

# Позволяя сделать солнечные инверторы меньше, дешевле и надежнее

Новые технологии позволяют фотоэлектрическим инверторам (PV) работать на все более высоких частотах, поэтому данные устройства становятся все меньше и легче. Международная конкуренция и отказ от субсидирования новых установок требуют снижения их стоимости. Датчики тока, используемые в PV-инверторах, обязаны следовать этим тенденциям: они должны иметь меньшее посадочное место при аналогичных или лучших параметрах и меньшую стоимость, чем у датчиков, которые они заменяют. Типовая PV-установка содержит датчики тока в трех различных цепях. Первый установлен в цепи постоянного тока для отслеживания точки максимальной мощности (MPPT — Maximum Power Point Tracking). Остальные — в цепях переменного тока, один нужен для измерения параметров выходного тока, а второй — для обеспечения безопасности: этот сенсор анализирует остаточный ток (RCM — Residual Current Measurement) на выходе, вызванный утечками в цепь заземления. По его сигналу система может быть отключена в случае необходимости. В данной статье показано, как новые датчики LEM могут использоваться для реализации функции MPPT и управления формой AC-тока. Также представлен новый компактный сенсор, разработанный для измерения RCM.

Дэвид Джоблинг  
(David Jobling)

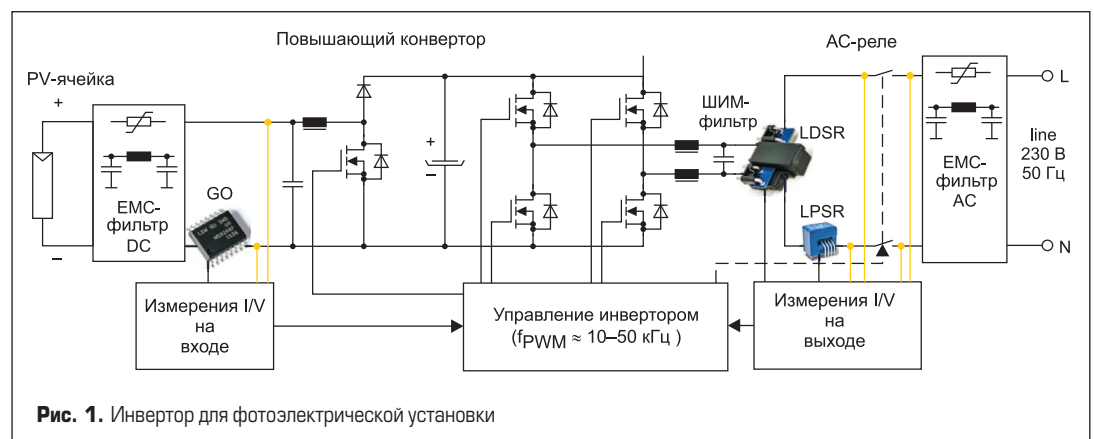
Перевод:  
Евгений Карташев

## Введение

На рис. 1 показаны основные компоненты инвертора PV-системы, как правило используемые в бытовых солнечных станциях мощностью до 20 кВт. Несколько таких инверторов могут объединяться в установку, которая подключается к сети через приборы учета.

В течение последнего десятилетия в инверторах применяются кремниевые MOSFET-транзисторы, в будущем на смену кремниевым приборам придут

новые MOSFET на основе SiC и GaN. Это даст возможность перейти на более высокие частоты коммутации, что в свою очередь снизит номиналы реактивных компонентов (индуктивности, конденсаторы) и, следовательно, уменьшит физические размеры комплектующих и всей системы. Инвертор мощностью 2 кВт, разработанный в 2010 году и имеющий вес 20 кг согласно спецификации производителя, в 2016-м заменен новой моделью весом менее 10 кг. Для того чтобы токовые датчики, предусмотренные в PV-системе, продолжали занимать незначительную



