическую модель, описывающую энергетические процессы, происходящие при групповом движении высокоскоростного электроподвижного состава (ЭПС) в магистральных путях, которая позволит обосновать метрологические, дина-

мические и надежностные характеристики применяемых датчиков и преобразователей в системе функционального диагностирования.

3. С учетом структуры многофункционального ИИК, его особенностей и специфики объектов электроснабжения необходимо разработать алгоритмы сбора измерительной информации, ее обработки и выдачи во все компоненты информационно-управляющих систем функционального диагностирования динамических объектов тягового электроснабжения.

4. Разработать ИИК для функционального диагностирования системы отдельных участков и объектов тягового электроснабжения, с помощью которого появится возможность проводить не только процесс мониторинга технического состояния, но и решать оперативно-диспетчерские задачи и задачи оптимизационного управления, начиная с обнаружения неисправностей и отказов на ранних стадиях их возникновения.

Кратко остановимся на анализе диагностических моделей функционального диагностирования динамических объектов с последующей разработкой требований, предъявляемых к техническим средствам ИИК.

Известны наиболее распространенные математические модели функционального диагностирования динамических объектов с возможностью использования также в системе тягового электроснабжения:

- графические и логические модели;
- модели в виде конечных автоматов и сетей

Петро;

- линейные динамические модели;
- нелинейные динамические модели [1, 4, 11, 13, 15].

Независимо от выбора той или иной модели диагностирования выбор совокупности измеряемых диагностических параметров является самым ответственным этапом, от которого во многом зависит качество и точность функционального диагностирования.

К графическим моделям относится функциональная виброакустическая диагностика всех агрегатов, представляющая собой комплекс измерительно-информационных закономерностей, виброакустических характеристик и связей между ними, которые образуют систему диагностирования в рабочем режиме. Функциональная виброакустическая диагностика состоит из следующих взаимосвязанных элементов: объекта, вибродиагностических параметров и показателей, средств измерения, математических моделей и алгоритмов диагностирования [19–21].

В качестве контролируемых параметров моделей и алгоритмов роторных агрегатов используются средние квадратические значения: виброускорение  $\frac{d^2S(t)}{dt^2}$  – вторая производная виброперемещения во

времени; виброскорость  $\frac{dS(t)}{dt}$ ; виброперемещение

$S(t)$  – значение координат положения точки вибрации; частота вращения колесной пары  $\Omega$ .

Как показывает практика, нецелесообразно уменьшать количество измерительных точек, а, следовательно, и число датчиков вибрации, так как сильно выраженной корреляции между различными измерительными точками не обнаруживается [10, 12].

Существует множество различных диагностических комплексов, однако применяемые в них методики диагностирования и их программно-аппаратная база обеспечивают недостаточный уровень достоверности диагностирования [7, 9]. Достоверность в системе вибродиагностики измерительных средств с высокими метрологическими характеристиками можно повысить, применяя более совершенные алгоритмы и полностью исключив влияние оператора на постановку диагноза.

Механическая вибрация описывается обычно матричной системой уравнений:

$$[A]\{\ddot{q}\} + [B]\{\dot{q}\} + [C]\{q\} = [h]\{\ddot{q}, \dot{q}, t\} = \mu\{P(t)\} + \{H(\ddot{q}, \dot{q}, t)\},$$

где  $[A]$ ,  $[B]$ ,  $[C]$  – квадратные матрицы с постоянными коэффициентами;  $\{q\}$  – вектор обобщенных координат;  $\{h\}$  – вектор нелинейных и параметрических членов  $\{h(\ddot{q}, \dot{q}, t)\}$  и внешних возбуждающих сил  $\{P(t)\}$ ;  $\mu$  – малый параметр [10].

