

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / TECHNICAL SCIENCES

2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.313

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.4.1>



ЦИФРОВАЯ ДИАГНОСТИКА ВНУТРЕННИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ДЕКОМПОЗИЦИИ СИГНАЛОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Дмитрий Михайлович Баннов^{1*}, Владимир Иосифович Полищук²

¹ Самарский государственный технический университет (д. 244, ул. Молодогвардейская, Самара, 443100, Российская Федерация)

² Югорский государственный университет (д. 16, ул. Чехова, Ханты-Мансийск, 628012, Российская Федерация)

¹ bannov.dm@samgtu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1652-7355>

² polischuk_vi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8100-4406>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. Существующие в промышленности электрические машины, являясь ключевыми элементами энергетических систем, подвержены внутренним повреждениям, таким как витковые замыкания, деградация изоляции, дисбаланс магнитных полей и механический износ. Традиционные методы диагностики, основанные на анализе вибраций, тепловых характеристик или статических электрических параметров, зачастую недостаточно чувствительны для раннего обнаружения скрытых повреждений, особенно в условиях нестационарных режимов работы и влияния внешних помех. В последние годы акцент смещается в сторону интеллектуальных систем мониторинга, использующих цифровую обработку сигналов и методы машинного обучения. В связи с ограничениями, связанными с непараметрической априорной неопределенностью, особый интерес представляют адаптивные алгоритмы идентификации, способные динамически подстраиваться под изменяющиеся условия работы машины, а также интегрировать дополнительную априорную информацию: исходные данные, экспертные оценки, физические модели процессов. **Цель.** Разработать методы адаптивной идентификации и декомпозиции сигналов для раннего обнаружения витковых замыканий в обмотке ротора синхронных генераторов, обеспечивающие повышение точности диагностики и предотвращение аварийных режимов. **Материалы и методы.** Исследование построено на анализе сигналов с датчиков магнитного поля рассеяния, полученных при различных режимах работы синхронного генератора (холостой ход, нагрузка 25–100 %) и имитации витковых замыканий (1,2–17,2 % витков), с применением адаптивных алгоритмов идентификации, декомпозиции и обработки данных 12-битным АЦП (частота дискретизации 10 кГц). **Результаты и обсуждение.** Использование данных с магнитометрических датчиков и декомпозиции сигналов позволило достичь порога обнаружения повреждений в 2,7 % от общего числа витков, что подтверждает практическую значимость подхода. Коэффициенты разложения для положительной и отрицательной полуволн сравниваются через интегральный критерий несимметрии. Эксперименты показали, что при замыкании 4 % витков значение возрастает с 1,3 % до 3,7 %, а при 17,2 % – до 13,5 %. **Заключение.** Сочетание адаптивных алгоритмов и априорной информации создает мощный инструмент для решения разнообразных задач, требующих гибкости и точности. Априорная информация служит своего рода концептуальным ядром, объединяющим экспертные знания и данные, которое помогает адаптивным алгоритмам становиться более умными и эффективными.

Ключевые слова: цифровая диагностика, электрические машины, адаптивные алгоритмы идентификации

Для цитирования: Баннов Д. М., Полищук В. И. Цифровая диагностика внутренних повреждений электрических машин на основе адаптивной идентификации и декомпозиции сигналов магнитного поля // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2025. № 4(109). С. 9–17. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.4.1>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 23.04.2025;

одобрена после рецензирования 26.05.2025;

принята к публикации 04.06.2025.

Research article

DIGITAL DIAGNOSTICS OF INTERNAL DAMAGE IN ELECTRICAL MACHINES BASED ON ADAPTIVE IDENTIFICATION AND DECOMPOSITION OF MAGNETIC FIELD SIGNALS

Dmitriy M. Bannov^{1*}, Vladimir I. Polishchuk²

¹ Samara State Technical University (244, Molodogvardeiskaya str., Samara, 443100, Russian Federation)

² Yugra State University (16, Chekhov str., Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation)

¹ bannov.dm@samgtu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1652-7355>