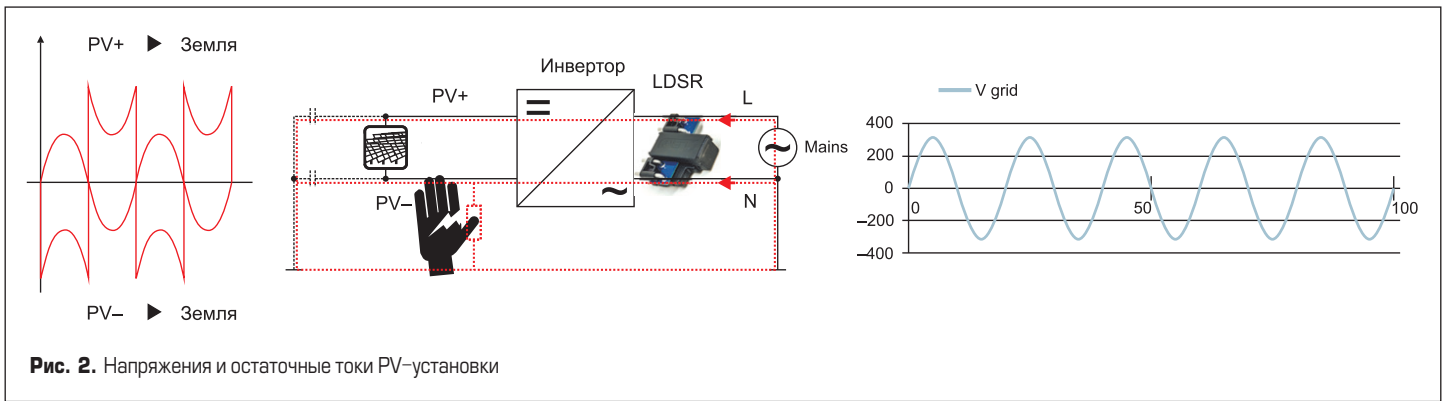


Рис. 2. Напряжения и остаточные токи PV-установки

часть ее габаритов и веса, их размер также должен быть сокращен без какого-либо ухудшения характеристик. Точно так же и цена должна снижаться для поддержания общей тенденции удешевления преобразовательных устройств.

На рис. 1 показаны три датчика тока LEM, все они построены на основе специализированной микросхемы CMOS ASIC с интегрированными элементами Холла. В DC-цепи инвертора установлен датчик тока прямого усиления серии GO; в AC-цепи — датчик тока компенсационного типа серии LPSR для системы управления инвертором, на выходе размещен LDSR — новый дифференциальный датчик тока для измерения RCM, тоже построенный по компенсационной схеме. (Подробно принцип работы датчиков тока прямого усиления и компенсационного типа Холла поясняется в [1].)

На рис. 2 отображены формы сигналов напряжения в DC- и AC-цепях инвертора. Отметим, что в бестрансформаторной системе, в DC-цепи действительно есть напряжение постоянного тока, соответствующее выходному напряжению фотоэлементов между точками PV+ и PV- (оно может быть увеличено с помощью DC/DC-конвертера). Но каждый из PV-узлов также содержит переменную составляющую, чья пиковая величина близка к амплитудному значению выходного напряжения AC-цепи. Если этот факт не учитывать на системном уровне, он будет представлять серьезную угрозу для безопасности.

**Датчики тока в PV-инверторе**

**Цепи постоянного тока**

В зависимости от интенсивности освещения PV-ячеек изменяется нагрузка, при которой обеспечивается максимальная передаваемая мощность, поэтому система управления осуществляет в реальном времени алгоритм MPPT загрузки ячеек для максимальной отдачи энергии. При использовании PV-панелей с приводом от электродвигателей этот алгоритм также можно применить для их оптимальной ориентации. Поскольку цель MPPT — нахождение режима передачи максимума мощности, от датчика тока не требуется высокая точность, и для такой задачи идеально подходит датчик тока прямого усиления. Недавно LEM представил новую серию датчиков тока GO [2], в которых проводник с первичным током интегрирован в стандартный корпус IC. Это позволило уменьшить занимаемую площадь на печатной плате на 70% по сравнению с обычным малогабаритным датчиком с магнитопроводом. Датчик в корпусе SOIC-16 показан на рис. 3, основные технические параметры GO-SMS приведены в таблице 1.

Точность датчиков GO превышает точность, необходимую для реализации алгоритма MPPT. Эти устройства также могут быть использованы на системном уровне для других целей — например, для поиска неисправности путем сравнения выходных сигналов различных фотоэлектрических панелей, получающих аналогичное освещение.

