

УДК 621.311.25

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_18

## ДИАГНОСТИКА ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ТОКОВ СТАТОРА

**А.Д. Данилов**

ORCID: 0000-0002-1534-5285 e-mail: [danilov-ad@yandex.ru](mailto:danilov-ad@yandex.ru)

Воронежский государственный технический университет  
*Воронеж, Россия*

**А.И. Зимин**

ORCID: 0000-0002-1532-672X e-mail: [ziminai@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:ziminai@nvnpp1.rosenergoatom.ru)  
АО «Концерн Росэнергоатом». Филиал «Нововоронежская атомная станция»  
*Нововоронеж, Россия*

**Д.А. Ширяев**

ORCID: 0009-0006-7553-7736 e-mail: [shiryaevda@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:shiryaevda@nvnpp1.rosenergoatom.ru)  
АО «Концерн Росэнергоатом». Филиал «Нововоронежская атомная станция»  
*Нововоронеж, Россия*

**Д.М. Волков**

e-mail: [volkovdm@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:volkovdm@nvnpp1.rosenergoatom.ru)  
АО «Концерн Росэнергоатом». Филиал «Нововоронежская атомная станция»  
*Нововоронеж, Россия*

Широкое применение реакторов ВВЭР-1200 в мировой энергетике ставит задачу повышения их надежности и эксплуатационной безопасности. Основным требованием при этом является референтность блоков, а также наличие всех постфукусимских требований по обеспечению безопасности энергоблоков поколения 3+. В связи с этим рассматривается проблема обработки и глубокого анализа данных электрических параметров турбогенератора, которая является одной из основных в виду большого объема информации и сложности получения нужного результата без участия оператора. Запуск регистраторов аварийных событий происходит при достижении контролируемой величины заданного значения, либо осуществляется запись всего процесса работы, но с очень большим временем дискретизации. За время эксплуатации турбогенераторов известны случаи серьезных аварий, которые привели к финансовым потерям и невыработке электрической энергии. Современные системы контроля и диагностики генераторов являются неотъемлемой частью обслуживания, без которого невозможна эксплуатация атомной электростанции. В настоящее время широко применяются методы диагностики электродвигателей, которые сформированы на проведении отслеживания и оценки потребляемого тока, с дальнейшим проведением спектрального анализа полученной информации. Данный

вид анализа позволяет с высокой вероятностью определить вид, тип и характер повреждения оборудования, как в механической, так и в электрической части. При таком способе диагностики предметом изучения являются гармонические составляющие в токах статора. Данный вид наблюдений особенно актуален для турбогенераторов большой мощности.

В настоящее время на энергоблоках последнего поколения с реакторными установками типа ВВЭР-1200 не применяется в полной мере спектральный анализ токов турбогенератора, отсутствует системный подход к обработке полученных результатов в течение длительного периода. Для воплощения в жизнь этой важной функции диагностики и полноценной обработки результатов необходимо создать методику, которая позволит в полном объеме оценить состояние турбогенератора в процессе работы. От состояния турбогенератора напрямую зависит уровень безопасности атомной электростанции и количество выработанной электроэнергии. Данная проблема особенно актуальна в настоящее время, так как увеличивается межремонтный период энергоблоков с реакторными установками типа ВВЭР-1200 с одного года до полутора лет. С помощью качественной диагностики, когда оборудование находится в работе, можно сформировать новый подход к организации технического обслуживания и планированию затрат на плановый ремонт энергоблоков.

**Ключевые слова:** диагностика, осциллограмма, регистратор, спектральный анализ, турбогенератор, энергоблок.

**Для цитирования:** А.Д. Данилов, А.И. Зимин, Д.А. Ширяев, Д.М. Волков. Диагностика турбогенераторов большой мощности методом спектрального анализа токов статора // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 18-30. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_18

## **DIAGNOSTICS OF HIGH-POWER TURBO GENERATORS BY THE METHOD OF SPECTRAL ANALYSIS OF STATOR CURRENTS**

**A.D. Danilov**

ORCID: **0000-0002-1534-5285** e-mail: **danilov-ad@yandex.ru**  
Voronezh State Technical University  
*Voronezh, Russia*