² polischuk_vi@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8100-4406>

* Corresponding author

© Баннов Д. М., Полищук В. И., 2025

Abstract. Introduction. Existing industrial electrical machines, being key components of energy systems, are susceptible to internal damages such as turn short circuits, insulation degradation, magnetic field imbalance, and mechanical wear. Traditional diagnostic methods based on vibration analysis, thermal characteristics, or static electrical parameters are often insufficiently sensitive for early detection of hidden defects, particularly under non-stationary operating conditions and external interference. In recent years, the focus has shifted toward intelligent monitoring systems that utilize digital signal processing and machine learning methods. Given the limitations associated with non-parametric prior uncertainty, adaptive identification algorithms are of particular interest, as they can dynamically adjust to changing machine operating conditions and integrate additional prior information such as raw data, expert assessments, and physical models of processes. **Goal.** The article aims to develop methods of adaptive identification and signal decomposition for early detection of turn-to-turn short circuits in the rotor winding of synchronous generators, ensuring enhanced diagnostic accuracy and prevention of emergency operating conditions. **Materials and methods.** The study is based on the analysis of signals from leakage magnetic field sensors, acquired during various operating modes of the synchronous generator (no-load, 25–100% load) and under simulated turn-to-turn short circuits (1.2–17.2% of winding turns). Adaptive identification algorithms, signal decomposition, and data processing via a 12-bit ADC (sampling frequency: 10 kHz) were employed for the analysis. **Results and discussion.** The use of data from magnetometric sensors and signal decomposition has enabled achieving a damage detection threshold of 2.7% of the total winding turns, confirming the practical relevance of the approach. The decomposition coefficients for positive and negative half-waves are compared using an integral asymmetry criterion. Experiments demonstrated that when short-circuiting 4% of the turns, the criterion value increases from 1.3% to 3.7%, and for 17.2% of the turns, it rises to 13.5%. **Conclusion.** The combination of adaptive algorithms and a priori information creates a powerful tool for solving diverse tasks that demand flexibility and precision. A priori information acts as a conceptual core, integrating expert knowledge and data, which enables adaptive algorithms to become more intelligent and efficient.

Keywords: digital diagnostics, electrical machines, adaptive identification algorithms

For citation: Bannov DM, Polishchuk VI. Digital diagnostics of internal damage in electrical machines based on adaptive identification and decomposition of magnetic field signals. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2025;4(109):9-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.4.1>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 23.04.2025;

approved after reviewing 26.05.2025;

accepted for publication 04.06.2025.

Введение / Introduction. Современные энергетические системы основаны на высокой надежности и эффективности электрических машин, таких как синхронные генераторы, которые играют ключевую роль при преобразовании механической энергии в электрическую. Однако длительная эксплуатация, экстремальные нагрузки и старение материалов приводят к постепенному ухудшению изоляции обмоток, что часто становится причиной витковых замыканий (ВЗ) – одного из наиболее опасных видов повреждений. По данным промышленной статистики, до 30 % аварийных остановок генераторов связаны с дефектами в обмотке ротора, при этом 60 % таких случаев вызваны именно витковыми замыканиями. Эти повреждения нарушают симметрию магнитного поля, вызывают локальные перегревы и могут привести к каскадным отказам, угрожающим стабильности энергоснабжения. В связи с этим разработка методов ранней диагностики ВЗ становится критически важной задачей, направленной на предотвращение аварий и сокращение затрат на ремонт.

Традиционные подходы к мониторингу состояния электрических машин, такие как анализ вибраций, тепловые измерения или контроль физических параметров со стороны механизма (давление, расход и др.), обладают существенными ограничениями [1–4]. Например, вибрационные методы плохо адаптированы к обнаружению малых повреждений на ранних стадиях, а тепловой анализ требует длительного времени для накопления данных. Кроме того, большинство существующих методов предполагает стационарные режимы работы, в то время как реальные условия эксплуатации часто связаны с нестационарными нагрузками, пусковыми процессами и внешними помехами. Это делает традиционные подходы недостаточно чувствительными и надежными для своевременного выявления скрытых дефектов.

