

УДК 621.317.38

DOI 10.62595/1819-5245-2026-3-87-97

ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА RMS-ЗНАЧЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ В СОВРЕМЕННЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ПРИБОРАХ

Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ, А. А. КАПАНСКИЙ, О. Г. ШИРОКОВ

Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь

Выполнен теоретический анализ различных алгоритмов расчета среднеквадратических, т. е. RMS-значений напряжений и токов в электрических сетях. Показано, что из-за процесса дискретизации аналоговых величин во времени, инерционности их среднеквадратических значений и влияния высших гармонических составляющих определить RMS-значения с высокой точностью очень сложно даже при высоком быстродействии аппаратной части прибора. Предложено выполнять расчет RMS-значений за 6–7 периодов напряжения сети для обычных измерительных приборов, а для приборов в области качества электроэнергии – за полпериода.

Ключевые слова: электрическая сеть, напряжение, ток, среднеквадратическое значение, микропроцессорный прибор, алгоритм, погрешность, высшие гармоники, качество электроэнергии.

Для цитирования. Зализный, Д. И. Особенности алгоритмов расчета RMS-значений напряжений и токов в современных микропроцессорных приборах / Д. И. Зализный, А. А. Капанский, О. Г. Широков // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 3 (106). – С. 87–97. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-3-87-97>

FEATURES OF RMS VOLTAGE AND CURRENT CALCULATION ALGORITHMS IN MODERN MICROPROCESSOR-BASED DEVICES

D. I. ZALIZNY, A. A. KAPANSKY, O. G. SHIROKOV

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

A theoretical analysis of various algorithms for calculating root-mean-square (RMS) voltage and current values in electrical networks has been conducted. It is shown that, due to the time-domain discretization of analog quantities, the inherent inertia of their RMS values, and the influence of higher harmonic components, determining RMS values with high accuracy is extremely difficult even when the device hardware operates at high speeds. It is proposed that RMS calculations be performed over 6–7 mains voltage periods for standard measuring instruments, and over half a period for power quality monitoring devices.

Keywords: electrical network, voltage, current, root-mean-square (RMS) value, microprocessor-based device, algorithm, error, higher harmonics, power quality.

For citation. Zalizny D. I., Kapansky A. A., Shirokov O. G. Features of RMS voltage and current calculation algorithms in modern microprocessor-based devices. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 3 (106), pp. 87–97 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-3-87-97>

Введение

Практически все современные измерительные приборы для задач энергетики являются микропроцессорными, т. е. строятся на основе микроконтроллеров, программное обеспечение которых выполняет обработку значений измеренных величин

и затем необходимые расчеты. Одним из наиболее распространенных видов расчетов является расчет RMS -значений напряжений и токов.

Аббревиатура RMS в современной электротехнике означает *Root Mean Square* – «среднеквадратическое значение» и применяется как эквивалент терминов «действующее» или «эффективное» значение напряжения или тока. Как известно, многие энергетические показатели определяются именно через действующие, т. е. RMS -значения напряжений и токов. Так, например, полная мощность однофазной нагрузки должна рассчитываться по формуле

$$S = U_{RMS} I_{RMS}. \quad (1)$$

От правильности и корректности алгоритмов расчета RMS -значений зависят классы точности большинства энергетических электронных приборов. Эти алгоритмы имеют ряд особенностей, связанных с процессом дискретизации (разбиением на равные интервалы времени) измеряемых аналоговых сигналов. Разработчики измерительных приборов самостоятельно решают возникающие проблемы, не публикуя, как правило, свои решения. В результате каждое предприятие-изготовитель тратит время и ресурсы на устранение неточностей в алгоритмах, иногда приходя к окончательному варианту программного обеспечения через несколько лет тестирований и испытаний.

Цель данного исследования – описать ряд особенностей функционирования алгоритмов для расчета RMS -значений напряжений и токов в электрических сетях, а также способов учета этих особенностей в программном обеспечении измерительных приборов.

Обзор литературных источников

В отечественной литературе рассматриваемая тематика представлена крайне слабо, поскольку алгоритмизация измерений чаще относится исследователями к области инженерных разработок, а не к самостоятельному объекту научного анализа. Так, в статье [1] автором сделана попытка математически описать в рамках одной модели основные составляющие процесса преобразования измеряемой аналоговой величины в результат с учетом влияния помех. Показано, что при периоде опроса аналоговых датчиков 10–100 с влияние помех минимально. Однако в данной работе отсутствует анализ особенностей измерения напряжений и токов в электрических сетях.