**A.I. Zimin**

ORCID: **0000-0002-1532-672X** e-mail: **ziminai@nvnpp1.rosenergoatom.ru**  
JSC "Rosenergoatom". Novovoronezh Nuclear Power Plant  
*Novovoronezh, Russia*

**D.A. Shiryaev**

ORCID: **0009-0006-7553-7736** e-mail: **Shiryaevda@nvnpp1.rosenergoatom.ru**  
JSC "Rosenergoatom". Novovoronezh Nuclear Power Plant  
*Novovoronezh, Russia*

**D.M. Volkov**

e-mail: volkovdm@nvnpp1.rosenergoatom.ru  
JSC “Rosenergoatom”. Novovoronezh Nuclear Power Plant  
*Novovoronezh, Russia*

**Abstract:** The widespread use of VVER-1200 reactors in the global energy sector poses the task of increasing their reliability and operational safety. The main requirement in this case is the referency of the blocks, as well as the presence of all post-Fukushima requirements to ensure the safety of generation 3+ energy blocks. In this regard, the article deals with the problem of processing and in-depth analysis of the data of the electrical parameters of the turbo generator, which is one of the main ones in view of the large amount of information and the complexity of obtaining the desired result without the participation of the operator. The launch of the emergency event recorders occurs when the controlled value of the set value is reached, or the entire operation process is recorded, but with a very long sampling time. There have been cases of serious accidents that have led to financial losses and under-production of electrical energy during the operation of turbo generators. Modern control and diagnostic systems of generators are an integral part of the equipment, without which the operation of nuclear power plants is not possible. To date, methods of diagnostics of electric motors are widely used, which are formed on tracking and evaluating the current consumed, with further spectral analysis of the information received. This type of analysis makes it possible to determine with high probability the type and nature of equipment damage, both in the mechanical and electrical parts. The harmonic components in the stator currents are the subject of study in this method of diagnosis. This type of observation is especially relevant for high-power turbo generators.

At present, the spectral analysis of turbogenerator currents is not fully applied on the power units of the latest generation with the VVER-1200 type reactor plant, or rather, there is no systematic approach to processing the results obtained over a long period. In order to implement this important diagnostic function and fully process the results, it is necessary to create a methodology that will allow to fully assess the condition of the turbo generator during operation. The safety level of the nuclear power plant and the amount of electricity generated directly depends on the condition of the turbo generator. This problem is particularly relevant at the present time, as the inter-repair period of power units with a VVER-1200-type reactor plant increases from one year to one and a half years. It is possible to form a new approach to the organization of maintenance and cost planning for the planned repair of power units using high-quality diagnostics for equipment is in operation.

**Keywords:** diagnostics, oscillogram, recorder, spectral analysis, turbogenerator, power unit.

**For citation:** A.D. Danilov, A.I. Zimin, D.A. Shiryayev and D.M. Volkov, “Diagnostics of high-power turbo generators by the method of spectral analysis of stator currents”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 18-30, 2023.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_4\_18

## **I. Введение**

Основная цель данной статьи заключается в проведении анализа имеющихся систем и защит турбогенератора на энергоблоках Нововоронежской (НВ) атомной электростанции (АЭС) с реакторами типа ВВЭР-1200, которые способны сигнализировать о его состоянии в процессе эксплуатации, а также сформировать представление о достаточности применяемых методик исследования.

В типовом проекте НВ АЭС-2 применен шестифазный генератор с двумя статорными обмотками, сдвинутыми друг относительно друга на угол 30 электрических градусов. В блоке с генератором установлен повышающий блочный трансформатор, состоящий из группы трех однофазных трансформаторов, обмотки которых соединены в трехфазную группу.

Линейные выводы трехфазных составляющих шестифазной обмотки статора посредством пофазно-экранированных воздушных токопроводов подключены через генераторные выключатели к обмоткам низкого напряжения блочного трансформатора, образуя две генераторные цепи.

Для реализации 100 %-ой защиты (с наложением 20 Гц) обмоток статора генератора от замыканий на землю проектом предусмотрено высокоомное резистивное заземление нейтрали сети генераторного напряжения. Оборудование заземления нейтрали установлено для каждой из генераторных цепей и включает в свой состав группы из трех однофазных трансформаторов и резисторов в их вторичных цепях. Первичные обмотки трансформаторов подключаются пофазно к соответствующим фазам обмоток статора. Вторичные обмотки трансформаторов собраны по схеме разомкнутого треугольника, к выводам которого подключен резистор [1].