**Цепи переменного тока**

Датчик, показанный после инвертора на рис. 1, является ключевым элементом контура регулирования, управляющего ключами инвертора и, соответственно, определяющего форму выходного токового сигнала. Он должен иметь малое время отклика, низкий уровень шумов и хорошую линейность, в частности начальное сме-

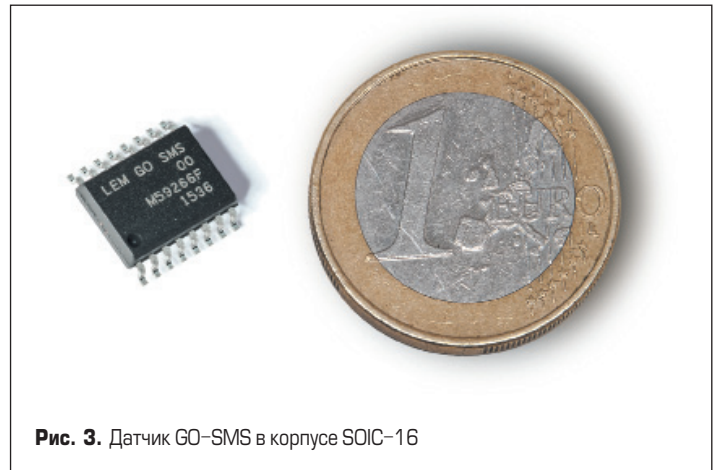


Рис. 3. Датчик GO-SMS в корпусе SOIC-16

щение и его температурный дрейф должны быть достаточно низкими, чтобы уровень DC-составляющей тока, поступающего в сеть, отвечал нормативным требованиям. Благодаря трансформаторному эффекту, присущему датчикам компенсационного типа, они обладают хорошими показателями по быстродействию, линейности и уровню шума. Исторически требования по низкому уровню начального смещения обеспечивались за счет использования феррозонда в качестве магнитно-чувствительного элемента. Однако теперь низкое смещение (и его малый дрейф) достигаются благодаря конструктивным особенностям ASIC CMOS, используемых, например, в датчиках тока серии LPSR.

Специализированная микросхема ASIC содержит ячейки Холла и усилители с низким смещением, объединенные новой запатентованной архитектурой, обеспечивающей приведенный ко входу дрейф начального смещения датчика около 4 ppm/°C (модель 25 A). В результате конструкция нового датчика проще, чем у феррозондовых датчиков с аналогичными параметрами. В таблице 2 приведены основные параметры датчиков серии LPSR, особенности которых подробно описаны в [3].

Таблица 1. Основные характеристики датчика GO-SMS

Параметр	GO-SMS
Диапазон номинальных токов, А	10–30
Невосприимчивость к внешним полям	Да, датчик градиента
Напряжение изоляции (50 Гц, 1 мин), кВ	3
Импульсное напряжение (50 мкс), кВ	4
Длина пути тока утечки, мм	7,5
Погрешность в диапазоне T = 25–105 °C, %	3,25
Сопротивление первичной цепи, мОм	0,75
Детектирование выхода из диапазона	Да, время отклика 10 мкс
Детектирование короткого замыкания	Да, время отклика 2,1 мкс
Время отклика, мкс	<2
Дрейф тока смещения (модель 10 А), мА/К	0,94
Дрейф чувствительности (ppm/К)	150
Магнитное смещение	0
Площадь основания (мм²)	100

Таблица 2. Основные характеристики LPSR 25-NP

Параметр	LPSR 25-NP
Ошибка чувствительности, %	±0,2
Температурный коэффициент чувствительности, ppm/°C	±40
Напряжение начального смещения, мВ	±1
Ток магнитного смещения, мА, после перегрузки 10 × I <sub>PN</sub> (приведенный ко входу)	±60
Опорное напряжение V <sub>REF</sub> @ I <sub>P</sub> = 0	2,485–2,515
Температурный коэффициент V <sub>REF</sub> @ I <sub>P</sub> = 0 (ppm/°C для 2,5 В)	±70
Температурный коэффициент V <sub>OUT</sub> @ I <sub>P</sub> = 0 (ppm/°C для 2,5 В)	±4
Погрешность линейности, %	±0,1
Время отклика @ 90% I <sub>PN</sub> (на ступеньку), нс	400
Общая погрешность, % I <sub>PN</sub> @ 25 °C	0,8
Общая погрешность @ T <sub>A</sub> = 85 °C (% I <sub>PN</sub> )	0,85
Общая погрешность @ T <sub>A</sub> = 105 °C (% I <sub>PN</sub> )	0,9

