

В. С. Крылов¹✉, И. Д. Карпов²

Анализ стабильности аналоговых сигналов силы тока и переменного напряжения, а также фиктивной мощности в устройстве генерации испытательных воздействий

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий,

г. Новосибирск, Российская Федерация

² Акционерное Общество «Радио и Микроэлектроника»,

г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: krulov@sniim.ru

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования стабильности параметров генератора испытательных сигналов РЕТОМ-51 с применением статистического метода трех сигм (3σ). Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки современных подходов к оценке стабильности комплексных сигналов, включающих параметры силы тока, напряжения и фиктивной мощности, что критически важно для обеспечения достоверности поверочных процедур. Исследование продемонстрировало, что генератор РЕТОМ-51 обладает высокой стабильностью выходных характеристик, полностью соответствуя требованиям к эталонным источникам сигналов для поверки оборудования высокого класса точности. Применение метода 3σ -анализа позволило объективно оценить динамику изменения параметров при различных нагрузочных режимах, исследовать температурную зависимость характеристик и подтвердить соответствие оборудования нормативным требованиям. Полученные результаты убедительно свидетельствуют о пригодности РЕТОМ-51 для проведения высокоточных испытаний и открывают новые возможности для совершенствования методик метрологического контроля. Разработанный подход демонстрирует высокую эффективность и может быть рекомендован для внедрения в практику поверочных лабораторий.

Ключевые слова: стабильность сигналов, статистический анализ, контроль качества сигналов, метрология, испытательные воздействия

V. S. Krylov¹✉, I. D. Karpov²

Analysis of stability of analog current and alternating voltage signals, as well as apparent power in a test signal generation device

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

² JSC "Radio i Mikroelektronika", Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: krulov@sniim.ru

Abstract. The article presents the results of a comprehensive stability analysis of the RETOM-51 test signal generator using the three-sigma (3σ) statistical method. The study addresses the growing need for advanced evaluation techniques of complex signal stability parameters, including current, voltage, and apparent power characteristics, which are critical for ensuring the reliability of verification procedures. The investigation confirmed that the RETOM-51 generator demonstrates exceptional output stability, fully meeting the requirements for reference signal sources in high-accuracy calibration systems. The 3σ -method enabled objective assessment of parameter dynamics under various load conditions, temperature dependence analysis, and compliance verification with regulatory standards. The obtained results conclusively demonstrate the RETOM-51's suitability for precision testing applica-

tions and create new opportunities for enhancing metrological control methodologies. The developed approach shows high effectiveness and can be recommended for implementation in calibration laboratory practice, offering improved reliability for electrical measurement verification processes. The findings are particularly relevant for metrology specialists and test equipment developers working with high-precision measurement systems.

Keywords: signal stability, statistical analysis, signal processing, metrological assurance, test signals

Введение

Современные требования к точности электроизмерительных приборов выдвигают повышенные требования к стабильности испытательного оборудования. Особое значение приобретает комплексная оценка стабильности аналоговых сигналов, включая параметры силы тока, переменного напряжения и фиктивной мощности, что является критически важным для обеспечения достоверности поверочных процедур.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки новых подходов к оценке стабильности многофункциональных генераторов испытательных сигналов. Особое внимание уделяется анализу взаимного влияния различных параметров выходных сигналов и их изменению в процессе длительной эксплуатации оборудования.

Целью работы является комплексное исследование стабильности выходных параметров устройства РЕТОМ-51 производства компании «Динамика» для определения возможности его использования в качестве эталонного источника в поверочных схемах высокого класса точности [1]. В рамках исследования решаются следующие задачи:

- разработка методики оценки стабильности амплитудных и частотных характеристик генерируемых сигналов;
- анализ динамики изменения параметров при различных нагрузочных режимах;
- исследование температурной зависимости характеристик выходных сигналов;
- оценка соответствия полученных результатов требованиям нормативной документации [2].

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов анализа стабильности комплексных сигналов, включающих как силовые, так и мощностные характеристики. Практическая ценность исследования определяется возможностью использования разработанных методик при поверке и калибровке электроизмерительного оборудования [3], что позволяет повысить точность и достоверность измерений.

Особое внимание в работе уделено анализу таких ключевых параметров как:

- долговременная стабильность амплитуды силы тока;
- постоянство величины переменного напряжения;
- воспроизводимость фазовых характеристик;
- динамика изменения фиктивной мощности.

Результаты исследования представляют значительный интерес для специалистов в области метрологического обеспечения и разработчиков испытательного оборудования.

Методы и материалы

Стабильность аналоговых сигналов характеризуется их способностью сохранять заданные параметры во времени и при изменении внешних условий. Для количественной оценки стабильности используются следующие показатели: относительная стабильность амплитуды, изменения фиктивной мощности, статистические параметры обработки измерений. Анализ факторов нестабильности и их влияние на измеряемые параметры приведен в табл. 1.