В последние годы акцент сместился в сторону цифровых диагностических систем, основанных на обработке сигналов с датчиков электрических величин (тока, напряжения и др.), в том числе датчиков магнитного поля рассеяния (ДМП). Эти датчики регистрируют локальные изменения магнитного потока, вызванные асимметрией обмоток, что позволяет выявлять дефекты на ранних стадиях. Однако анализ таких сигналов осложняется их нестационарностью, наличием аддитивных шумов (например, от токов статора и ротора) и ограниченным объемом данных в условиях коротких реализаций [5]. Для преодоления этих проблем в современных исследованиях активно разрабатываются как адаптивные алгоритмы идентификации, способные динамически подстраиваться под изменяющиеся условия, так и методы декомпозиции сигналов, выделяющие полезные компоненты из шумового фона. В рамках исследования решаются задачи анализа особенностей нестационарных сигналов с ДМП в условиях априорной неопределенности, синтез адаптивных алгоритмов идентификации, разработка метода декомпозиции сигналов, экспериментальная проверка чувствительности метода.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. Современные системы анализа и защиты электроэнергетических объектов, таких как синхронные генераторы (СГ), базируются на микропроцессорных технологиях, обеспечивающих высокую точность и скорость обработки данных.

Очевидно, что преимущество перехода от аналоговых электромеханических к микропроцессорным системам обусловлено возможностью применения сложных алгоритмов: цифровой фильтрации, спектрального анализа, корреляционных методов и машинного обучения. Однако ключевым этапом остается преобразование аналоговых сигналов с датчиков (например, магнитометрических датчиков рассеяния) в цифровую форму, что требует соблюдения строгих принципов дискретизации и квантования.

При выполнении данных исследований авторами использовались цифровые сигналы, полученные на экспериментальной установке, построенной по схеме, представленной на рис. 1.

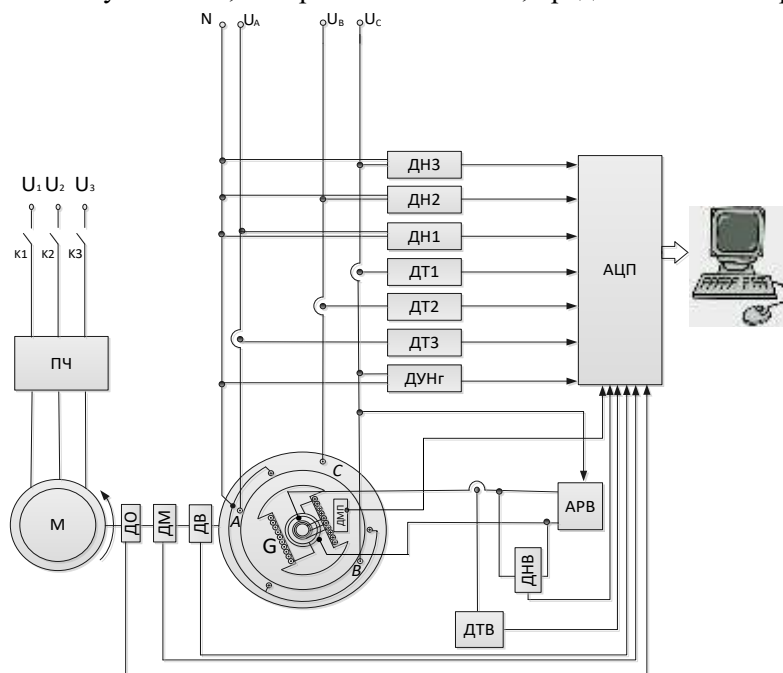


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки /

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

Ключевыми элементами экспериментальной установки являются синхронная машина ГАБ-4-Т/230 (4 кВт, 230 В), асинхронный двигатель АИР 100 L2 (5 кВт), питаемый через частотный преобразователь Altivar 71, датчик магнитного поля, датчики напряжения LV25-р, датчики тока НУ25-р, датчик момента Mini-Smart Drehmomentsensor Typ 4502A50RAU, датчик оборотов ESS-PA005-3600, аналого-цифровой преобразователь National Instruments PCI 6024E. Система имитации межвиткового замыкания роторной цепи организована дополнительными контактными кольцами с отпайками 4 %, 10 % и 30 % витков.