Энергоблок подключается к элегазовому комплектному распределительному устройству (КРУЭ) 500 кВ посредством пофазно-экранированных элегазовых токопроводов.

Для каждого защищаемого элемента проектом предусмотрено по два независимых комплекта защит (100 % резервирование по основным защитным функциям) с действием по схеме «ИЛИ». Дополнительно для рабочих трансформаторов среднего напряжения предусмотрен комплект резервных защит.

## **II. Диагностика турбогенераторов**

Диагностика турбогенераторов методом спектрального анализа основана на выполнении контроля тока и напряжения статора с последующим выполнением исследования полученного сигнала, что позволяет с высокой степенью достоверности определять состояние различных элементов электрической машины [2]. В основе данного метода лежит то, что любые возмущения в работе электрической или механической части двигателя (генератора) приводят к изменениям магнитного потока в зазоре электрической

машины и, следовательно, к слабой модуляции тока статора. Соответственно, существование в спектре тока и напряжения характерных (и несовпадающих) частот определенной величины свидетельствует о наличии повреждений электрической или механической части устройства.

Исправность обмоток турбогенератора контролируют следующие защиты:

- 1) продольная дифференциальная защита генератора;
- 2) поперечная дифференциальная защита генератора;
- 3) 100 %-ая защита от замыканий на землю обмоток статора генератора с наложением 20 Гц;
- 4) 90 %-ая защита от замыканий на землю обмоток статора генератора по основной гармонике;
- 5) защита от замыканий на землю обмоток статора генератора по третьей гармонике;
- 6) защита ротора турбогенератора от замыканий на землю.

Все перечисленные защиты имеют пороговые значения (табл. 1). При превышении определенного параметра происходит срабатывание исполнительного органа, и далее поврежденный элемент отключается коммутационным аппаратом [3]. Устройства релейной защиты и автоматики предотвращают развитие аварии поврежденного элемента и исключают влияние аварийного режима на сеть. В настоящее время серьезной проблемой является отсутствие контроля плавного изменения параметров турбогенератора. Подобную информацию можно использовать для анализа состояния турбогенератора, а также для выявления аварийных процессов, происходящих в обмотках статора и ротора в процессе эксплуатации.

Для разработки новой методики диагностики турбогенератора в процессе эксплуатации подходит метод, который позволяет разложить токи и напряжения статора на гармонические составляющие [4]. Аварийную регистрацию электрических процессов осуществляют программно-технические комплексы с соответствующими функциями, в частности, специализированные цифровые осциллографы, либо устройства релейной защиты и автоматики с необходимыми характеристиками, которые позволяют реализовать функционал аварийной регистрации событий и/или непрерывной регистрации установившегося режима работы электрооборудования.

Для анализа аварийных ситуаций и контроля параметров турбогенератора на энергоблоках № 1 и № 2 НВ АЭС-2 разработана и внедрена система аварийных осциллографов на базе блоков регистрации и блоков выносных измерительных преобразователей производства фирмы «Парма» (г. Санкт-Петербург). Возможности данной системы позволяют измерять электрические параметры с частотой 19000 Гц в секунду, т.е. за один период

380 Герц, столь высокий уровень дискретизации позволяет раскладывать измеряемые величины на гармонические составляющие [5].