В учебном пособии [2] представлен базовый алгоритм расчета RMS -значений напряжений и токов, однако связанные с ним погрешности специально не рассматриваются. Алгоритмы расчета активной и реактивной мощности приведены в статье [3], но также без анализа возможных погрешностей вычисления RMS -значений. В работах [4–6] показана практическая значимость корректной работы алгоритмов измерительных приборов для задач энергетики, однако вопросы выбора расчетного окна, влияния дискретизации и поведения RMS -значений при переходных процессах в них не исследуются.

В зарубежных исследованиях RMS -значение рассматривается как базовый вычислительный показатель, чувствительный к длине временного окна, частоте дискретизации и моменту начала события. В работах [7, 9] показаны ограничения применения RMS при оценке качества электроэнергии, связанные с выбором временного окна RMS и ошибками определения глубины и длительности кратковременных изменений напряжения. В [8, 10, 11] RMS -профили используются для классификации событий и анализа достоверности фиксации провалов напряжения, а в [12] оценивается влияние отклонения частоты, точки возникновения события и гармонических составляющих на корректность вычисления среднеквадратического напряжения.

Отдельная группа публикаций посвящена практической реализации алгоритмов в микропроцессорных измерительных устройствах. В [13, 14] рассматриваются ограничения памяти и вычислительных ресурсов при реализации расчетов истинного среднеквадратического напряжения, гармонического анализа и показателей качества электроэнергии на аппаратных платформах с ограниченными вычислительными ресурсами. В [15, 16] анализируются альтернативные способы отслеживания провалов напряжения для ускоренного обнаружения событий по пиковому значению за полупериод и по фильтрации квадратов выборок напряжения. В [17, 18] представлены *RMS*-методы и скользящие алгоритмы для обнаружения провалов и перенапряжений, показывающие влияние выбранного окна расчета на погрешность определения параметров события.

Таким образом, анализ литературы показывает, что существующие исследования либо рассматривают расчет *RMS*-напряжения в области качества электроэнергии и обнаружения аномалий, либо касаются практической реализации измерительных алгоритмов в микропроцессорных устройствах. Вместе с тем комплексный анализ влияния длины расчетного окна, дискретизации, гармонических составляющих и переходных процессов на точность расчета *RMS*-значений напряжений и токов в измерительных приборах представлен недостаточно, что определяет актуальность настоящего исследования.

Расчет *RMS*-значений в установившемся режиме

Как показано в [2], алгоритм расчета *RMS*-значений напряжений математически выводится следующим образом:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \approx \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n U_i^2 \Delta t} = \sqrt{\frac{\Delta t}{T} \sum_{i=1}^n U_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i^2}, \quad (2)$$

где T – интервал времени расчета, как правило, кратный периоду напряжения сети; $u(t)$ – мгновенные значения напряжения сети; n – количество выборок напряжения за интервал времени, кратный периоду напряжения сети; i – номер выборки; U_i – значение выборки.

RMS-значения токов рассчитываются аналогично.

Дискретизация аналогового сигнала на примере напряжения сети изображена на рис. 1.

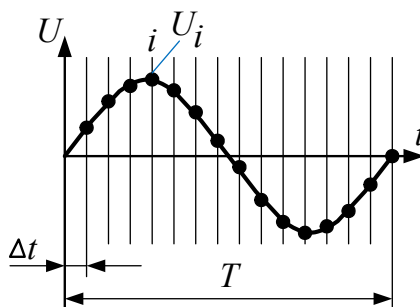


Рис. 1. Дискретизация напряжения сети

В процессе дискретизации аналоговый сигнал $u(t)$ разбивается на выборки U_i через равные интервалы времени Δt , называемые периодом дискретизации. Из формулы (2) следует, что U_{RMS} не зависит от Δt . Однако значение величины Δt ограни-

чено по минимуму требованиями теоремы Котельникова, а по максимуму – аппаратными возможностями прибора: объемом памяти и быстродействием аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Наибольшую трудность в алгоритме (2) представляет определение значения n , т. е. в простейшем случае количества выборок за один период T . В программном обеспечении прибора возможны два способа: по переходам кривой напряжения через ноль или через максимумы. Первый способ является более предпочтительным, так как в случае попадания лишней или недостающей выборки из-за помех или нестабильности измеряемого напряжения погрешность должна быть минимальна. Оценим значение этой погрешности.

Пусть форма кривой напряжения будет синусоидальна с частотой 50 Гц и RMS -значением 220 В. Пусть также из-за помех в расчет попадет одна лишняя выборка на переходе через ноль (количество выборок будет соответственно $n + 1$). В табл. 1. приведены значения относительной погрешности δ , обусловленной появлением одной лишней выборки, в зависимости от значения n .