Современные теория и практика диагностики состояния электрических машин сталкиваются с препятствиями, связанными с обработкой и интерпретацией сигналов, содержащих полезную информацию о состоянии вращающихся частей. На основе практических результатов авторами был сделан вывод, что основными источниками информации служат сигналы, полученные с датчиков магнитного потока рассеяния, установленных в торцевой зоне машины. Эти сигналы содержат множество компонентов, включая полезные сигналы, отражающие состояние обмоток, и возникающие вследствие внешних воздействий и внутренних процессов шумовые составляющие.

Основная сложность заключается в необходимости выделения полезной составляющей из сложного нестационарного сигнала, который характеризуется отсутствием достоверного аналитического описания, непараметрической априорной неопределенностью и ограниченным объемом измерений. Эти факторы делают задачу диагностики сложной и требуют применения специализированных методов обработки сигналов.

Для преодоления этих трудностей авторами предлагается использовать адаптивные алгоритмы идентификации, которые позволяют гибко подстраиваться под конкретные условия работы и использовать дополнительную априорную информацию для повышения точности диагностики. Адаптивные

алгоритмы идентификации представляют собой совокупность методов, направленных на эффективное выделение полезной информации из сигналов с переменными параметрами.

Возникновение виткового замыкания в обмотке ротора СГ изменяет симметрию магнитного поля, образованного потоками рассеяния в торцевой зоне машины [6, 7]. В ДМП наводится сигнал ЭДС, мгновенное значение основной гармонической на выходе датчика в поле рассчитывается по выражению

$$e_n = \sum_{i=1}^{n_{z1}} \frac{d\Psi_i}{dt} + \sum_{j=1}^{n_{zf}} \frac{d\Psi_j}{dt} + \left(\sum_{i=1}^{n_{z1}} \frac{d\Psi_{\delta i}}{dt} + \sum_{j=1}^{n_{zf}} \frac{d\Psi_{j\delta}}{dt} \right), \quad (1)$$

где Ψ_i и Ψ_j – потокосцепления i -й секции статора и j -й катушки ротора с ДМП; $\Psi_{i\delta}$, $\Psi_{j\delta}$ – потокосцепления поля воздушного зазора i -й секции статора и j -й катушки ротора с ДМП.

Наблюдаемый экспериментальный сигнал на выходе ДМП (1) представляет собой аддитивную смесь и может быть представлен в виде:

$$Y(t) = X_s(t) + \eta_s(t) + X_f(t) + \eta_f(t) + Z_f(t) + X_\delta(t) + \varepsilon(t), \quad (2)$$

где $X_s(t)$ – составляющая от токов статорной обмотки, $X_f(t)$ – составляющая от токов роторной обмотки, $\eta_s(t)$ и $\eta_f(t)$ – аддитивные шумовые составляющие от статорной и роторной обмотки, $X_\delta(t)$ – составляющая от воздушного зазора, $\varepsilon(t)$ – ошибки измерения, $Z_f(t)$ – функция полезного сигнала от возникновения виткового замыкания в обмотке ротора.

Процесс передачи информации через каналы связи и проведение физических экспериментов приводит к необходимости измерять и определять параметры сигналов, которые несут информацию об изучаемом объекте. Однако исследование реальных изменчивых сигналов вызывает сложности, связанные с задачами структурной и параметрической идентификации. Эти задачи включают определение формы функции $f(\cdot)$ и параметров $\mathbf{a} = (\alpha_j, j = \overline{1, m})$, сигналов $y_t = f(t, \mathbf{a})$ учитывая воздействие случайных неконтролируемых факторов ξ_t и ограниченные объемы доступных данных о процессе $y^*(t_i), i = \overline{1, n}$.

Трудности в решении задач идентификации нестационарных сигналов увеличиваются при большом количестве оцениваемых параметров и недостаточном объеме исходных данных, где $m > n$, особенно на коротких интервалах наблюдаемых процессов. Для преодоления этих трудностей предлагается использовать адаптивные системы идентификации, основанные на моделях с параметрами $\mathbf{a}_t = (\alpha_1(t), \alpha_2(t), \dots, \alpha_p(t))$, меняющимися со временем, с учетом дополнительной априорной информации. Такие модели позволяют существенно снизить сложность решений задач фильтрации, сглаживания данных, обнаружения изменений в сигнале и диагностики состояний исследуемых объектов за счет уменьшения количества параметров $p < m$ по сравнению с моделями с фиксированными параметрами [8].

