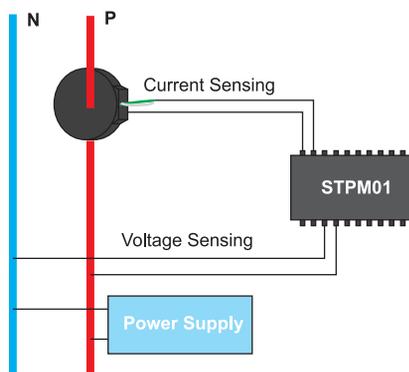


Применение датчиков тока Pulse Electronics на основе катушки Роговского с семейством специализированных STPMxx интегральных микросхем в аппаратуре учета энергоресурсов

Евгений Обыденнов, инженер по применению Pulse Electronics компании PT Electronics
pulse@ptelectronics.ru

Введение

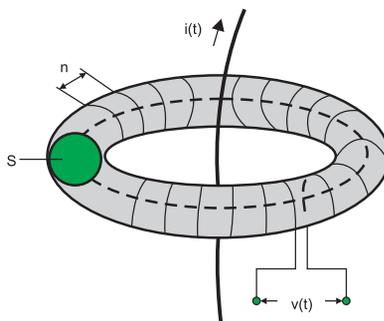
Статья описывает датчики тока фирмы Pulse Electronics Inc. (далее «датчик тока Pulse») для аппаратуры учета энергоресурсов, примененные совместно с семейством специализированных STPMxx интегральных микросхем STMicroelectronics. Датчик тока Pulse, работа которого основана на принципе катушки Роговского, приводится в сравнении с другими токоизмерительными устройствами (токовый шунт, трансформатор тока, датчик Холла). Также в статье представлены результаты точности тестирования датчика тока Pulse и микросхемы STPM01 на демонстрационном макете. Итоги испытаний, проведенных с STPM01, могут считаться действительными для семейства STPMxx интегральных микросхем, которые имеют ту же архитектуру. На рис. 1 показана блок-схема измерительной системы.



● Рис. 1. Блок-схема работы катушки на основе принципа Роговского совместно с STPM01

Принцип работы катушки Роговского

Катушка Роговского — катушка, предназначенная специально для бесконтактного измерения переменных во времени токов. Принцип действия основан на законе полного тока (рис. 2).



● Рис. 2. Принцип работы катушки Роговского

Напряжение $v(t)$ функционально зависит от коэффициента обмотки Kr и частоты Fr и синусоидального сигнала $i(t)$ согласно уравнению 1:

$$v(t) = Kr \times Fr \times i(t). \quad (1)$$

Коэффициент обмотки Kr определяется площадью поперечного сечения (s), количеством витков на единицу длины (n) и симметрией катушки. Интегрирование $v(t)$ дает значение, пропорциональное Kr и мгновенному RMS значению тока в проводнике.

Датчик тока Pulse

Хотя принцип работы катушки Роговского хорошо известен и широко

применяется в различных токоизмерительных устройствах, инженерная задача заключается в контроле характеристик обмоток для достижения точного измерения тока. Инженеры Pulse Electronics Inc. разработали метод точной обмотки, который контролирует параметры, влияющие на выходное напряжение. Запатентованный метод сегментированных обмоток позволяет обеспечить достаточно большое выходное напряжение для детектирования и интегрирования сигнала для большого количества витков на единицу длины.

Датчик тока Pulse имеет воздушное заполнение обмоток катушек, для которых зависимость выходного напряжения линейна по отношению к достаточно широкому динамическому диапазону изменения тока. Данная зависимость удовлетворяет классу точности CLASS 0,2 S и имеет пределы погрешностей, соответствующие IEC 62053-22 на токи от 0,1 до 200 А. Также существуют обмотки, разработанные по специальной конфигурации и удовлетворяющие требованиям CLASS 1 по защите к внешним магнитным полям, где дополнительная экранировка предотвращает возникновение в проводнике наведенных напряжений от внешних переменных токов. Данный экран служит эффективным барьером от внешних электрических полей, связанных с расположенными поблизости токопроводящими проводниками и радиосигналами от автоматических измерительных приборов.



● Рис. 3. Датчик тока PA2999.006NL

Pulse Electronics Inc. реализовала эту технологию обмоток в массово выпускаемом недорогом продукте PA2999.006NL (рис. 3).