**Таблица 1.**  
**Пороговые значения защит**

**Table 1.**  
**Protection thresholds**

<b>Продольная дифференциальная защита генератора</b>	<b>Уставка</b>
Уставка по току $I_{\text{дифф}} >$	0,2 $I/I_n$ объекта
Выдержка времени ступени Пуск I-ДИФФ $>$	0,00 с
Уставка по току $I_{\text{дифф}} >>$	8,0 $I/I_n$ объекта
Выдержка времени ступени Пуск I-ДИФФ $>>$	0,00 с
<b>Поперечная дифференциальная защита генератора</b>	
Порог срабатывания $I_{z1}$	0,53 А
Выдержка на отключение	0,00 с
<b>100%-ная защита статора от замыканий на землю (20 Гц)</b>	
Величина Пуска сигнализации ступени $R <$	4992 Ом
Величина Пуска отключения ступени $R <<$	1992 Ом
Выдержка времени сигнализации ступени $R <$	10,00 с
Выдержка времени отключения ступени $R <<$	0,50 с
Величина Пуска $I >>$	0,83 А
<b>Защита статора от замыканий на землю (90 %)</b>	
Уставка $U_0 >$ (90 % защита от замыканий на землю)	16,0 В
Выдержка времени	0,50 с
<b>Защита от замыканий на землю обмоток статора генератора по третьей гармонике</b>	
Пуск ступени $U_0$ 3 гармоники $>$	1,0 В
Выдержка времени	0,50 с
<b>Защита ротора турбогенератора от замыканий на землю</b>	
Сопротивление срабатывания $R_{\text{ср}}$ 1-я ступень	3,5 кОм
Время срабатывания $t_{\text{ср}}$ 1-я ступень	6,0 с
Сопротивление срабатывания $R_{\text{ср}}$ 2-я ступень	2,5 кОм
Время срабатывания $t_{\text{ср}}$ 2-я ступень	0,5 с

Блок регистрации осуществляет:

- вычисление измеряемых величин в соответствии с техническими требованиями для всех функций;
- проверку условий запуска и запуск регистратора в функции «Регистратор» и «Устройство векторных измерений»;
- хранение и индикацию измерительной информации во всех функциях регистратора.

Блок выносных измерительных преобразователей предназначен:

- для преобразования токов и напряжений от стандартных измерительных трансформаторов тока, напряжения, измерительных шунтов к нормированному цифровому коду;
- для определения состояния дискретного сигнала;
- для математической обработки и преобразования информации в кодированный оптический сигнал.

Функциональная схема регистратора «Парма» имеет много общего с другими подобными системами.

### III. Анализ периодических функций

Анализ периодических функций (сигналов сложной формы) часто представляется в виде разбиения функции на отдельные составляющие (метод разложения Фурье) [6]. В электротехнике гармонический анализ остается основным способом анализа электрических цепей.

*Во-первых*, гармонические функции вида  $\sin(x)$ ,  $\cos(x)$ ,  $\sin(2x)$ ,  $\cos(2x)$ ,  $\sin(3x)$ ,  $\cos(3x)$  и т.д., образуют полную ортонормированную систему, т.е.:

$$\int_{-\pi}^{\pi} (\sin kx \cdot \cos mx) dx = \begin{cases} 1, & \text{при } (k = m) \\ 0, & \text{при } (k \neq m) \end{cases} \quad (1)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$  и  $m = 1, 2, 3, \dots$  – номера гармоник.

*Во-вторых*, если ряд Фурье сходится к некоей функции  $x(t)$ , то эта функция однозначно определяется дискретной совокупностью ряда. При ограниченном числе членов ряд Фурье обеспечивает наилучшее приближение к исходному сигналу в смысле среднеквадратичной погрешности. При увеличении числа членов ряда Фурье до бесконечности, среднеквадратичская погрешность будет стремиться к нулю. Однако из этого не следует, что ряд будет точно воспроизводить функцию  $x(t)$  в любой момент времени  $t$ .

*В-третьих*, гармонические сигналы обладают важным свойством сохранения своей формы при прохождении через линейные электрические цепи. Это крайне полезное свойство при анализе линейных электрических цепей, таких как частотные фильтры, фильтры симметричных составляющих и т.д. При анализе достаточно отследить изменение амплитуд и фаз отдельных гармоник, а затем – восстановить выходной сигнал путем суммирования выходных гармоник.

В тригонометрической форме ряд Фурье имеет следующий вид:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\omega_0 t + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin \omega_0 t, \quad (2)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$  номер гармоники;  $\omega_0 = 2\pi/T_0$  – основная круговая частота;  $T_0$  – период.

Далее, через весовые коэффициенты при гармониках  $a_0, a_1, b_1 \dots a_k, b_k \dots$ , которые определяются по формулам:

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) dt; \quad (3)$$

$$a_k = \frac{2}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) \cos k\omega_0 t dt; \quad (4)$$

$$b_k = \frac{2}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) \sin k\omega_0 t dt; \quad (5)$$

определяется уровень постоянной составляющей в сигнале:

$$A_0 = \frac{a_0}{2}. \quad (6)$$

Амплитуда любой гармоники и ее начальная фаза:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad (7)$$

$$\text{tg}(\varphi_k) = \frac{a_k}{b_k}; \quad (8)$$

где  $\varphi_k$  – начальная фаза  $k$ -й гармоники.