В основе алгоритмов идентификации нестационарных сигналов y_t^* использована интегрированная система моделей с учетом дополнительной априорной информации вида

$$\begin{cases} y_t^* = y_t + \xi_t = f_0(t, \mathbf{a}(t)) + \xi_t, \\ \bar{\mathbf{z}}_{t+\tau} = \mathbf{f}_a(t + \tau, \mathbf{a}(t)) + \boldsymbol{\eta}_t, \tau \geq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где параметры $\mathbf{a}(t) = (\alpha_j(t), j = \overline{1, m})$ – неизвестные ограниченные, однозначные функции времени t ; $\mathbf{f}_a(t + \tau, \mathbf{a}) = (f_{a,j}(t + \tau, \mathbf{a}(t)), j = \overline{1, p})$ – модели объектов аналогов, позволяющие учитывать дополнительную априорную информацию $\bar{\mathbf{z}}_t = (\bar{z}_{t,j}, j = \overline{1, p})$, известную к моменту времени t . Модели исследуемого процесса и модели объектов аналогов $f_0, f_{a,j}$ – известные функции (функционалы); $\xi_t, \boldsymbol{\eta}_t = (\eta_{t,j}, j = \overline{1, p})$ – случайные процессы, представляющие погрешности измерений сигнала; $y_t^*, \bar{\mathbf{z}}_t$ – ошибки дополнительных данных и экспертных оценок.

Исследование сигналов, регистрируемых датчиком магнитного поля рассеяния синхронного генератора (рис. 2, линия 1), при работе в режиме, близком к холостому ходу, выявило, что возникновение витковых замыканий сопровождается локальными искажениями сигнала $y^*(t_i)$. Эти аномалии проявляются преимущественно в областях пиковых значений амплитуды ЭДС [9]. В качестве диагностического критерия был принят коэффициент J (4), характеризующий отклонение фактического (сглаженного) сигнала $\hat{y}(t)$ от восстановленного $\tilde{y}(t)$:

$$J = \frac{\int_{t_1}^{t_{100}} |\hat{y}(t) - \tilde{y}(t)| dt}{\int_{t_{100}}^{t_{200}} |\hat{y}(t) - \tilde{y}(t)| dt} \leq \varepsilon, \quad (4)$$

где t_n, t_k – временные границы локальной области изменения сигнала.

Интегральная природа данного критерия позволяет отстраниться от шумов и помех, повысив надежность диагностического устройства, а его линейная зависимость от степени повреждения дает возможность критично оценивать степень внутреннего повреждения.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Наличие виткового замыкания определяется при превышении критерия J (4) величины ε . В процентах критерий выражается как $J^* = |1 - J| \cdot 100\%$. Физическая интерпретация данного критерия связана с искажением симметрии магнитного потока в торцевой зоне генератора и при возникновении ВЗ локальная асимметрия поля приводит к отклонению интегральных характеристик полувольт ЭДС, регистрируемых датчиком ДМП.

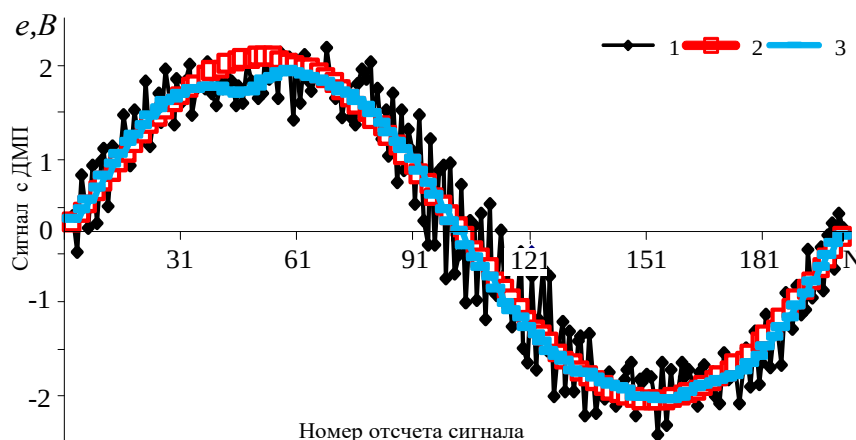


Рис. 2. Исходные – линия 1, восстановленные – линия 2, сглаженные – линия 3, значения сигнала с ДМП с 3 % короткозамкнутых витков / Fig. 2. Initial – line 1, interpolation – line 2, smoothed – line 3, signal values from DMP with 3% short-circuited turns.