Анализ уравнения (1) показывает что частотный состав вибросигнала характеризуется виброускорением  $[A] = \{\ddot{q}\}$ , виброскоростью –  $[B] = \{\dot{q}\}$  и виброперемещением  $[C] = \{q\}$ . Обычно на практике измеряют основную составляющую – виброскорость. Виброускорение  $A$  является более чувствительным составляющим спектра вибрации, виброперемещение  $C$  характеризует более низкочастотную составляющую вибрации. Отсюда видно, что параметры  $A$ ,  $B$ ,  $C$  отражают различные виды дефектов, поэтому для адекватного представления диагностируемого оборудования измеряют их все [7, 9, 12]. Наряду с теоретическими исследованиями в области функционального диагностирования сложных объектов интенсивно ведется прикладное диагностирование разнообразных динамических устройств, таких как автоматическое регулирование напряжения тяговых подстанций, колесномоторных блоков, систем тягового управления электрического подвижного состава и другие бортовые автоматизированные системы контроля, предназначенные для непрерывной проверки технического состояния, имеющие в своем составе информационно-измерительное оборудование, обеспечивающие получение информации об основных параметрах проверяемых систем, включающие вычислительные

устройства и реализующие алгоритмы диагностики [6].

С точки зрения функционального диагностирования ИИК целесообразно подразделить на две системы: измерительную систему (ИС), состоящую из нескольких датчиков, измеряющих различные физические величины, и информационно-вычислительную систему (ИВС), предназначенную для формирования диагностических признаков путем решения математических вычислений и проблемных алгоритмов для указания места отклонений и их величины от допустимых параметров.

Для определения закона распределения значений диагностических признаков по полученным опытным экспериментальным данным и проведения расчетов плотности распределения вероятностей целесообразно использовать нормальное, экспоненциальное распределение, логарифмическое нормальное распре-

деление и распределение Вейбулла – Гнеденко [16].

Далее приведены аналитические выражения различных моментов для определения диагностических признаков, характеризующих техническое состояние (табл.). Применение функциональной диагностики в качестве метода определения фактического технического состояния динамических объектов требует проведения предварительных исследований законов распределения случайных величин, характеризующих техническое состояние агрегатов и основных узлов, разработки диагностических признаков и их измерения с целью достоверного определения и эксплуатационной готовности объекта.

В части проектирования и эксплуатации средств функционального диагностирования эти требования должны характеризоваться следующими показателями [3, 4, 9, 10]:

– номинальными допустимыми значениями вход-

### Законы распределения непрерывной случайной величины для определения диагностических признаков

#### The laws of distribution of a continuous random value to determine diagnostic features

Закон распределения	Область значений случ. величины	Аналитическое выражения функционального распределения, $F(x)$	Определяющие параметры	Аналитическое выражение плотности, $p(x)$	Применение
Нормальный гауссовский закон	$-\infty < \infty$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp \cdot \left[ -\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right] dx$	$m$ – математическое ожидание; $\sigma = \sqrt{D}$ – среднее квадратическое отклонение; $D$ – дисперсия	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \cdot \left[ -\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right]$	Этот закон хорошо описывает постепенные отказы, когда распределение времени безотказной работы в начале имеет низкую плотность, затем максимальную и потом плотность снижается из-за износа и старения
Экспоненциальный	$0 \leq x < \infty$	$\int_0^x \lambda \exp[-\lambda x] dx$	$\lambda(t)$ – параметр распределения, (интенсивность отказа)	$\lambda e^{-\lambda x}$	Экспоненциальным законом распределения вероятности можно описывать время безотказной работы сложных технических объектов
Логарифмический и нормальный	$0 \leq x < \infty$	$\frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp \cdot \left[ -\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] dx$	$m, \sigma$	$\frac{\log e}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \cdot \left[ -\frac{(\log x - m)^2}{2\sigma^2} \right];$ $m = M(\log x);$ $\sigma = D(\log x).$	В машиностроении и в сложных электроэнергетических системах в период наступления усталости, вследствие изнашивания электроизоляции между отказами, а также в процессе восстановления нашло логарифмически нормальное распределение
Вейбулла – Гнеденко	$0 \leq x < \infty$	$\frac{\beta}{\alpha} \int_0^x \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot e \left[ -\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta \right] dx$	$c > 0, \alpha > 0$ – соответственно параметры масштаба и формулы	$c\alpha x^{\alpha-1} e^{-cx\alpha}$	Для описания многоциклового усталости систем радиоэлектронного, электромашинного управления подвижного состава

ных и выходных сигналов в пределах поля допуска;  
 – статической и динамической точностью измерения, глубиной диагностирования;  
 – достоверностью;  
 – технической и метрологической надежностью (метрологической совместимостью и унификацией выходного сигнала);  
 – способом связи с объектом диагностирования;  
 – формой представления результатов.