Представим ряд Фурье в комплексной форме:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{jk\omega_0 t}, \quad (9)$$

где  $C_k = \frac{1}{T} \int_t^{t+T_0} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt$  – коэффициент при  $k$ -й гармонике являющийся комплексным числом  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  – номер члена ряда.

Из тождества Эйлера можно представить связь между комплексными и вещественными базовыми функциями:

$$e^{jk\omega_0 t} = \cos(k\omega_0 t) + j \sin(k\omega_0 t); \quad (10)$$



$$\cos k\omega_0 t = \frac{1}{2} (e^{jk\omega_0 t} + e^{-jk\omega_0 t}); \quad (11)$$

$$\sin k\omega_0 t = \frac{1}{2j} (e^{jk\omega_0 t} - e^{-jk\omega_0 t}). \quad (12)$$

Учитывая, что коэффициенты экспоненциального ряда являются комплексно-сопряженными числами, и используя показательную форму записи комплексного числа  $C_k = |C_k| e^{j\varphi_k}$ , выражение  $e^{jk\omega_0 t} = \cos(k\omega_0 t) + j \sin(k\omega_0 t)$  можно привести к виду:

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{-\infty}^{\infty} C_k e^{jk\omega_0 t} = \sum_{-\infty}^{\infty} |C_k| e^{j\varphi_k + jk\omega_0 t} = \\ &= \sum_0^{\infty} |C_k| \cdot [e^{j(\varphi_k + k\omega_0 t)}] = C_0 \sum_0^{\infty} 2|C_k| \cdot \cos(k\omega_0 t + \varphi_k). \end{aligned} \quad (13)$$

Из этого следует, что вещественная функция  $x(t)$  может быть представлена суммой косинусоид, имеющих амплитуды  $2|C_k|$  и начальные фазы  $\varphi_k$ . Следовательно, любая периодическая функция может быть представлена двумя способами: как в виде временной зависимости, так и совокупностью коэффициентов ряда Фурье, представляющих собой либо пары вещественных чисел, либо комплексные числа [8]. Физическая сущность коэффициентов ряда Фурье заключается в отражении амплитуд и начальных фаз отдельных гармонических составляющих, входящих в состав сложного периодического колебания.

Полный ряд Фурье содержит бесконечное число членов. Однако основная часть энергии реальных электрических колебаний передается в ограниченном диапазоне частот, т.е. конечным числом гармоник. Таким образом, в большей своей части коэффициенты полного ряда Фурье пренебрежимо малы на фоне конечного числа реально значимых коэффициентов. Это позволяет использовать при описании реальных колебаний конечные ряды Фурье.

Помимо вышеописанного, применяется метод анализа прямоугольных функций (функции Уолша, Адамари, Пэли и т.д.), однако все они обеспечивают хорошие результаты при анализе стационарных сигналов. При рассмотрении аperiodических сигналов, например, при возникновении нестационарных процессов, с преобразованием Фурье возникают проблемы, поскольку он не позволяет выявить частотно-временные возмущения сигнала [9]. Необходимость анализировать весь процесс в целом и одновременно видеть детальное представление о локальных особенностях сигнала

привело к появлению нового способа анализа – волновым преобразованиям (вейвлет-преобразованиям), которые все чаще применяются на практике.

#### IV. Результаты

На рис. 1 изображены гармонические составляющие тока статора в нормальном режиме работы турбогенератора. На втором блоке НВ АЭС-2 происходили резкие изменения напряжения ротора в пределах 120-180 В. Причина состояла в загрязнении щеточно-контактного аппарата (ЩКА). Происходило скачкообразное изменение напряжения ротора, следовательно, обрабатывала система возбуждения турбогенератора.