*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

На рис. 2 линией 3 изображены сглаженные значения сигнала $\hat{y}(t)$, полученные с использованием оценок параметров сглаживания $h_{n(k)}^*$ в моменты времени $t_{n(k)}$, при $n(k) = 5, 10, 15$ путем решения оптимизационной задачи методом золотого сечения с использованием процедуры «скользящий контроль» [10]. Практический порог $J = 0,03$ (3 %) установлен экспериментально на основе анализа статистики отказов и соответствует минимально диагностируемому повреждению в 1,2 % витков (табл. 1). Линией 2 изображены восстановленные значения сигнала с ДМП, полученные при использовании модели

$$\begin{cases} y_t^* = \alpha_1(t) + \alpha_2(t) \sin(\alpha_3 \cdot t) + \xi_t, \\ \alpha_2 = \alpha_2(t) + \eta_t \end{cases}$$

На рис. 3 представлены результаты сравнения сглаженного сигнала $\hat{y}(t)$ и восстановленного сигнала $\tilde{y}(t)$. Анализ графика демонстрирует, что в зоне локальных изменений сигнала (зона I), соответствующих наличию витковых замыканий, наблюдается значительное расхождение между сглаженными и восстановленными значениями. Это отклонение, достигающее максимума в точках аномалий, подтверждает наличие дефекта в обмотке ротора, что согласуется с данными, полученными при диагностике.



Рис. 3. Отклонения сглаженного сигнала $\hat{y}(t)$ от восстановленного $\tilde{y}(t)$ /

Fig. 3. Deviations of the smoothed signal $\hat{y}(t)$ from the restored signal $\tilde{y}(t)$.

*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

Важным аспектом повышения эффективности диагностики витковых замыканий в обмотках ротора синхронных генераторов является интеграция априорной информации в алгоритмы обработки данных. Интеграция априорной информации в алгоритмы позволяет получить сглаженные оценки сигнала с меньшим уровнем шумов, что повышает точность локализации границ зон локальных изменений, вызванных витковыми замыканиями. Этот подход позволяет получать сглаженные оценки сигналов с датчиков магнитного поля рассеяния при существенном снижении уровня шумов (до 40 % по сравнению с базовыми методами), что напрямую повышает точность локализации границ зон локальных изменений, вызванных дефектами изоляции.

Экспериментальная верификация чувствительности метода выполнена на синхронном генераторе ГАБ-4-Т/230 с имитацией замыканий различной степени: при замыкании 4 витков полюса (1,25 %), 10 витков полюса (4 %) и 43 витков полюса (17,2 %). Результаты представлены в таблице.

Таблица / Table

Результаты диагностики ВЗ в обмотке ротора СГ /
Results of diagnostics for internal SC in the rotor winding of the SG

Состояние обмотки ротора	Значения критерия диагностики ВЗ в %	
	без нагрузки	под нагрузкой
Без повреждения	1,3	1,36
4 (1,2 %) витка	3,7	3,8
10 (4 %) витков	6,8	7,2
43 (17,2 %) витка	13,5	16,3

Результаты подтверждают эффективность метода для диагностики ВЗ в широком диапазоне повреждений (1,2–17,2 % витков). Результаты демонстрируют стабильность критерия как в режиме холостого хода, так и под нагрузкой, что делает метод применимым для реальных условий эксплуатации синхронных генераторов. При работе генератора под нагрузкой значения критерия незначительно возрастают (например, для 10 витков +0,4 %). Это указывает на усиление асимметрии магнитного поля в рабочих режимах.