Унификация приведет к объединению приборов в комплексы и присоединению датчиков к персональному компьютеру.

Функциональная вибродиагностика колесно-моторных блоков (и вообще подшипниковых узлов роторных машин) на основе спектрального анализа амплитуды отдельных гармоник вибрационного сигнала при применении быстрого преобразования Фурье является самым распространенным методом, позволяющим достоверно определять с вероятностью 70–80 % основные дефекты [5, 9, 10].

Главными недостатками вибродиагностики роторных машин является слабое определение электро-механических дефектов обмотки статора электродвигателей. Показано, что до 80 % электродвигателей выходят из строя из-за дефектов обмотки статора [4, 11, 15]. Методы акустической эмиссии также недостаточно чувствительны именно к электро-механическим параметрам двигателей [4].

Одним из эффективных методов функционального диагностирования асинхронных двигателей является спектральный анализ амплитудно-модулированного тока его статорной обмотки [11, 14, 15].

Установлено, что параметры амплитудно-модулированного тока статора в значительной мере определяются статическим и динамическим эксцентритетом ротора, повреждениями стержней ротора, электродинамической деформацией обмоток статора электродвигателя в результате коротких замыканий, а также механическими повреждениями магнитной системы. Применением прямого преобразования Фурье амплитудно-модулированного тока обмотки статора получено выражение спектральной плотности  $F(\omega)$  независимой случайной величины  $x$  с известным математическим ожиданием, среднеквадратическим отклонением и дисперсией  $\sigma^2$ . С учетом приведенного белого гауссовского шума  $n(t)$  спектральная плотность  $F(\omega)$  представлена в следующем виде:

$$F(\omega) = \frac{\sigma_\lambda^2}{\alpha} e^{\alpha\phi} \left\{ \sigma_\lambda^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\phi^2)^n (n + D_{cp})}{n! [(n + D_{cp})^2 + \Omega^2]} + \left( 1 - 2\sigma_\phi^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\phi^2)^n (n + 1 + D_{cp})}{n! [(n + 1 + D_{cp})^2 + \Omega^2]} \right) + 2\sigma_\phi^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\sigma_\phi^2)^n (n + 2 + D_{cp})}{n! [(n + 2 + D_{cp})^2 + \Omega^2]} \right\};$$

где  $\sigma_\lambda^2 = \sigma_\phi^2 M_{am}^2$ ;  $\sigma_\lambda^2 = \sigma_\phi^2 M_{\phi m}^2$ ;  $M_{am}, M_{\phi m}$  – постоянные коэффициенты амплитудных и фазовых модуляций соответственно;  $D_{cp} = \frac{1}{4\alpha} N_\phi$ ;  $N_\phi$  – флуктуация фазы;  $\Omega = (\omega - \omega_0) / \alpha$ ;  $\Omega = n / 60$  – частота модуляции;  $\omega_0$  – круговая частота напряжения питания;  $n$  – скорость вращения ротора;  $\phi$  – начальная фаза;  $\omega > 0$ ,  $\alpha$  – независимая случайная величина с известным математическим ожиданием ( $m_\infty = 0$ ) и дисперсией ( $\sigma^2$ ) [17].

Несмотря на универсальность метода спектрального анализа тока асинхронного электродвигателя, этот метод является сложным по оценке диагностических параметров, в частности, из-за отсутствия возможности увеличения числа анализируемых гармоник в связи с наложением частотной составляющей от различных повреждений [5]. Для исключения наложения дефектов вследствие наличия одновременных повреждений применяется спектральный метод векторов Парка тока (PI) и напряжения (PU) [11], что и является перспективным направлением его использования для целей функционального диагностирования асинхронных двигателей, постоянно работающих с частыми пусками и торможениями [6].

Вариантом функционального диагностирования может служить появление определенных гармоник в спектре их внешнего магнитного поля [17]. Наличие в высшем магнитном поле двигателя гармоник  $k - 1$ ,  $k + 1$  является диагностическим признаком погрешностей подшипников, а наличие  $3k$ -гармоник – признаком межвитковых замыканий обмоток статора. Основной недостаток метода внешнего магнитного поля заключается в том, что применяться он может только для диагностирования асинхронных двигателей с немагнитическим корпусом.