Таблица 1

Значения погрешности расчета RMS -значений

n	50	80	100	150	200	300	500
$\delta, \%$	0,99	0,62	0,5	0,33	0,25	0,17	0,1

Из табл. 1 следует, что даже при 500 выборок за период погрешность принимает достаточно существенные значения, сравнимые с классом точности прибора.

Смоделируем в среде Mathcad синусоидальный график напряжения сети с периодом дискретизации 0,2 мс, т. е. 100 точек на период. С помощью алгоритма, фиксирующего переходы через ноль, определим RMS -значения напряжения на каждом периоде. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

 RMS -значения напряжения и рассчитанные значения n

$U_{RMS}, В$	220,0	220,0	218,908	221,108	220,0	218,908	221,108	220,0
n	100	100	101	99	100	101	99	100

Из табл. 2 видно, что даже теоретические значения n нестабильны от периода к периоду, и соответственно изменяются результаты расчета. Это свидетельствует о том, что определение RMS -значений за один период практически никогда не позволит достичь высокого класса точности измерений. Причина такой нестабильности заключается в том, что моменты перехода синусоидального напряжения через ноль не совпадают с моментами дискретизации. Поэтому при фиксации границ периода по отсчетам в один расчетный интервал может попасть 99-я, 100-я или 101-я выборка, что влияет на результат расчета.

Рассмотрим зависимость RMS -значения от количества периодов, за которые определяется параметр n . На рис. 2 показан график RMS -значений напряжения синусоидальной формы, рассчитываемых кумулятивно, т. е. для каждой новой выборки – новое RMS -значение, учитываемое за все предыдущие выборки. В данном случае период дискретизации по выборкам был принят 0,2 мс.

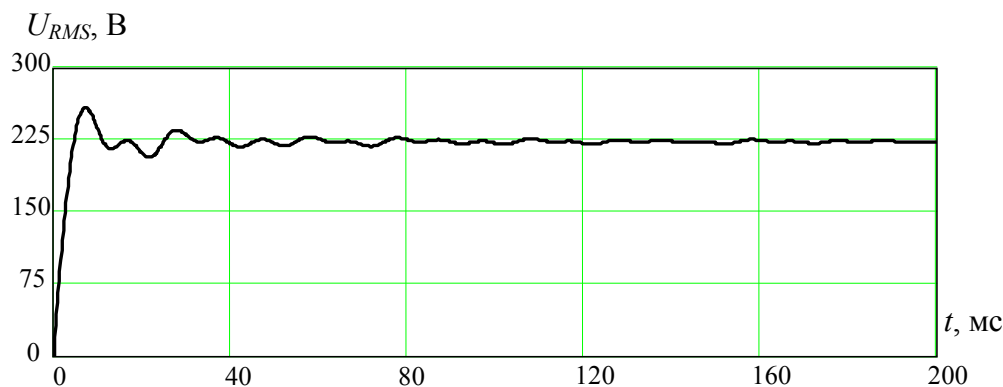


Рис. 2. График RMS -значений напряжения, рассчитанных кумулятивно

Из графика на рис. 2 видно, что после шести периодов напряжения сети, т. е. примерно через 120 мс при частоте 50 Гц, влияние количества выборок на рассчитанное RMS -значение становится незначительным. Следовательно, для обеспечения высокой точности измерения RMS -значений целесообразно рассчитывать их не менее чем за шесть периодов напряжения сети.

В некоторых задачах, таких как расчет показателей качества электроэнергии, требуется выполнять расчет RMS за один период или быстрее. Однако определить RMS -значения за полпериода возможно, если положительная и отрицательная полуволны симметричны относительно оси времени. Это наблюдается, когда в спектре сигнала присутствуют только нечетные гармонические составляющие. Если же в спектре появятся четные гармоники с фазовыми сдвигами, то полуволны станут несимметричными относительно оси времени. На рис. 3 показана временная диаграмма тока, в спектре которого наблюдается вторая гармоника с амплитудой 16 % от амплитуды первой гармоники и фазой 40° . На практике такая форма тока возможна при нелинейном характере нагрузки.