Сравнение токоизмерительных устройств

Датчик PA2999.006NL был специально изготовлен как замена трансформатора тока (ТТ), используемого в измерительных устройствах. Обмотки ТТ накладываются на сердечник из аморфного металла. Принципы работы ТТ и катушки Роговского различны. Переменный ток первичной обмотки, проходящий через центр ТТ, тесно связан с основным и индуцируемым током в обмотке трансформатора. Этот ток преобразуется в напряжение через согласующий резистор, который фиксирует мгновенные значения тока на первичной обмотке. Датчик PA2999.006NL может быть использован как альтернатива ТТ для измерительных интегральных схем, в которых используемые сенсоры реализуют функцию di/dt .

Отсутствие аморфного сердечника в датчиках тока Pulse имеет ряд преимуществ. Легкие по весу и дешевые, они обладают исключительной линейностью в широком диапазоне токов. Верхнее значение тока ограничивается только эффектом саморазогрева первичной обмотки. Для сравнения, сердечник ТТ должен иметь большие размеры, чтобы избежать насыщения при максимальном токе. Аморфный материал не обеспечивает такую же линейность (по току, частоте и температуре) и может иметь остаточную намагниченность, которая возникает из-за смещения по постоянному току. Основные пределы частотной характеристики для ТТ охватывают менее чем 8 гармоник, в то время как датчик тока может точно обнаруживать до 100 гармоник при подробном анализе. Также без всех ограничений, присущих ТТ, датчик тока Pulse может упростить способ калибровки.

Геометрию ТТ определяет сердечник. Датчик тока Pulse представлен только в форме тороида, который является наиболее оптимальной формой. Форма датчика тока Pulse может быть адаптирована к обычным плоским шинам, как показано на рисунке 4. Возможно также сделать его открытым, чтобы он мог быть прикреплен к шине, без необходимости проводить шину сквозь него.



● Рис. 4. Датчик тока Pulse, приспособленный для плоской шины

Другим устройством измерения тока является низкоомный токовый шунт, который, как правило, является лучшим вариантом для измерения малых токов. Его основным преимуществом является стоимость. Недостатками токового шунта являются: постоянное потребление энергии, отсутствие гальванической изоляции, высокая температура корпуса изделия, а также ограничение по току.

Некоторые системы измерения используют датчики Холла в качестве недорогого интегрального решения. В сравнении с датчиком Холла компоненты Pulse имеют меньшую стоимость, потому могут быть использованы в качестве бюджетного дискретного решения.

В таблице 1 приведены сильные и слабые стороны различных методов измерения токов.

Семейство STPMxx интегральных микросхем

Устройства STPMxx являются семейством специальных измерительных ASSP-компонентов (application specific standard products).

Эти устройства спроектированы для эффективного измерения активной, реактивной и полной электроэнергии в одно- и многофазной системе. Также они могут быть реализованы как чипы счетчика электроэнергии или как периферийные устройства в системах, построенных на микроконтроллерах.

Устройства STPMxx состоят из аналоговой и измерительной частей.

Аналоговая часть: предусилитель, конвертирующий блок Σ/Δ АЦП первого порядка, источника опорного напряжения и стабилизатора напряжения с низким падением.

Измерительная часть: системы контроля, генератор, DSP-блок обработки сигнала и SPI-интерфейс.

DSP-блок обработки сигнала вычисляет активную, реактивную и полную энергию, RMS и мгновенные значения тока и напряжения. Результаты вычисления доступны в виде частоты импульсов и состояний на цифровых выходах устройства или в виде битов данных, которые могут быть прочитаны с помощью SPI-интерфейса.

Также возможно сгенерировать выходной сигнал с частотой импульсов, пропорциональной измеряемой энергии для простой калибровки.

Таблица 1. Сравнение токоизмерительных устройств

Характеристика	Токовый шунт	Трансформатор тока (ТТ)	Датчик Холла	Датчика тока Pulse
Линейность амплитуды и фазы	++	0	-	++
Широкий диапазон — 5 декад	0	0	+	++
Широкая полоса пропускания	+	0	0	++
Отсутствие насыщения постоянным током	++	-	-	++
Низкий температурный коэффициент	0	+	-	++
Хорошая электрическая изоляция	-	++	0	++
Низкое энергопотребление	-	+	0	++
Выходное напряжение	++	++	-	0
Низкая цена	++	0	-	+
Маленький вес	+	-	+	++
Варьируемые размеры и форма	-	-	+	++

“+”, “++” — преимущество, “0” — отсутствует, “-” — недостаток.