## Заключение

Отличительной особенностью ИИК, предназначенного для фундаментального диагностирования динамических объектов электрифицированного железнодорожного транспорта, является работа в энергонапряженном режиме под относительно большими величинами магнитной индукции и электрической напряженности, а также несимметричном и несинусоидальном режиме. Это обуславливает повышенные требования к метрологическим, динамическим и надежностным характеристикам измерительных средств. Для формирования диагностических признаков обоснована целесообразность применения нормального гауссовского, экспоненциального, логарифмически нормального распределения и распределения Вейбулла – Гнеденко.

## Список литературы

1. Мироновский Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем. СПб. Изд-во МГУ-Гриф, 1998. 256 с.
2. Якубов М.С. Мостовые преобразователи параметров комплексного сопротивления объектов железнодорожного транспорта. Ташкент : Fan va texnologiya, 2017. 184 с.
3. Четвергов В.А. Техническая диагностика локомотивов-М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп, 2014. 371 с.
4. Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации // Вестн. ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2013. № 7. С. 127–135.
5. Зеленченко А.Л., Федоров Д.В. Диагностические комплексы электрического подвижного состава. М. : УМЦ по образованию на ж.-д. трансп, 2014. 112 с.
6. Плакс А.В. Системы управления электрическим подвижным составом. М. : Маршрут, 2005. 360 с.
7. Костиков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2014. 378 с.
8. Зайцев А.В. Определение возможности уменьшения числа датчиков вибрации при диагностировании // Наука, образование, бизнес : регион. науч.-практ. конф. Омск, 2009. С. 154–157.
9. Барков А.В. Вибрационная диагностика колесно-редукторных блоков на железнодорожном транспорте / А.В. Барков и др. СПб. Изд. Центр СПбМТУ, 2002. 103 с.
10. Randall R.B. Vibration-based condition monitoring industrial, aerospace and Automotive applications. Chichester, United Kingdom : John Wiley & Sons, 2011. 289 p.
11. Петухов В. Диагностика электродвигателей спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения. // Новости электротехники. 2008. № 1(50). С. 33–37.
12. Taylor Y.Y. The Vibration Analysis Handbook. Hawthorne : Vibration Consultants, 2003. 375 p.
13. Якубов М.С., Файзуллаев Ж.С. Информационно-математическая модель диагностирования эксплуатационного режима тягового электродвигателя // Химическая технология. Контроль и управление. 2018. № 3. С. 85–92.
14. Петухов В. Диагностика состояния электродвигателей: Метод контрольного анализа потребляемого тока // Новости электротехники. 2005. № 1(31). С. 23–28.
15. Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по нестационарным режимам работы / В.В. Кунцов и др. // Вестник Юж. урал. гос. ун-та. 2009. № 34 (167). С. 123–129.
16. ГОСТ-17509-72 Надежность изделий машиностроения. Система сбора и обработки информации, методы определения точечных оценок показателей надежности по результатам наблюдений. Введ. 1973–01–01. М. : Изд-во стандартов, 1974. 57 с.
17. Тонких В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа их внешнего магнитного поля. Барнаул, 2009. 181 с.
18. Статистическая радиотехника. Примеры и задачи / В.Т. Горяинов и др. М. : Сов. Радио, 1980. 544 с.
19. Vibration analysis as a diagnosis tool for health monitoring of industrial machines / J. P. Amezquita-Sanchez, D. Morinigo-Sotelo et al. // Hindawi. DOI:10.1155/2016/1235139.
20. Trout J. Vibration analysis explained. URL: <https://www.reliableplant.com/vibration-analysis-31569> (access date: 12.03.2021).
21. Vibration condition monitoring techniques for fault diagnosis of electromotor with 1,5 kW power / H. Mohamadi Monavar, H. Ahmadi, S.S. Mohtasebi et al. // Journal of Applied Sciences. DOI:10.3923/jas.2008.1268.1273.