Таблица 2

Фактор	Влияние на параметры	Методы компенсации
Температурный дрейф	Изменение сопротивления, емкости	Термостабилизация
Старение компонентов	Долговременный дрейф параметров	Периодическая калибровка
Электромагнитные помехи	Искажение формы сигнала	Экранирование
Нестабильность питания	Флуктуации амплитуды	Стабилизированные источники

В данном исследовании применялся современный подход к оценке стабильности параметров, сочетающий программную обработку данных с классическим статистическим анализом [4]. Суть метода заключалась в следующем: специализированное программное обеспечение непрерывно фиксировало значения выходных сигналов (напряжение, ток, мощность) с высокоточных измерительных приборов с интервалом 1 с в течение 5–8 мин. Для каждого параметра рассчитывались среднеквадратичные значения (RMS) на скользящем интервале, что позволило получить репрезентативную выборку данных (300-500 точек измерения для каждого параметра). В качестве оценочной характеристики результата использовалось правило «трех сигм».

Данный подход обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами контроля стабильности.

Высокая точность обеспечивается использованием RMS-значений вместо мгновенных измерений, что исключает влияние кратковременных помех и выбросов.

Объем выборки (300 точек) обеспечивает статистическую достоверность и надежность результатов анализа по критерию 3σ .

Динамический контроль (скользящее окно измерений) позволяет выявлять даже незначительные временные дрейфы параметров.

Программная реализация исключает субъективные ошибки оператора.

Особенно важно, что применение правила трех сигм к полученным данным позволяет не только констатировать факт нестабильности, но и количественно оценить:

- степень отклонения параметров;
- характер распределения погрешностей (случайный или систематический);
- динамику изменения стабильности во времени.

Такой подход превосходит традиционные методы периодического контроля по точечным измерениям, обеспечивая более полную и объективную картину поведения устройства в рабочих условиях.

Результаты

Исследование проводилось на базе стандартной поверочной схемы для комбинированных датчиков тока и напряжения производства компании «РиМ» [5]. В качестве эталонных средств измерений 2-го разряда использовались: трансформатор тока ТЛЛ-0,66.2 (класс точности 0,02), нормирующий измерительный преобразователь НЛЛ-10, многофункциональный измеритель Энергомонитор-61850.

Для воссоздания полной поверочной схемы дополнительно применялись: образцовый источник напряжения НОЛ-08.10, эталонный преобразователь РЕТ-10.

Особенностью проведенного анализа стало применение современного программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего: непрерывную регистрацию параметров с частотой 1 Гц в течение 5–8 мин, автоматический расчет среднеквадратичных значений (RMS).

Среднеквадратичные значения параметров определялись для:

- действующего значения напряжения;
- действующего значения тока;
- мгновенной мощности.

Результат статистической обработки данных по критерию 3σ приведены в табл. 2 для приборов учета высоковольтных интеллектуальных РиМ 384 и в табл. 3 для датчиков тока и напряжения комбинированных РиМ КДТН [6].

Таблица 2

№	Ток от $I_{\text{ном}}$	Угол φ , °	Активная мощность, Вт			Реактивная мощность, вар		
			ср. зн.	3σ	выброс	ср. зн.	3σ	выброс
1	$I_{\text{макс}}$	0	477502,3	39,8	нет	2688,2	0,3	нет
2	1	60	62431,7	5,2	нет	100738,5	8,4	нет
3	1	90	3709,3	0,3	нет	118463,2	9,9	нет
4	$I_{\text{макс}}$	14	463779,7	38,7	нет	113928,6	9,5	нет
5	1	30	104452,4	8,7	нет	56009,3	4,7	нет
6	1	323	96843,4	8,1	нет	68332,2	5,7	нет
7	0,05	0	5972,6	59,7	нет	30,2	0,3	нет
8	0,02	323	1904,4	19,0	нет	1443,6	14,4	нет
9	0,01	240	6235,4	62,4	нет	10118,5	101,2	нет
10	0,02	90	12,8	0,1	нет	2387,8	23,9	нет
11	0,1	30	10458,9	104,6	нет	5644,1	56,4	нет
12	0,05	166	11444,4	114,4	нет	3205,4	32,1	нет

Таблица 3

№	Ток от $I_{НОМ}$	Напряже- ние от $U_{НОМ}$	Угол φ, °	Напряжение, В			Сила тока, А		
				ср. зн.	3σ	вы- брос	ср. зн.	3σ	вы- брос
1	0,01	1	0	5743,05	57,43	нет	0,1008	0,0010	нет
2	0,05	1	0	5742,98	57,43	нет	0,4998	0,0050	нет
3	0,2	1	0	5742,61	57,43	нет	1,990	0,020	нет
4	1	1	0	5742,67	57,43	нет	10,00	0,10	нет
5		1	0	5743,02	57,45	нет	199,1	1,7	нет
6	1	0,8	0	4686,43	46,87	нет	10,00	0,10	нет
7	1	1	0	5742,67	57,43	нет	10,00	0,10	нет
8	1	1,2	0	6892,22	68,93	нет	10,00	0,10	нет

Экспериментальная схема была реализована в соответствии с нормативной документацией, а именно – методикой поверки комбинированных датчиков тока и напряжения, схематическое изображение которой представлено на рис. 1, 2.