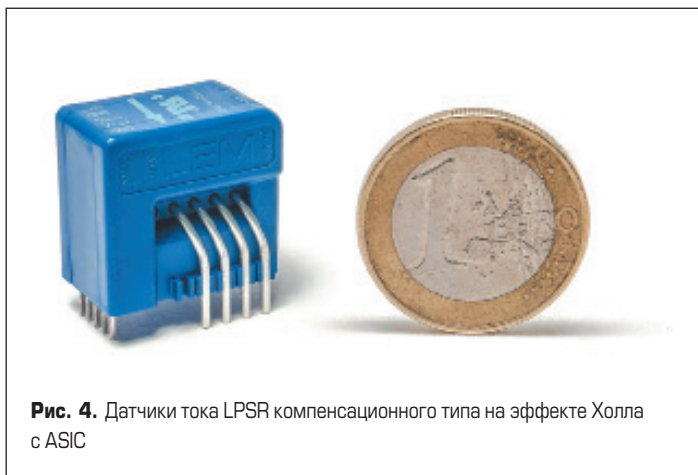


Рис. 4. Датчики тока LPSR компенсационного типа на эффекте Холла с ASIC

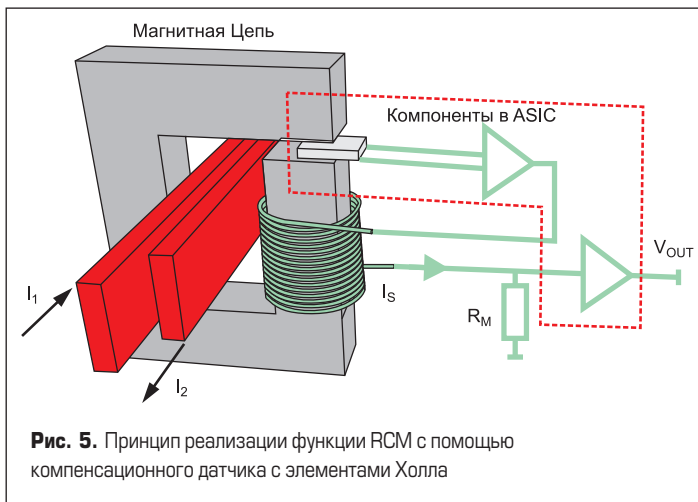


Рис. 5. Принцип реализации функции RCM с помощью компенсационного датчика с элементами Холла

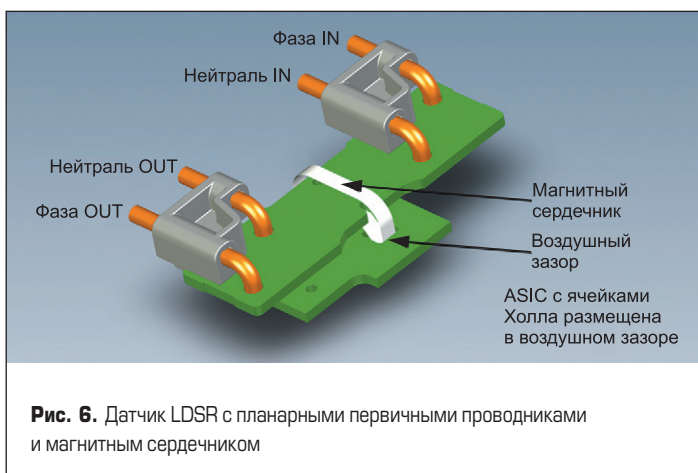


Рис. 6. Датчик LDSR с планарными первичными проводниками и магнитным сердечником

**Измерение остаточного тока для обеспечения безопасности**

Полюсы PV+ и PV-, показанные на рис. 1 в типовой PV-системе, физически достаточно большие. Среднее напряжение на каждом из полюсов относительно «земли» равно половине напряжения PV-ячейки, но к нему добавляется переменная составляющая напряжения, пиковое значение которого такое же, как и DC-напряжение ячеек. Если человек коснется выводов PV+ или PV- (или вообще любой точки в DC-цепи инвертора), то ток утечки из системы потечет через него на «землю». Поскольку только одна точка в системе имеет потенциал «земли» (точка N на выходе), то этот ток утечки должен вернуться обратно в систему через точку N, что создаст дисбаланс постоянного тока, или остаточный ток между выходами L и N. Его требуется обнаружить, чтобы система могла принять очень быстрое решение, необходимое для защиты человека, оказавшегося под действием остаточного тока. При детектировании RCM возникают следующие проблемы:

1. Абсолютное значение тока, который нужно обнаружить, очень мало (десятки миллиампер), поэтому начальное смещение датчика должно быть достаточно низким по отношению к измеряемому уровню.
2. Выходной AC-ток изменяется от 0 до десятков ампер, и на его уровне измеряется малый остаточный ток.
3. Наличие емкостных связей между PV-панелями и «землей» приводит к тому, что всегда есть какие-то токи утечки на «землю», и система должна отличать их от дополнительного тока, вызванного опасным контактом с человеком.