## References

1. Mironovskii L.A. Funktsional'noe diagnostirovanie dinamicheskikh system [Functional diagnostics of dynamic systems]. St. Petersburg, 1998. 256 p.
2. Yakubov M.S. Mostovye preobrazovateli parametrov kompleksnogo soprotivleniya ob"ektov zheleznodorozhnogo transporta [Bridge converters of parameters of complex resistance of railway transport objects]. Fan va texnologiya Publ., 2017. 184 p.
3. Chetvergov V.A. Tekhnicheskaya diagnostika lokomotivov [Technical diagnostics of locomotives]. Moscow: FGBOU Educational-Methodical Center of Education Publ., 2014. 71 p.
4. Sidel'nikov L.G., Afanas'ev D.O. Obzor metodov kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya asinkhronnykh dvigatelei v protsesse ekspluatatsii [Review of methods of monitoring the technical state of asynchronous motors during operation]. Vestnik PNIPIU. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo [Bulletin of PNIPIU. Geology. Oil and gas and mining], 2013. No. 7. Pp. 127–135.
5. Zelenchenko A.L., Fedorov D.V. Diagnosticheskie komplekxy elektricheskogo podvizhnogo sostava [Diagnostic complexes for electric rolling stock]. Moscow: FGBOU Publ., 2014. 112 p.
6. Plaks A.V. Sistemy upravleniya elektricheskim podvizhnym sostavom [Control systems for electric rolling stock]. Moscow: Marshrut Publ., 2005. 360 p.
7. Kostikov V.N., Naumenko A.P. Osnovy vibroakusticheskoi diagnostiki i monitoringa mashin [Fundamentals of vibroacoustic diagnostics and machine monitoring]. GOU Omsk State Technical University. Novosibirsk: SORAN Publ., 2014. 378 p.
8. Zaitsev A.V. Opredelenie vozmozhnosti umen'shcheniya chisla datchikov vibratsii pri diagnostirovanii [Determination of the possibility of reducing the number of vibration sensors during diagnosis]. Nauka, obrazovanie, biznes. Regional'naya nauch.-prak. konf. [Science, education, business: regional scientific-practical. conf.]. Omsk, 2009. Pp. 154–157.
9. Barkov A.V. et al. Vibratsionnaya diagnostika kolesno-reduktornykh blokov na zheleznodorozhnom transporte [Vibration diagnostics of wheel-gear units on railway transport]. St. Petersburg: SPBMTU Publ. center, 2002. 103 p.

10. Randall R.B. Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications. John Wiley & Sons. March 2011, 289 p.
11. Petukhov V. Diagnostika elektrodvigatelei. spektral'nyi analiz modulei vektorov Parka toka i napryazheniya [Diagnostics of electric motors. Spectral analysis of modules of vectors of the Park of current and voltage]. *Novosti elektrotehniki [Electrical Engineering News]*, 2008. No. 1(50). Pp. 33–37.
12. Taylor Y.Y. The Vibration Analysis Handbook. VC1, 2003. 375 p.
13. Yakubov M.S., Faizullaev Zh.S. Informatsionno-matematicheskaya model' diagnostirovaniya ekspluatatsionnogo rezhima tyagovogo elektrodvigateleya [Information-mathematical model for diagnosing the operating mode of a traction motor]. *Mezhdunarodnyi zhurnal «Khimicheskaya tekhnologiya. Kontrol' i upravlenie» [International journal "Chemical technology. Control and management"]*, 2018. No. 3. Pp. 85–92.
14. Petukhov V. Diagnostika sostoyaniya elektrodvigatelei: Metod kontrol'nogo analiza potrebyaemogo toka [Diagnostics of the state of electric motors: A method of control analysis of the consumed current]. *Novosti elektrotehniki [Electrical Engineering News]*, 2005. No. 1(31). Pp. 23–28.
15. Kuntsov V.V. et al. Razrabotka metodiki tokovoi diagnostiki asinkhronnykh dvigatelei po nestatsionarnym rezhimam raboty [Development of a methodology for current diagnostics of asynchronous motors by non-stationary operating modes] *Vestnik Yuzh. Ural. gos. un-ta [The bulletin of South Ural State University]*, 2009. No. 34 (167). Pp. 123–129.
16. GOST-17509-72 Nadezhnost' izdelii mashinostroeniya. Sistema sbora i obrabotki informatsii, metody opredeleniya tochnykh otsenok pokazatelei nadyozhnosti po rezul'tatom nablyudenii [GOST-17509-72. Reliability of mechanical engineering products. System for collecting and processing information, methods for determining point estimates of reliability indicators based on the results of observations]. 1972. 57 p.
17. Tonkikh V.G. Metod diagnostiki asinkhronnykh elektrodvigatelei v sel'skom khozyaystve na osnove analiza ikh vneshnego magnitnogo polya [A method of diagnostics of asynchronous electric motors in agriculture based on the analysis of their external magnetic field]. Barnaul, 2009. 181 p.
18. Goryainov V.T. Statisticheskaya radiotekhnika. Primery i zadashi [Statistical radio engineering. Examples and problems]. Moscow: Sov. Radio Publ., 1980. 544 p.
19. Juan Pablo Amezcua-Sanchez, Daniel Morinigo-Sotelo, Konstantinos N. Vibration analysis as a diagnosis tool for health monitoring of industrial machines [electronic media]. URL: <https://www.hindawi.com/journals/sv/about/>.
20. Trout J. Vibration analysis explained [Electronic media]. URL: <https://www.reliableplant.com/vibration-analysis-31569>.
21. Mohamadi Monavar H., Ahmadi H., Mohtasebi S.S. and Hasani S. "Vibration condition monitoring techniques for fault diagnosis of electromotor with 1,5 kW power [Electronic media]. URL: <https://scialert.net/abstract/?doi=jas.2008.1268.1273>.