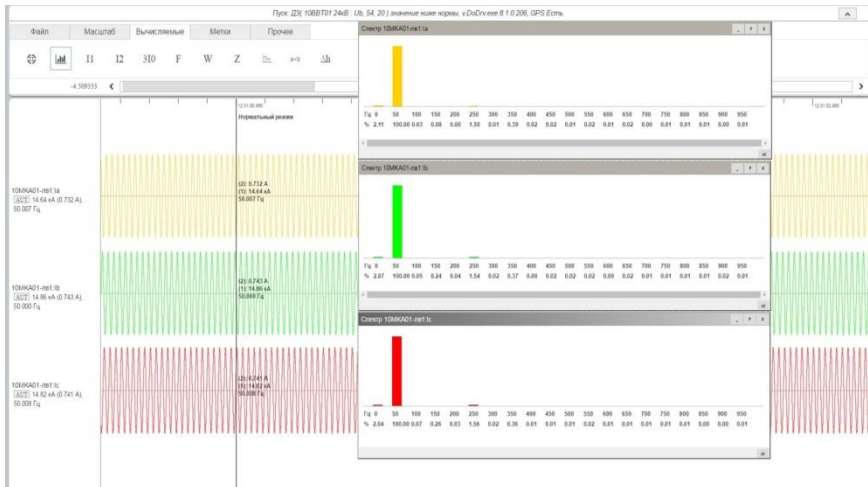
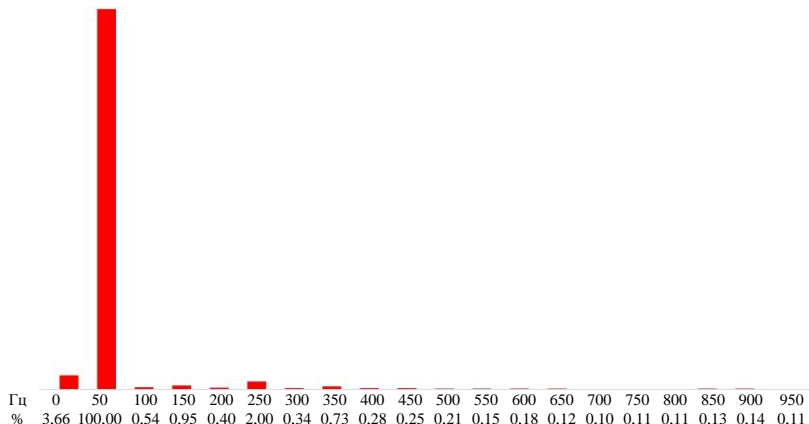


Рис. 1. Осциллограмма нормального режима работы турбогенератора

Fig. 1. Oscillogram of normal operation of turbo generator

Во время этого процесса происходили изменения амплитудных значений тока 5-й гармоники (250 Гц) на 10 % от штатного в большую сторону (рис. 2). Даже столь незначительный режим привел к изменению спектра тока статора, из этого следует, что при более значительных повреждениях возможно отследить развитие аварии путем непрерывной диагностики [10].



**Рис. 2. Гармоники тока в аварийном режиме работы. Фаза С**

**Fig. 2. Current harmonics in emergency mode. Phase C**

В настоящее время произведена настройка аппаратуры контроля аварийных событий, запрограммированная на регистрацию отклонений параметров при достижении отклонения 2 % тока одной из гармоник от номинального тока статора.

### **V. Заключение**

Исследования показали, что на современных АЭС не реализована в полной мере система непрерывной диагностики. Данный вопрос требует глубокого изучения и разработки новой методики непрерывного мониторинга состояния турбогенератора на основе контроля параметров, с помощью которой можно будет получать информацию о его состоянии в любой конкретный момент времени.

© Данилов А.Д., 2023

© Зимин А.И., 2023

© Ширяев Д.А., 2023

© Волков Д.М., 2023

*Поступила в редакцию 02.06.2023*

*Принята к публикации 20.06.2023*

*Received 02.06.2023*

*Accepted 20.06.2023*

**Библиографический список**

- [1] Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Физматгиз, 1962. – 236 с.
- [2] Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
- [3] Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. М.: Высшая школа, 1990. – 400 с.
- [4] Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов. Ленинград.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 192 с.
- [5] Бронштейн И.Н. Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. – 544 с.
- [6] Шмурьев В.Я. Анализ осциллограмм цифровых регистраторов во внешней среде // Энергетик. 2001. № 8. С. 33-35.
- [7] Шмурьев В.Я. Цифровая регистрация и анализ аварийных процессов в электроэнергетических системах. С.-Пб.: ПЭИПК, 2006.
- [8] «TRANSCOP». Универсальная программа просмотра, анализа и печати данных. Руководство пользователя. RU.31920409.00004. ООО «ПАРМА», Санкт-Петербург, 2017.
- [9] Программное обеспечение регистратора электрических процессов «ПАРМА РП 4.11». Руководство пользователя. RU.31920409.00007. ООО «ПАРМА», Санкт-Петербург, 2017.
- [10] Бобров В.В. Оценка эффективности основных методов диагностики асинхронных электродвигателей // Ползуновский вестник. 2012. № 3-1. С. 198-203.