На рис. 2 показан путь тока утечки в упрощенной схеме инверторной системы и новый датчик LEM LDSR, используемый для мониторинга RCM.

Из трех перечисленных выше проблем первая и вторая решены в LDSR благодаря специальной конструкции датчика, ориентированной на RCM, а третья задача выполняется за счет применения алгоритма обработки сигнала на выходе датчика.

Принцип реализации RCM показан на рис. 5: микросхема ASIC с элементами Холла, подобная использованной в представленном выше датчике LPSR, служит «сердцем» датчика тока компенсационного типа. Переменные токи I<sub>1</sub> и I<sub>2</sub> взаимно уравниваются, а небольшой остаточный ток детектируется микросхемой ASIC с элементами Холла и компенсируется за счет вторичной обмотки, имеющей гораздо меньше витков, чем в случае LPSR, поскольку детектируемый ток гораздо меньше.

Детальный анализ влияния физического расположения первичных проводников на рис. 5 показывает, что взаимная компенсация токов I<sub>1</sub> и I<sub>2</sub> не является абсолютной и остаточное магнитное поле в воздушном зазоре зависит от их взаимного положения. Поэтому было решено точно зафиксировать положение первичных проводников, разместив их на многослойной печатной плате (PCB) внутри датчика. Кроме того, для реализации функции RCM необходимо только несколько десятков витков вторичной обмотки, которые также можно сформировать на PCB. На основе этих идей спроектирован инновационный датчик, чья конструкция оказалась гораздо проще, чем у существующих сенсоров. Расположение первичных проводников на печатной плате ограничивает максимальную величину первичного тока, однако допустимое значение (35 А на каждый проводник) более чем достаточно для бытовых применений. При таких токах большое значение имеет конструкция печатной платы, на которой монтируется LDSR. Моделирование показало, что при использовании оптимизированной конструкции PCB увеличение температуры сенсора на токе 35 А не превышает 13 °C.

На рис. 6 изображен упрощенный вид датчика LDSR без корпуса. Для функции тестирования добавлена дополнительная обмотка, выполненная концентрически с вторичной обмоткой на ASIC PCB. Тестовая обмотка полезна для системной проверки: проходящий через нее ток формирует такой же сигнал на выходе датчика, как и разностный ток в первичной цепи. Сенсор на рис. 6 имеет однофазную конструкцию первичной цепи и также доступен в трехфазном исполнении.

Как и в датчике LPSR, микросхема ASIC обеспечивает минимальное начальное смещение, его величина, приведенная к входному току, уменьшена за счет отверстия в PCB под ASIC, обеспечивающего минимальный воздушный зазор в магнитной цепи. Из-за высокой чувствительности LDSR магнитный экран (для упрощения он не показан на рис. 6) установлен вокруг ASIC и воздушного зазора.

На рис. 7 дана фотография датчика LDSR.

В общем случае токи утечки, обнаруженные LDSR, будут содержать AC- и DC-составляющие, и каждый пользователь может применить спе-



Рис. 7. LDSR в однофазном и трехфазном исполнении

Таблица 3. Основные характеристики LDSR 0.3-TP

Параметр	LDSR 0.3-TP
Ошибка чувствительности, %	±2
Температурный коэффициент чувствительности, ppm/°C	±250
Погрешность (мА) без учета начального смещения в диапазоне -40...+105 °C	±40
Погрешность (мА) без начального смещения для ступеньки ±30 мА	±8
Погрешность (мА) без начального смещения для ступеньки ±60 мА	±12
Погрешность (мА) без начального смещения для ступеньки ±150 мА	±20
Время отклика @ 90% от I <sub>PRN</sub> (шаг), мкс	300
Опорное напряжение V <sub>REF</sub> @ I <sub>PRN</sub> = 0	2,485-2,515

циальные алгоритмы обработки выходного сигнала датчика, чтобы определить, что утечка «чрезмерна» и следует предпринять соответствующие действия. В частности, сложным представляется случай, когда присутствует большая естественная и изменяющаяся переменная составляющая тока утечки (например, в зависимости от окружающей влажности) через паразитные емкости и необходимо обнаружить дополнительный ток утечки, вызванный контактом человека с DC-цепью. Импеданс человеческого тела в значительной степени резистивен, поэтому, как показано на рис. 8, дополнительный ток почти не влияет на действующее (RMS) значение тока утечки; основное значение здесь имеет изменение фазы.