Таблица 2. Функции устройств STPMxx

Функции	Устройство					
	STPMC1	STPM01	STPM11	STPM12	STPM13	STPM14
Токоизмерительные устройства (ТТ — трансформатор тока, Ш — токовый шунт, Р — катушка Роговского)	ТТ, Ш, Р	ТТ, Ш, Р	ТТ, Ш, Р	ТТ, Ш, Р	ТТ, Ш, Р	ТТ, Ш, Р
Импульсный выход	+	+	+	+	+	+
SPI-выход	+	+	-	-	-	-
ОТР-память	+	+	+	+	+	+
Коэффициенты усиления по току	Устанавливают STPM5x-модуляторы	8-16-24-32	8-16-24-32	8-16-24-32	8-16-24-32	8-16-24-32
Взаимная компенсация тока	+	Не применяется	Не применяется	Не применяется	Не применяется	Не применяется
Последовательный порт	+	+	Используется только для программирования и калибровки устройств			
Активная энергия	Общая и на каждой фазе	+	+	+	+	+
Основная гармоника активной энергии	Общая и на каждой фазе	+	+	+	+	+
Реактивная энергия	Общая и на каждой фазе	+	-	-	-	-
Полная энергия	-	+	-	-	-	-
VRMS, IRMS	+	+	-	-	-	-
Выбор частоты импульсов	+	+	+	+	+	+
Цифровая калибровка	+	+	+	+	+	+
Выбор Импульсов/kWh	+	+	+	+	+	+
RC-генератор	-	+	+	-	+	-
Кварцевый генератор	+	+	-	+	-	+
Детектор попыток хищения электроэнергии	+	+	-	-	+	+
Отрицательная мощность, холостой ход	+	+	+	+	+	+
Вычисление фазовой задержки	+	Не применяется	Не применяется	Не применяется	Не применяется	Не применяется

Устройства STPMxx были специально разработаны с учетом особенностей устройств учета энергоресурсов. Эти особенности можно свести в таблицу 2.

Преимущества использования STPMxx совместно с датчиками по принципу катушки Роговского

Совместное использование датчиков тока Pulse и STPMxx обладает рядом преимуществ:

- патентованные алгоритмы расчета мощности и цифровой обработки сигнала, разработанные специально для датчиков тока Pulse,
- взаимная компенсация тока при использовании нескольких датчиков.

Алгоритм расчета мощности

По традиционному методу расчета мощности, представленному на рисунке 5, когда используется датчик тока Pulse, работающий по принципу

катушки Роговского, требуется дополнительный аналоговый интегратор для преобразования сигнала di/dt от датчика в сигнал, пропорциональный измеряемому току i.

$$v_{coil}(t)=di(t)/dt, \quad (2)$$

$$i(t)=\int V_{coil}(t)dt=\int (di(t)/dt)dt=i(t)+c_1, \quad (3)$$

$$p(t)=V(t)\times i(t)=V\sin(\omega t)\times \sin(\omega t+\varphi)+c_1\times V\sin(\omega t)=((V\times I)/2)\times [\cos\varphi-\cos(2\omega t+\varphi)]+c_1\times V\sin(\omega t) \quad (4)$$