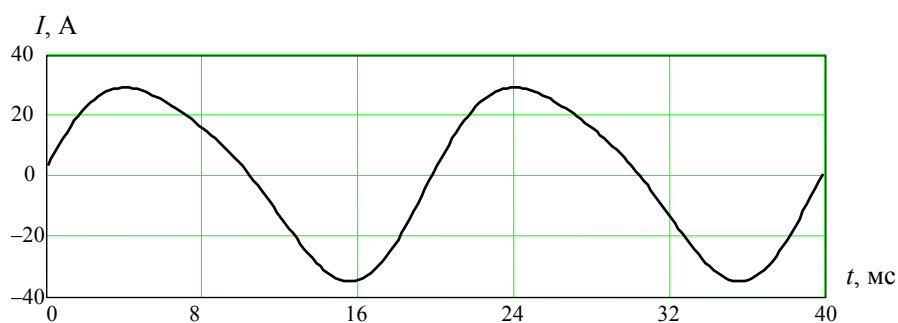


Рис. 3. Диаграмма тока с наличием второй гармоники

Для формы тока на рис. 3 RMS -значение, рассчитанное за один период, составляет 22,28 А, а рассчитанное за полпериода — 21,12 А, т. е. относительная погрешность равна 5,2 %.

Как известно, четные гармоники в спектре напряжения практически всегда отсутствуют, поэтому расчет RMS -значений для них можно рекомендовать и за полпериода, а вот для токов возможны дополнительные погрешности, связанные с появлением четных гармоник.

Для дальнейшего сокращения времени расчета в некоторых приборах RMS -значение определяют за одну четверть периода. Оценим возможную погрешность для та-

кого подхода. На рис. 4 показана временная диаграмма напряжения, в спектре которого наблюдается третья гармоника с амплитудой 6 % от амплитуды первой гармоники и фазой 40° .

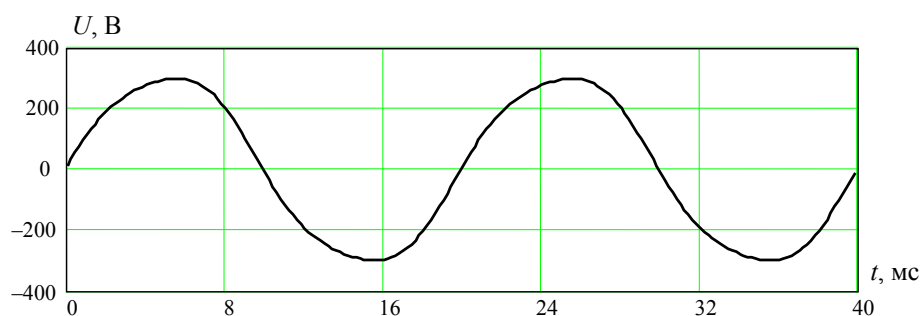


Рис. 4. Диаграмма напряжения с наличием третьей гармоники

В данном случае при расчете *RMS*-значения за один период и за 1/2 периода получаем одинаковые значения – 220,41 В, а за 1/4 периода – 210,82 В, т. е. погрешность по отношению к первым двум вариантам равна 4,6 %.

Таким образом, расчет *RMS*-значений напряжений за 1/4 периода не рекомендуется, а за 1/2 периода в большинстве случаев результат будет соответствовать погрешности по табл. 1.

Расчет *RMS*-значений при переходных процессах

Особый интерес представляет расчет *RMS*-начений во время переходных процессов напряжений и токов. Рассмотрим ситуацию провала напряжения, показанную на рис. 5.

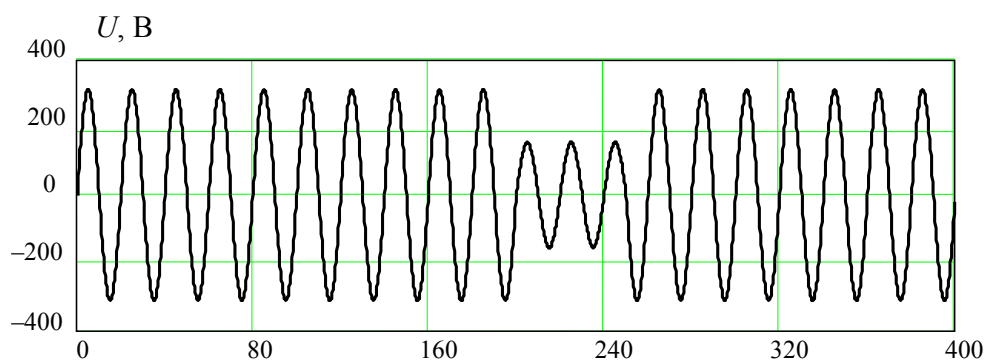


Рис. 5. Диаграмма напряжения с колебанием его амплитуды

В этой ситуации напряжение имеет вначале неизменную амплитуду, затем через 200 мс появляется провал глубиной 50 %, длительностью 50 мс.