### Информация об авторах

**Якубов Мирджалил Сагатович** – канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: [etkmyakubov@yandex.ru](mailto:etkmyakubov@yandex.ru)

**Исроилов Улугбек Шавкатович** – старший преподаватель кафедры электротехники, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: [etkmyakubov@yandex.ru](mailto:etkmyakubov@yandex.ru)

**Каримов Ислом Азим угли** – ассистент кафедры электроснабжения, Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, e-mail: [Smartstar3009101@gmail.com](mailto:Smartstar3009101@gmail.com)

### Information about the authors

**Mirdzhalil S. Yakubov** – Ph. D. of Engineering Science, Professor, Professor of the Subdepartment of Power Supply, Tashkent State Transport University, Tashkent, e-mail: [etkmyakubov@yandex.ru](mailto:etkmyakubov@yandex.ru)

**Ulugbek Sh. Isroilov** – Senior Lecturer of the Subdepartment of Electrical Engineering, Tashkent State Transport University, Tashkent, e-mail: [etkmyakubov@yandex.ru](mailto:etkmyakubov@yandex.ru)

**Islom Azim ugli Karimov** – assistant of the Subdepartment of Power Supply, Tashkent State Transport University, Tashkent, e-mail: [Smartstar3009101@gmail.com](mailto:Smartstar3009101@gmail.com)

DOI 10.26731/1813-9108.2021.2(70).43-51

УДК 621.311.6

## Устойчивость работы параметрического умножителя числа фаз на основной частоте

**И. М. Бедрицкий, К. К. Жураева, Л. Х. Базаров**

*Ташкентский государственный транспортный университет, г. Ташкент, Республика Узбекистан*

### Резюме

Умножители числа фаз находят применение в устройствах автоматики, радиоэлектронной аппаратуры, средств связи в случаях, когда нет возможности воспользоваться многофазными цепями или их применение связано с определенными техническими или экономическими трудностями. Наибольшее распространение получили устройства такого типа в виде умножителя числа фаз, которые находят применение в однофазных цепях для питания трехфазных потребителей. С точки зрения схемотехники, наиболее простыми являются умножители числа фаз на базе нелинейных LC-цепей, имеющие высокую надежность и относительно невысокие габариты при питании устройств малой и средней мощности. Однако умножители числа фаз на базе LC-цепей при определенных условиях могут работать в резонансных режимах, следовательно, в них могут возникать скачки напряжений или токов. В статье рассматривается работа параметрического умножителя числа фаз, работающего на основной частоте, находящего применение в однофазных цепях для питания трех-