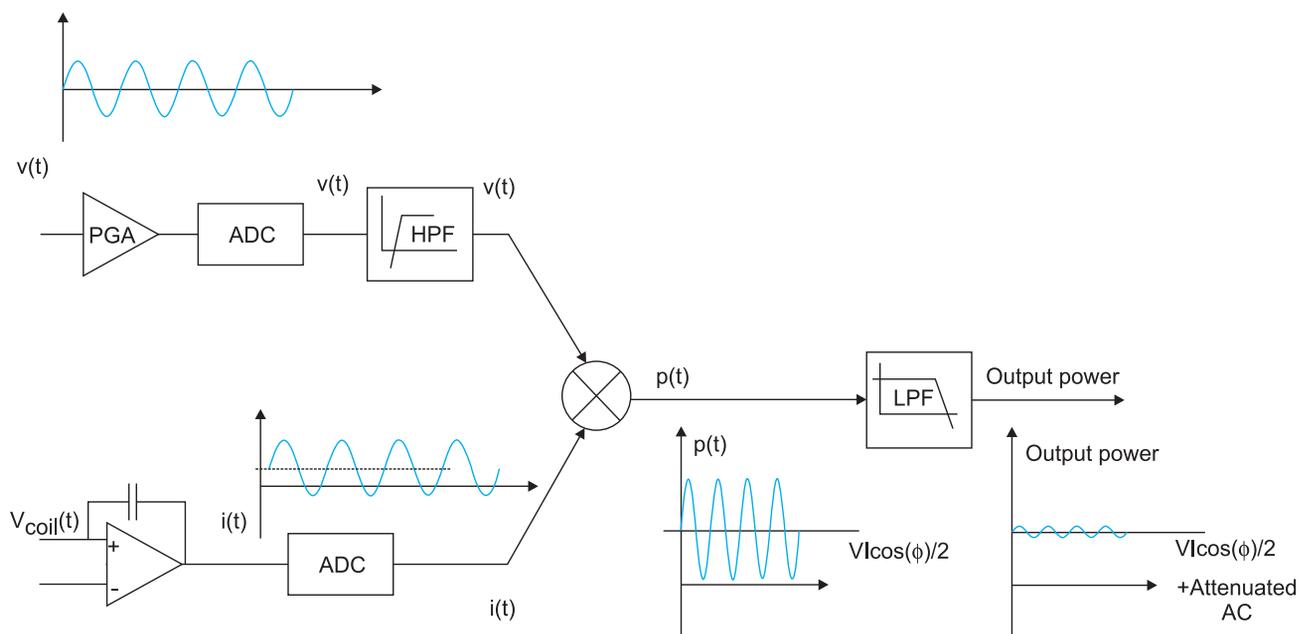


Рис. 5. Традиционный алгоритм расчета мощности

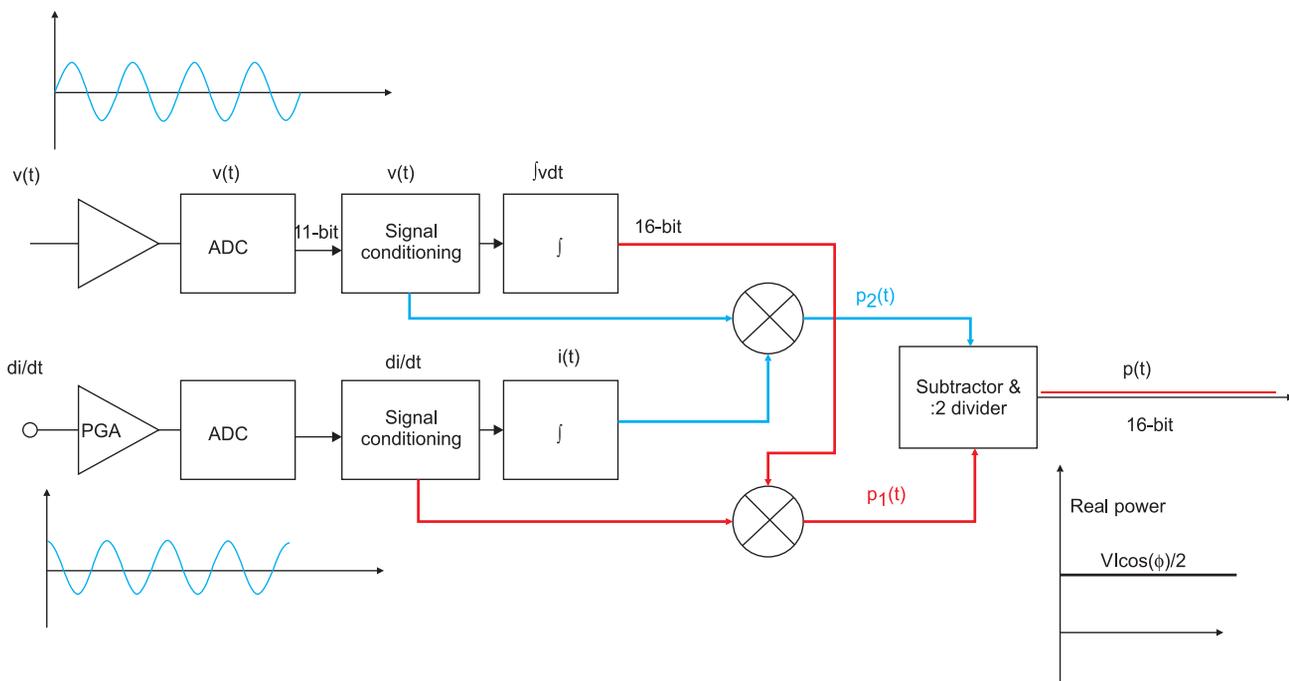


Рис. 6. Расчет мощности с помощью STPMxx

Это приводит к ошибке в измерении мощности и возникновению остаточных синусоидальных пульсаций после LPF-фильтра. Активная мощность должна быть усреднена по периоду несущей частоты. Семейство STPMxx реализует новый запатентованный алгоритм для расчета мощности, который избавляет от пульсаций и сдвига, обеспечивая точный и прямой расчет мощности без необходимости использования дополнительного интегратора в аналоговой части. Исходя из предложенного подхода расчета (рисунок 6), получаем следующую зависимость:

$$p_1(t) = \int V(t) dt \times (di(t)/dt) = - (V/\omega) \times \cos(\omega t) \times \omega \cos(\omega t + \varphi) = - (V \times I) / 2 [\cos \varphi + \cos(2\omega t + \varphi)], \quad (5)$$

$$p_2(t) = V(t) \times i(t) = V \sin(\omega t) \times I \sin(\omega t + \varphi) = (V \times I) \times (\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)) / 2. \quad (6)$$

Окончательно:

$$p(t) / 2 = [p_2(t) - p_1(t)] / 2 = (V \times I) [\cos \varphi] / 2. \quad (7)$$

При использовании датчика тока Pulse, работающего по принципу катушки Роговского, очень высокая степень точности достигается за счет:

- Компенсаций смещения по постоянному току, алгоритм выдает постоянные значения расчета мощности,

пропорциональные активной мощности без смещения или пульсаций.

- Интегрирование мощности по периоду в линии не производится и, следовательно, накопление энергии не зависит от колебаний частоты в линии.
- Специальной архитектуры STPMxx, которая делает эти интегральные микросхемы совместимыми с датчиком тока Pulse без необходимости в дополнительном блоке интеграции, который бы увеличил сложность системы и общую стоимость устройства.

Взаимная компенсация тока

Для многофазных систем, где гальваническая изоляция между фазами и защита от постоянных магнитных полей являются обязательными условиями по международным стандартам, датчик тока Pulse предлагает интересное и недорогое решение, недостатком которого является лишь перекрестное воздействие между соседними токопроводящими каналами.

STPMC1 — специализированное устройство для многофазных систем, имеющее встроенную функцию компенсации ошибок от взаимных токов. Для однофазной системы два фактора коррекции, α и β , учитывают поправочный коэффициент $\pm 3,1\%$ в 512

шагов. Асимметричная компенсация осуществляется путем умножения фазного тока с α , а нейтрального тока с β , и эти значения затем вычитаются из нейтральных и фазных токов, соответственно, как показано в таблице 3 и уравнениями 8, 9.

$$i_{CS} = \beta i_T, \quad (8)$$

$$i_{CT} = \alpha i_S. \quad (9)$$

Для многофазных систем вводятся три поправочных коэффициента, 7-бит γ , 6-бит δ и 4-бит ϵ , соответственно вводятся $\pm 0,78\%$, $\pm 0,39\%$ и $\pm 0,09\%$ поправочные коэффициенты. Исходя из этих факторов, получаем матрицу 4×4 (таблица 4), которая реализует

Таблица 3. Взаимная матрица компенсации тока для однофазных систем

Фаза	S	T
S	-	β
T	α	-

Таблица 4. Взаимная матрица компенсации тока для многофазных систем

Фаза	R	S	T	N
R	-	α	β	γ
S	α	-	α	β
T	β	α	-	β
N	γ	β	α	-

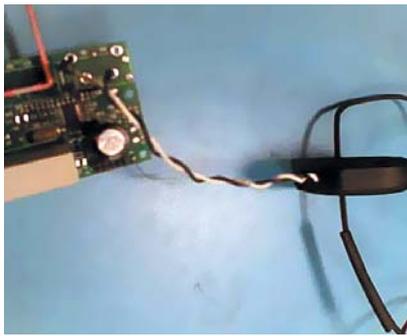


Рис. 7. Конфигурация оборудования при тестировании

симметричную компенсацию воздействующих токов между фазами и нейтралью (уравнения 10–13):

$$i_{CR} = \alpha i_S + \beta i_T + \gamma i_N, \quad (10)$$

$$i_{CS} = \alpha i_R + \alpha i_T + \beta i_N, \quad (11)$$

$$i_{CT} = \alpha i_N + \alpha i_S + \beta i_R, \quad (12)$$

$$i_{CN} = \alpha i_T + \beta i_S + \gamma i_R. \quad (13)$$

Эксплуатация датчика тока Pulse совместно с STPM01

Тестирование датчиков PA2999.006NL на точность было проведено с использованием STPM01 демонстрационной платы.