На рис. 6–9 приведены результаты расчета *RMS*-значений при различных длительностях окна усреднения. Расчет выполнялся по выборкам напряжения, попадающим соответственно в интервал 0,5, 1, 2 и 3 периода сети, а границы этих интервалов определялись по переходам кривой напряжения через ноль.

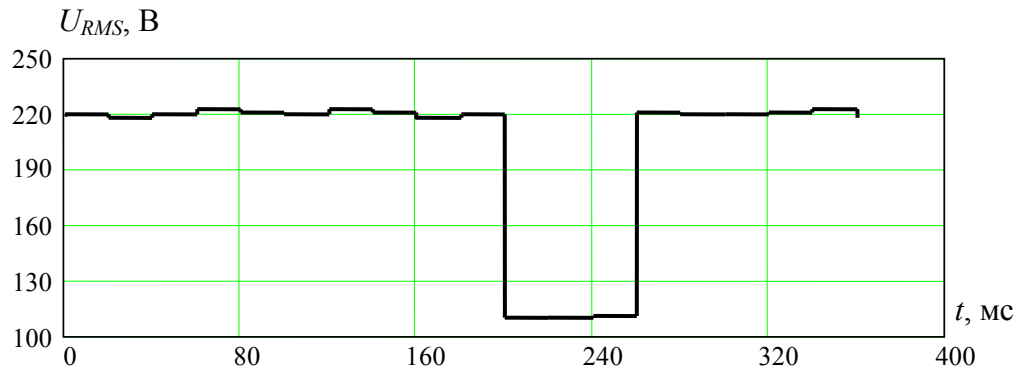


Рис. 6. Диаграмма RMS-значений напряжения с расчетом за 0,5 периода

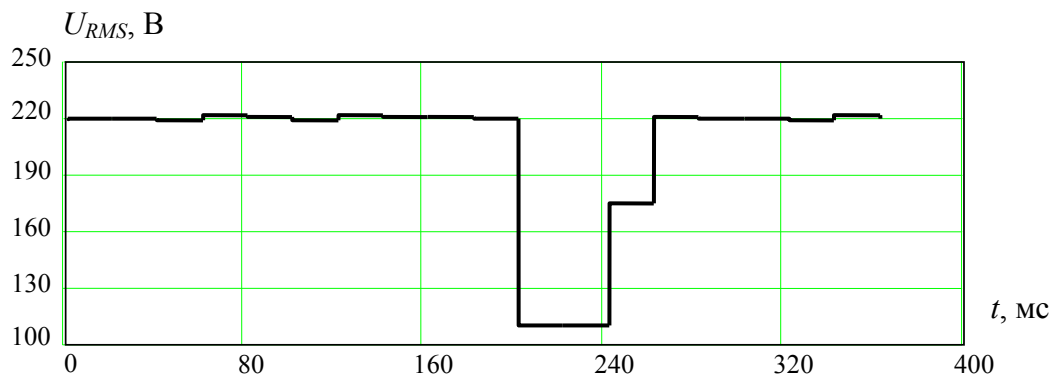


Рис. 7. Диаграмма RMS-значений напряжения с расчетом за 1 период

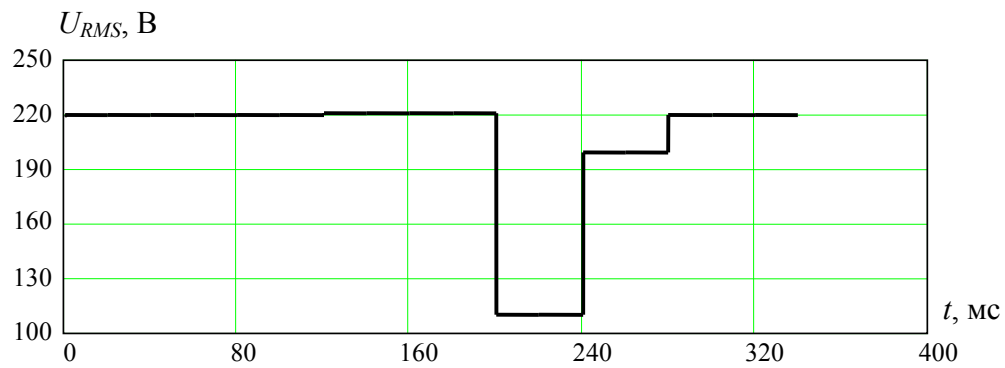


Рис. 8. Диаграмма RMS-значений напряжения с расчетом за 2 периода

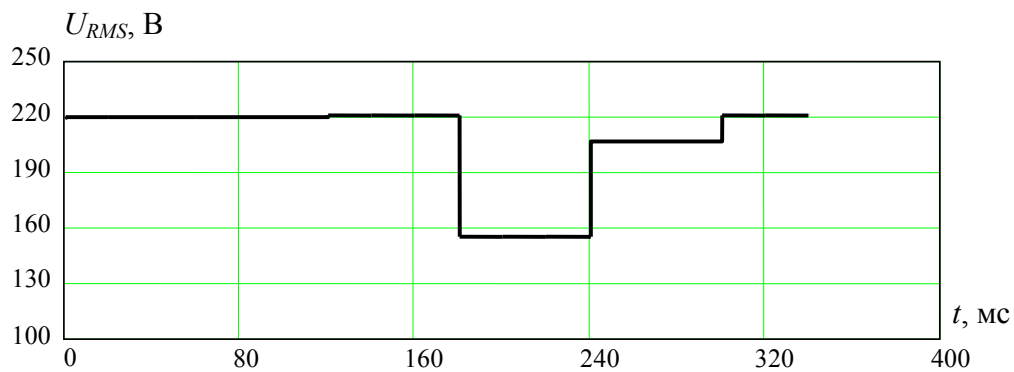


Рис. 9. Диаграмма RMS-значений напряжения с расчетом за 3 периода

Расчет с интервалом за полпериода осуществлялся следующим образом. Вначале фиксировался переход через ноль положительной полуволны, затем в течение этой полуволны выполнялся расчет *RMS*-значения, и далее отрицательная полуволна игнорировалась. То есть в данном случае общий интервал расчета составил один период.

Из рис. 6 видно, что из-за малого интервала расчета вначале наблюдаются колебания *RMS*-значений, обусловленные ошибкой одного периода дискретизации, о которой говорилось выше. После этого виден провал *RMS*-значений, соответствующий изменению исходной кривой напряжения. Длительность этого провала составила 60 мс (при исходной 50 мс), а глубина равна 50 %.

На рис. 7 в области провала видны две ступени с параметрами – 40 мс, 50 % и 20 мс, 80 %.

На рис. 8 в области провала также есть две ступени с параметрами – 40 мс, 50 % и 40 мс, 90 %.

На рис. 9 снова видим две ступени с параметрами – 60 мс, 70 % и 60 мс, 94 %.

В целом можно заключить, что параметры исходного провала напряжения наиболее адекватно фиксируются при расчете *RMS*-значений за полпериода. Однако и здесь погрешность в длительности события составила 17 %.