**References**

- [1] A.A. Harkevich, *Spektry i analiz [Spectra and analysis]*. Moscow: Fizmatgiz, 1962 (in Russian).
- [2] I.S. Gonorovsky, *Radiotekhnicheskie cepi i signaly [Radio engineering circuits and signals]*. Moscow: Radio and communication, 1986 (in Russian).
- [3] P.N. Matkhanov, *Osnovy analiza elektricheskikh cepej. Linejnye cepi [Fundamentals of electrical circuit analysis. Linear chains]*. Moscow: Higher School, 1990 (in Russian).
- [4] V.S. Gutnikov, *Fil'traciya izmeritel'nyh signalov [Filtering of measuring signals]*. Leningrad: Energoatomizdat, Leningr. Department, 1990 (in Russian).
- [5] I.N. Bronstein and K.A. Semendyaev, *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchihsvya vtuzov [Handbook of mathematics for engineers and students of higher educational institutions]*. Moscow: Nauka, 1986 (in Russian).
- [6] V.Ya. Shmuryev, “Analiz oscillogramm cifrovyyh registratorov vo vneshnej srede [Analysis of oscillograms of digital recorders in the external environment]”, *Energetik*, no. 8, pp. 31-35, 2001 (in Russian).
- [7] V.Ya. Shmuryev, *Cifrovaya registraciya i analiz avarijnyh processov v elektroenergeticheskikh sistemah [Digital registration and analysis of emergency processes in electric power systems]*. St. Petersburg: PEIPC, 2006 (in Russian).
- [8] “TRANSCOP”. *Universal'naya programma prosmotra, analiza i pechati dannyh. Rukovodstvo pol'zovatelya [Universal program for viewing, analyzing and printing data. User guide]*. RU.31920409.00004. PARMA LLC, St. Petersburg, 2017.

- [9] *Programmnoe obespechenie registratora elektricheskikh processov "PARMA RP 4.11"*. *Rukovodstvo pol'zovatelya [Software for the recorder of electrical processes "PARMA RP 4.11". User guide]*. RU.31920409.00007. PARMA LLC, St. Petersburg, 2017.
- [10] V.V. Bobrov, "Оценка эффективности основных методов диагностики асинхронных электродвигателей [Evaluation of the effectiveness of the main methods for diagnosing asynchronous electric motors]", *Polzunovskiy Vestnik*, no. 3/1, pp. 198-203, 2012 (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Данилов Александр Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Российская Федерация.

**Alexander D. Danilov**, D. Sci. (End.), professor of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

**Зимин Александр Игоревич**, начальник участка ЭЦ АО «Концерн Росэнергоатом», Филиал «Нововоронежская атомная станция», Нововоронеж, Российская Федерация.

**Alexander I. Zimin**, head of the department of the JSC "Rosenergoatom", Novovoronezh Nuclear Power Plant, Novovoronezh, Russian Federation.

**Ширяев Денис Александрович**, заместитель главного инженера по электротехническому оборудованию АО «Концерн Росэнергоатом», Филиал «Нововоронежская атомная станция», Нововоронеж, Российская Федерация.

**Denis A. Shiryaev**, deputy chief engineer for electrical equipment of the JSC "Rosenergoatom", Novovoronezh Nuclear Power Plant, Novovoronezh, Russian Federation.

**Волков Дмитрий Михайлович**, инженер по РЗА АО «Концерн Росэнергоатом», Филиал «Нововоронежская атомная станция», Нововоронеж, Российская Федерация.

**Dmitry M. Volkov**, engineer of the JSC "Rosenergoatom", Novovoronezh Nuclear Power Plant, Novovoronezh, Russian Federation.