Выходы датчика подключены через схему компенсации, что снижает влияние напряжения канала на выводы IIP1 и IIN1 интегральной микросхемы. Для получения 32-кратного усиления по току следующие биты конфигурации в STPM01 должны быть установлены в таком порядке:

- бит $5 \times PST = 1$ (датчик тока Pulse)
- бит $52 \times ADDG = 1$ (дополнительное усиление)

Макет откалиброван при $I = 5$ А.



Рис. 9. Кабель в диагональном положении

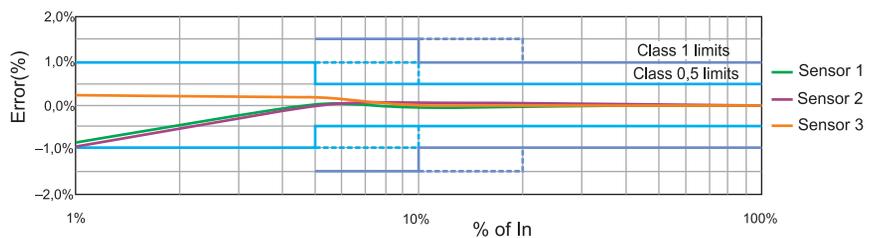


Рис. 8. График погрешности результатов измерений по сравнению со стандартными пределами точности

Точность результатов

Были измерены 3 разных датчика PA2999.006NL. Номинальный ток $I_N = 10$ А. Положение компонентов при измерении представлено на рис. 7.

Таблица 5. Точность результатов в зависимости от тока

I, A	% I_N	S1 error, %	S2 error, %	S3 error, %
10	100	0,0000	0,000	0,0000
1	10	-0,0640	0,046	-0,0100
0,5	5	-0,0040	0,034	0,1568
0,1	1	-0,8436	0,951	0,2211

Результаты представлены в таблице 5. На рис. 8 проиллюстрирована графическая зависимость измерения точности для трех различных датчиков, соответствует CLASS 1 и CLASS 0,5 стандартам IEC 62053-21 и IEC 62053-22.

Как можно отметить из результатов на графике, имеется очень высокая точность для всех датчиков, удовлетворяющая CLASS 0,5 даже при очень низких токах.

Рекомендации

Поскольку обмотки датчика тока Pulse смонтированы на диэлектрическом основании, положение кабеля по отношению к датчику имеет существенное влияние на точность измерения.

Размещение датчика так, как показано на рис. 9, уменьшает чувствительность датчика. Результаты сведены в таблицу 6.

Таблица 6. Погрешность результатов в зависимости от осевого и диагонального положения кабеля

I, A	% I_N	Error(axial), %	Error(diagonal), %
10	100	0,0000	0,000
1	10	-0,0640	0,0409
0,5	5	-0,0040	0,0214
0,1	1	-0,8436	-1,0730

На рис. 10 проиллюстрирована графическая зависимость измерения точности.

Как показано на графике, изменение ориентации кабеля от осевого к неосевому положению увеличивает чувствительность по току, особенно когда кабель касается корпуса датчика. Также следует уделить внимание надлежащему экранированию, которое может предотвратить ошибки измерения тока. Он должен быть соединен с землей.

Представленные решения с использованием датчика тока Pulse и семейства STPMxx интегральных микросхем могут использоваться в системах учета электроэнергии.

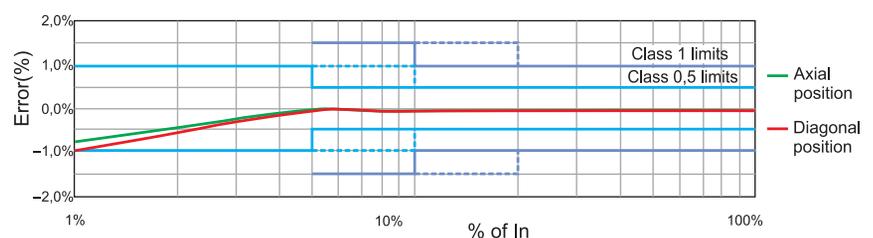


Рис. 10. График погрешности результатов измерения в зависимости от осевого и диагонального положения кабеля