Возможным решением проблемы мог бы стать отказ от необходимости контролировать параметры колебаний напряжения по *RMS*-значениям. В качестве альтернативы можно было бы определять огибающую по максимумам напряжения, или две огибающие – по положительным и отрицательным пикам. Аргументировать такой подход можно тем, что при перенапряжениях причиной пробоя изоляции электрооборудования и полупроводниковых компонентов электронных приборов являются именно пиковые, мгновенные, а не действующие значения напряжения.

Особенности расчета *RMS*-значений в микропроцессорных устройствах

Рассмотрим проблему синхронизации различных блоков микропроцессорного устройства при расчетах *RMS*-значений в режиме реального времени. На рис. 10 показана структурная схема, демонстрирующая основные составляющие аппаратной части.



Рис. 10. Структурная схема измерительного прибора

Измеряемые напряжения и токи вначале поступают на измерительную аналоговую часть прибора, а затем на АЦП, составляющие в целом блок измерений. Полученные в результате дискретизации во времени и работы АЦП двоичные коды через интерфейс связи передаются в память микроконтроллера, программное обеспечение которого затем выполняет расчеты *RMS*-значений. Этот процесс осложняется тремя проблемами: конечным быстродействием АЦП, ограниченной скоростью интерфейса связи и, самое важное, затратами времени, необходимыми микроконтроллеру на последовательность расчетов, – сумму квадратов выборок, деление на их количество и извлечение квадратного корня.

Проблема синхронизации заключается в том, что микроконтроллер должен успеть выполнить все расчеты за интервал времени между принимаемыми пакетами двоичных кодов выборок измеряемых величин. Наилучший вариант в данном случае – расчет *RMS*-значений за полпериода. Тогда у микроконтроллера есть около 10 мс на проведение расчетов.