Практическая реализация может быть представлена в виде двухэтапной системы. На этапе калибровки собираются априорные данные при пяти режимах работы (холостой ход, 25–100 % нагрузки). В рабочем режиме первичный анализ запускает углубленную адаптивную идентификацию при превышении порога 3 %, что позволяет не только детектировать ВЗ, но и локализовать дефект с точностью до паза ротора. Экономический эффект от внедрения включает снижение затрат на ремонт на 40 % за счёт раннего обнаружения дефектов и предотвращение убытков для парка генерирующего оборудования благодаря исключению аварийных простоев.

Точность локализации границ аномальных зон (рис. 3, область I) достигла $\pm 5\%$ благодаря интеграции априорной информации в виде экспертных оценок длительности пиков (2–5 мс). Например, для повреждения 10 витков ошибка определения временных границ аномалии составила всего 0,2 мс при её общей длительности 5 мс.

Заключение / Conclusion. Проведённые исследования подтвердили эффективность разработанных методов цифровой диагностики ВЗ в обмотке ротора синхронных генераторов. Использование адаптивных алгоритмов идентификации с учётом априорной информации позволило выделять локальные изменения сигналов с датчиков магнитного поля рассеяния даже при минимальных повреждениях (от 1,2 % витков). Метод продемонстрировал высокую чувствительность к асимметрии полюсов ЭДС, обеспечив обнаружение дефектов с погрешностью менее 3 %.

Экспериментальная проверка на установке с генератором ГАБ-4-Т/230 подтвердила, что предложенные подходы устойчивы к изменениям нагрузки (25–100 %) и тока возбуждения. Интегральный критерий несимметрии и адаптивные оценки параметров сигнала показали высокую корреляцию со степенью повреждения.

Практическая значимость работы заключается в возможности интеграции методов в системы реального времени для мониторинга СГ. Это позволит сократить эксплуатационные риски, предотвратить аварии и снизить затраты на ремонт.

Интеграция априорных данных (например, статистики шумов или экспертных оценок) позволяет фильтровать помехи и снижать ложные срабатывания. Например, в данной работе применяемые авторами адаптивные алгоритмы с регуляризацией исключали артефакты, связанные с нестационарностью нагрузки генератора. Использование априорной информации превращает диагностику из задачи «слепого поиска» в целенаправленный анализ, повышая точность, устойчивость и эффективность. Однако это требует глубокого понимания системы и корректной формализации предварительных знаний. Методы без априорной информации остаются актуальными для задач с высокой неопределённостью или при отсутствии исходных данных, но их применение ограничено в условиях сложных промышленных систем, таких как синхронные генераторы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Литвинов С. Н., Лебедев В. Д., Гусенков А. В. Анализ методов контроля технического состояния оборудования на применимость к высоковольтным электронным измерительным трансформаторам // *iPolytech Journal*. 2023. Т. 27. № 2. С. 322–338. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-322-338>. EDN: TQSDVV.
2. Басенко В. Р. Контроль технического состояния промышленного оборудования по вибрационным параметрам. Проведение динамической балансировки для повышения эффективности работы оборудования // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2025. Т. 27. № 1. С. 27–36. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-1-27-36>. – EDN AJMDAT.
3. Анализ методов диагностирования неисправностей трехфазного асинхронного электродвигателя / К. В. Хачевский, А. Д. Умурзакова, Н. А. Воронина, Ю. Б. Ичева // *Омский научный вестник*. 2020. № 2(170). С. 42–46. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2020-170-42-46>. – EDN URHUMD.
4. Кручек В. А., Дворкин П. В. Моделирование процессов тепловой диагностики тепловозной выпрямительной установки // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2023. Т. 20. № 1. С. 52–59. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-1-52-59>. EDN OFAUYY.
5. Кузнецов А. С. Информационные технологии и обработка экспериментальных данных: учебное пособие. СПб.: Изд. дом «Сциентиа», 2025. 98 с. ISBN 978-5-907902-13-8. https://doi.org/10.32415/scientia_978-5-907902-13-8. – EDN ZQNOSE.
6. Несимметричная перегрузка синхронного генератора гармониками токов намагничивания блочного трансформатора при геомагнитных возмущениях / В. В. Вахнина, А. А. Кувшинов, А. Н. Черненко, Р. Н. Пудовинников // *Управление качеством электрической энергии: сборник трудов Международной научно-*

практической конференции, Москва, 25 декабря 2020 года. М.: ЦПУ «РАДУГА», 2020. С. 50–56. EDN ZLLUZO.