Как правило, в системе также присутствуют шумы, которые добавляются к действительной и мнимой составляющей тока на рис. 8. В случае если только одна известная частота должна быть проанализирована в выборке сигнала, алгоритм Герцеля особенно эффективен. На рис. 9 «утечка касания» величиной 30 мА (RMS) добавляется к току «емкостной утечки» величиной 300 мА (RMS) и шуму величиной 7,5 мА (RMS) на время, равное 0,1 с. Видимое «влияние» на общий ток утечки здесь почти отсутствует, но после обработки алгоритмом Герцеля скачок тока 30 мА легко восстанавливается, и если это значение превышает заданный порог, то на системном уровне принимаются соответствующие решения.

**Заключение**

В данной работе на примере фотоэлектрических установок показаны преимущества современных датчиков тока LEM. Они имеют меньший размер и стоимость при аналогичных или улучшенных характеристиках. Датчики сконструированы без применения феррозонда в качестве магниточувствительного элемента, необходимого ранее. Эти инновации стали возможными благодаря использованию специализированных ASIC на основе эффекта Холла.

**Литература**

1. [www.lem.com/en/file/3139/download](http://www.lem.com/en/file/3139/download)
2. Jobling D., Barbagallo D., Feignon J. A New Family of Miniature, Fast and Accurate Transducers for Isolated Current Measurement // Bodo's Power Systems. 2017. April.
3. Moureaux S., Gutierrez D. Closed Loop Current Transducers with Excellent Performance are also Cost-Effective // Bodo's Power Systems. 2017. May.

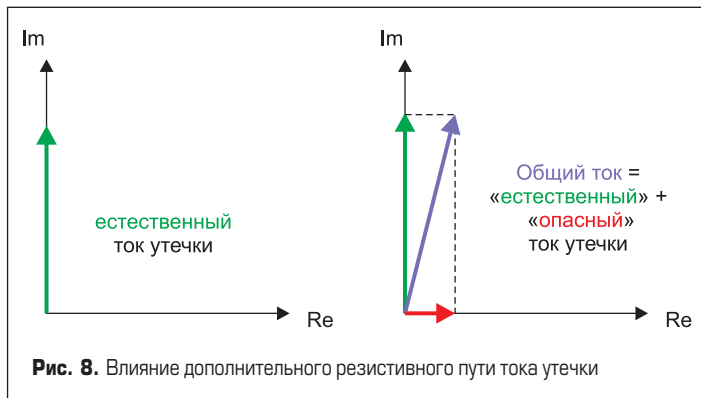


Рис. 8. Влияние дополнительного резистивного пути тока утечки

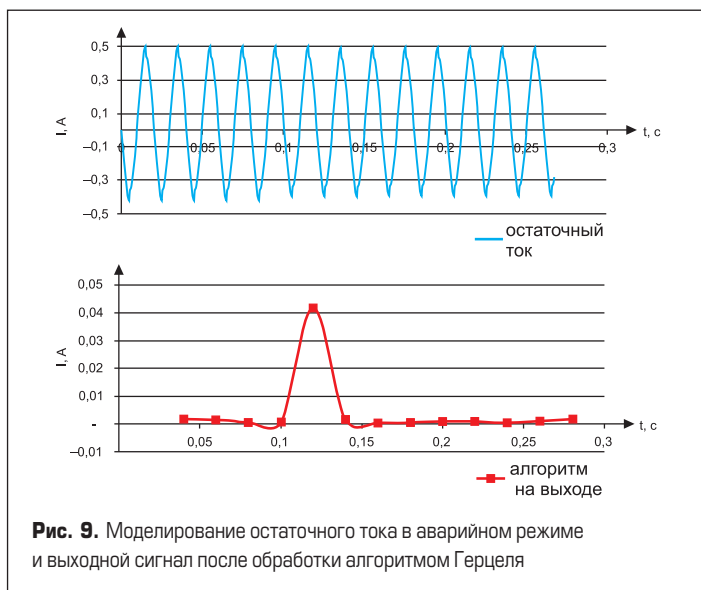


Рис. 9. Моделирование остаточного тока в аварийном режиме и выходной сигнал после обработки алгоритмом Герцеля