Таким образом, непрерывный расчет *RMS*-значений представляет собой сложную задачу, требующую дополнительных аппаратных затрат, связанных с применением быстродействующего оборудования. Но, как правило, в программном обеспечении большинства устройств присутствуют пробелы, разрывы в непрерывном потоке расчетов *RMS*-значений, что особенно критично для приборов, контролирующих показатели качества электроэнергии.

Заключение

RMS-значение – достаточно инерционная величина, и ее очень сложно определять с высокой точностью даже в установившемся режиме. Учитывая, что в реальных условиях установившихся режимов фактически не существует (напряжения и токи в электрической сети всегда изменяются), определить *RMS*-значение с классом точности выше 0,1 практически невозможно.

Оптимальным вариантом для большинства измерительных приборов можно признать расчет *RMS*-значений за 6–7 периодов, а для приборов в области качества электроэнергии – за полпериода.

Литература

1. Шевчук, В. П. Модели метрологических характеристик интеллектуальных измерительных приборов / В. П. Шевчук // Измерительная техника. – 2010. – № 12. – С. 8–14.
2. Микроэлектронные и микропроцессорные устройства в энергетике : учеб. пособие / Д. И. Зализный. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 194 с.
3. Зализный, Д. И. Алгоритмы расчета активной и реактивной мощности нагрузки электрических сетей переменного тока в программном обеспечении измерительного прибора / Д. И. Зализный, Р. Ш. Шипецкий // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2023. – № 2 (93). – С. 77–87.
4. Использование интеллектуальных приборов учета электрической энергии в целях повышения эффективности процесса тарифообразования / Т. А. Мусаев, Р. Н. Камалиев, О. В. Федоров, А. А. Капанский // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2020. – № 2 (81). – С. 68–75.
5. Коршунов, Е. А. Автоматизация процессов обслуживания энергетического оборудования с помощью специализированных программных решений / Е. А. Коршунов, А. А. Капанский, К. Е. Коршунов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 1 (53). – С. 65–75.
6. Прокопчик, В. В. О метрологическом обеспечении задач контроля качества электрической энергии / В. В. Прокопчик, О. Г. Широков, В. В. Довгаль // Метрологическое обеспечение качества – 2000 : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 нояб. 2000 г. / Белорус. гос. политехн. акад. ; под ред. В. Л. Соломахо. – Минск, 2000. – С. 196–200.
7. Albu, M. On the use of RMS values in power quality assessment / M. Albu, G. T. Heydt // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – Vol. 18 (4). – P. 1586–1587. – DOI 10.1109/TPWRD.2003.817518
8. Styvaktakis, E. Automatic classification of power system events using RMS voltage measurements / E. Styvaktakis, M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. – 2002. – Vol. 2. – P. 824–829. – DOI 10.1109/PSS.2002.1043446
9. Barros, J. Limitations in the use of R.M.S. value in power quality analysis / J. Barros, E. Pérez // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. – 2006. – P. 2261–2264. – DOI 10.1109/IMTC.2006.328575
10. Barros, J. Automatic detection and analysis of voltage events in power systems / J. Barros, E. Pérez // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2006. – Vol. 55 (5). – P. 1487–1493. – DOI 10.1109/TIM.2006.881584

11. Survey on voltage dip measurements in standard framework / D. Gallo, C. Landi, M. Luiso, E. Fiorucci // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 374–387. – DOI 10.1109/TIM.2013.2278996
12. Balouji, E. Assessment of RMS computation in terms of power quality event detection / E. Balouji, Ö. Salor // *23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. – 2015. – P. 2396–2399. – DOI 10.1109/SIU.2015.7130364
13. A memory-efficient true-RMS estimator in a limited-resources hardware / J. M. Flores-Arias, M. Ortiz-Lopez, F. J. Quiles Latorre [et al.] // *Energies*. – 2019. – Vol. 12 (9). – P. 1699.
14. PQ and harmonic assessment issues on low-cost smart metering platforms: a case study / G. Artale, G. Caravello, A. Cataliotti [et al.] // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20 (21). – P. 6361.
15. Tarasiuk, T. Simple methods of voltage dip tracking – case study / T. Tarasiuk // *Acta IMEKO*. – 2017. – Vol. 6 (4). – P. 80–88.
16. Zaro, F. R. Efficient on-line detection scheme of voltage events using quadrature method / F. R. Zaro, S. O. Al-Takroui, M. A. Abido // *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*. – 2019. – Vol. 8 (2). – P. 95–102. – DOI 10.18178/ijeetc.8.2.95-102
17. Voltage sag disturbance detection based on RMS voltage method / N. Ding, W. Cai, J. Suo [et al.] // *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. – 2009. – P. 1–4. – DOI 10.1109/APPEEC.2009.4918960
18. Meena, P. A. Modified simple algorithm for detection of voltage sags and swells in practical loads / P. Meena, K. U. Rao, D. Ravishankar // *2009 International Conference on Power Systems*. – 2009. – P. 1–6. – DOI 10.1109/ICPWS.2009.5442667