7. Полищук В. И. Построение защиты от виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния // Известия Томского политехнического университета. 2012. № 4. С. 57–61.
8. Кондрашова Ю. Н., Третьяков А. М., Шалимов А. В. Составление прогнозов применительно к воздушным линиям электропередач с помощью предиктивной аналитики // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 1(100). С. 20–30. <https://doi.org/10.37493/2307-90>
9. Воскобойников Ю. Е. Рекуррентное оценивание в динамических системах. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2002. 92 с.
10. Рожков Е. В. Эффективная процедура построения кусочно-линейных классификаторов и «обобщенный скользящий контроль» // Автоматика и телемеханика. 2000. № 9. С. 147–155. EDN OFOROZ.

REFERENCES

1. Litvinov SN, Lebedev VD, Gusenkov AV. Analysis of methods for monitoring the technical condition of high-voltage electronic measuring transformers. iPolytech Journal. 2023;27(2):322-338. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-322-338>
2. Basenko VR. Control of the technical condition of industrial equipment by vibration parameters. Carrying out dynamic balancing to increase the efficiency of equipment operation. Power engineering: research, equipment, technology. 2025;27(1):27-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-1-27-36>
3. Hacevskij KV, Umurzakova NA, Voronina AD, Icheva YuB. Analysis of methods for diagnosing faults in a three-phase asynchronous electric motor. Omsk Scientific Bulletin. 2020;2(170):42-46. (In Russ.). <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2020-170-42-46>
4. Kruchek VA, Dvorkin PV. Modeling of thermal diagnostics processes of a diesel locomotive rectifier unit. Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering. 2023;20(1):52-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-1-52-59>
5. Kuznetsov AS. Information technologies and processing of experimental data: a tutorial. Saint Petersburg: Publishing house "Scientia"; 2025. 98 p. (In Russ.). https://doi.org/10.32415/scientia_978-5-907902-13-8
6. Vakhnina VV, Kuvshinov AA, Chernenko AN, Pudovinniko RN. Asymmetrical overload of a synchronous generator by harmonics of magnetization currents of a block transformer during geomagnetic disturbances. Electric Power Quality Management: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Moscow: Limited Liability Company "Rainbow Printing Services Center"; 2020. P. 50-56. (In Russ.).
7. Polischuk VI. Construction of protection against turn-to-turn short circuit in the rotor winding of a synchronous generator based on an induction sensor of magnetic leakage field. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. 2012;(4):57-61. (In Russ.)
8. Kondrashova YuN, Tretyakov AM, Shalimov AV. Forecasting of overhead power lines using predictive analytics. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;1(100):20-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024>
9. Voskoboinikov YuE. Recurrent estimation in dynamic systems. Novosibirsk: Publishing house of NSTU; 2002. 92 p. (In Russ.).
10. Rozhkov EV. An effective procedure for constructing piecewise linear classifiers and "generalized sliding control". Automation and Telemechanics. 2000;(9):147-155. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитрий Михайлович Баннов – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрических станций Самарского государственного технического университета, Scopus ID: 57221608445, Researcher ID: X-8956-2018.

Владимир Иосифович Полищук – доктор технических наук, профессор, профессор Политехнической школы Югорского государственного университета, Scopus ID: 16478590800, Researcher ID: N-7669-2016.

ВКЛАД АВТОРОВ

Дмитрий Михайлович Баннов

Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Владимир Иосифович Полищук

Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy M. Bannov – Cand. Sci. (Techn.), Senior Lecture of the Electric Power plant Department, Samara State Technical University, Scopus ID: 57221608445, Researcher ID: X-8956-2018.

Vladimir I. Polishchuk – Dr. Sci. (Techn.), Professor, Professor of the Polytechnical School, Yugra State University, Scopus ID: 16478590800, Researcher ID: N-7669-2016.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Dmitriy M. Bannov

Conducting research – data collection, analysis and interpretation.

Approval of the final manuscript – acceptance of responsibility for all types of the work, integrity of all parts of the paper and its final version.

Vladimir I. Polishchuk

Text preparation and editing – drafting of the manuscript and its final version, contribution to the scientific layout.