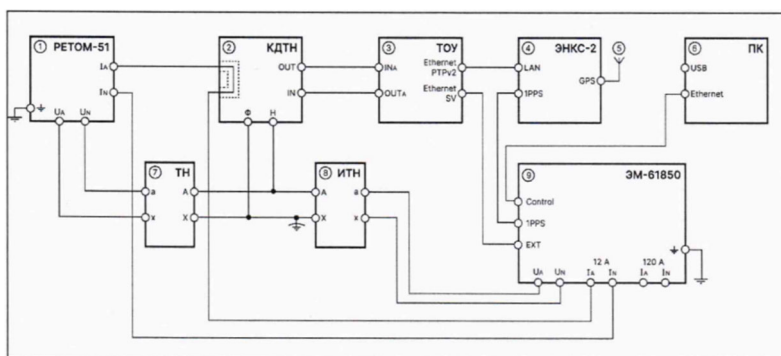


Рис. 1. Схема контроля МП РиМ КДТН до 10А

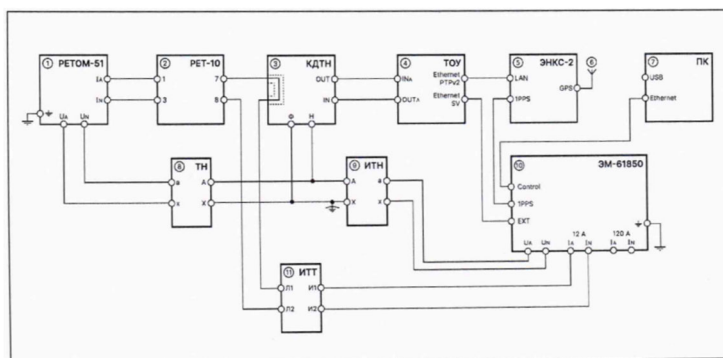


Рис. 2. Схема контроля МП РиМ КДТН свыше 10А

Полученные результаты во всех исследуемых режимах свидетельствуют о стабильном функционировании генератора РЕТОМ-51 при формировании аналоговых сигналов тока, напряжения и фазового сдвига. Наблюдаемая воспроизводимость параметров в различных условиях эксплуатации соответствует заяв-

ленным техническим характеристикам и подтверждает возможность использования устройства в качестве эталонного источника сигналов для метрологических целей [7, 8]. Исследование всех контрольных точек показало согласованные данные, что дополнительно обосновывает надежность и точность работы генератора при длительной эксплуатации.

Заключение

Применение статистического метода трех сигм (3σ) для анализа нестабильности параметров испытательного оборудования продемонстрировало высокую эффективность и информативность. Результаты исследования убедительно подтверждают, что генератор испытательных сигналов РЕТОМ-51 обладает требуемой стабильностью выходных характеристик и полностью пригоден для проведения высокоточных испытаний и поверочных работ. Метод позволил объективно оценить стабильность выходных параметров, выявить потенциальные источники дрейфа и подтвердить соответствие оборудования требованиям нормативной документации, что свидетельствует о его надежности и точности в рабочих условиях.

Разработанный подход на основе 3σ -анализа показал свою универсальность и может быть рекомендован для внедрения в практику метрологического контроля. Полученные результаты не только подтверждают пригодность РЕТОМ-51 для проведения испытаний, но и демонстрируют перспективность его использования в качестве эталонного источника сигналов. Метод обеспечивает высокую чувствительность к малым изменениям параметров, позволяет автоматизировать процесс оценки стабильности и существенно повышает достоверность получаемых результатов, что открывает новые возможности для совершенствования методик контроля измерительного оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 8.000–2023 Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к поверочным установкам. – Москва : Стандартинформ, 2023. – 45 с.
2. ГОСТ Р 8.735–2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологические исследования. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 32 с.
3. ГОСТ Р 8.879–2020 Средства измерений электрических величин. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 28 с.
4. ГОСТ Р 8.736–2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые многократные измерения. Методы обработки результатов измерений. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 36 с.
5. МП ВНКЛ.411618.005 ГСИ. Датчики тока и напряжения комбинированные. Методика поверки, 2023. – 21 с.
6. ГОСТ Р 8.110–2019 Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 24 с.
7. ГОСТ Р 8.615–2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение испытаний продукции. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 40 с.
8. ГОСТ Р 8.903–2015 Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений электрических величин. Методы поверки. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 64 с.

© В. С. Крылов, И. Д. Карнов, 2025