References

1. Shevchuk V. P. Models of metrological characteristics of intelligent measuring instruments. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*, 2010, no. 12, pp. 8–14 (in Russian).
2. Zaliznyi D. I. *Microelectronic and microprocessor-based devices in the power industry*. Gomel', GGTU im. P. O. Sukhogo, 2019. 194 p. (in Russian).
3. Zaliznyi D. I., Shipetskii R. Sh. Algorithms for calculating active and reactive load power in AC electrical networks within the measuring instrument's software. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2023, no. 2, pp. 77–87 (in Russian).
4. Musaev T. A., Kamaliev R. N., Fedorov O. V., Kapanskii A. A. Use of smart electricity meters to enhance the efficiency of the tariff-setting process. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2020, no. 2, pp. 68–75 (in Russian).
5. Korshunov E. A., Kapanskii A. A., Korshunov K. E. Automation of power equipment maintenance processes using specialized software solutions. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2022, vol. 14, no. 1 (53), pp. 65–75 (in Russian).
6. Prokopchik V. V., Shirokov O. G., Dovgal' V. V. Metrological solution to the problem of electric power quality monitoring. *Metrologicheskoe obespechenie kachestva – 2000: materialy Mezhdunar. nauch.-tekh. konf., Minsk, 28–30 noyab. 2000 g.* [Metrological assurance of quality – 2000: proceedings of the international scientific and technical conference, Minsk, November 28–30, 2000]. Minsk, Belorusskaya gosudarstvennaya politekhnicheskaya akademiya, 2000, pp. 196–200 (in Russian).
7. Albu M., Heydt G. T. On the use of RMS values in power quality assessment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, vol. 18 (4), pp. 1586–1587. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.817518>
8. Styvaktakis E., Bollen M. H. J., Gu I. Y. H. Automatic classification of power system events using RMS voltage measurements. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2002, vol. 2, pp. 824–829. <https://doi.org/10.1109/PESS.2002.1043446>

9. Barros J., Pérez E. Limitations in the use of R.M.S. value in power quality analysis. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 2006, pp. 2261–2264. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2006.328575>
10. Barros J., Pérez E. Automatic detection and analysis of voltage events in power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, vol. 55 (5), pp. 1487–1493. <https://doi.org/10.1109/TIM.2006.881584>
11. Gallo D., Landi C., Luiso M., Fiorucci E. Survey on voltage dip measurements in standard framework. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, vol. 63 (2), pp. 374–387. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2278996>
12. Balouji E., Salor Ö. Assessment of RMS computation in terms of power quality event detection. *23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2015, pp. 2396–2399. <https://doi.org/10.1109/SIU.2015.7130364>
13. Flores-Arias J. M., Ortiz-Lopez M., Quiles Latorre F. J., Bellido-Outeiriño F. J., Moreno-Muñoz A. A memory-efficient true-RMS estimator in a limited-resources hardware. *Energies*, 2019, vol. 12 (9), P. 1699. <https://doi.org/10.3390/en12091699>
14. Artale G., Caravello G., Cataliotti A., Cosentino V., Di Cara D., Dipaola N., Guaiana S., Panzavecchia N., Sambataro M. G., Tinè G. PQ and harmonic assessment issues on low-cost smart metering platforms: a case study. *Sensors*, 2020, vol. 20 (21), P. 6361. <https://doi.org/10.3390/s20216361>
15. Tarasiuk T. Simple methods of voltage dip tracking – case study. *Acta IMEKO*, 2017, vol. 6 (4), pp. 80–88. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v6i4.316
16. Zaro F. R., Al-Takroui S. O., Abido M. A. Efficient on-line detection scheme of voltage events using quadrature method. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, 2019, vol. (2), pp. 95–102. <https://doi.org/10.18178/ijeetc.8.2.95-102>
17. Ding N., Cai W., Suo J., Wang J., Xu Y. Voltage sag disturbance detection based on RMS voltage method. *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2009, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918960>
18. Meena P., Rao K. U., Ravishankar D. A modified simple algorithm for detection of voltage sags and swells in practical loads. *2009 International Conference on Power Systems*, 2009, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICPWS.2009.5442667>

Поступила 25.06.2026 г.