

## Анализ точности измерения тока шунтовым датчиком с дельта-сигма преобразователем в электрических приводах

АНУЧИН А.С., СУРНИН Д.К., ЛАШКЕВИЧ М.М., ЖАРКОВ А.А., ОСТРИРОВ В.Н.

*Рассматривается точность измерения тока с помощью шунтового датчика в частотно-регулируемом электроприводе с использованием дельта-сигма модуляции. Измерение тока с помощью резистивных шунтов становится все более распространенным благодаря появлению гальванически развязанных микросхем дельта-сигма преобразователей (модуляторов). Данное решение оказывается дешевле датчиков тока на эффекте Холла компенсационного типа и уже успешно применяется в некоторых промышленных электроприводах. Исследуется точность получаемого результата после демодуляции в микроконтроллере. Путем моделирования получены зависимости максимальной погрешности от коэффициента передискретизации (oversampling ratio), типа цифрового фильтра и относительного значения входного сигнала.*

**Ключевые слова:** измерение тока, шунтовой датчик, дельта-сигма модуляция, точность, быстроедействие, электропривод

В течение длительного времени измерение тока датчиком на эффекте Холла компенсационного типа было преобладающим решением в силовых полупроводниковых преобразователях. Достоинства данного метода широко известны [1]:

гальваническая развязка между первичной и вторичной цепями;

высокая линейность измерения, частота пропускания, низкие погрешность коэффициента усиления и смещение нуля; быстрое и точное измерение с использованием встроенных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) современных микроконтроллеров.

Главным недостатком любых датчиков тока (особенно на эффекте Холла) является высокая цена. Это побудило искать новые решения для измерения тока: датчики тока с прямым усилением на эффекте Холла; шунтовые резистивные датчики тока.

Датчики тока с прямым усилением на эффекте Холла испытывают влияние внешних магнитных полей, наводящихся, например, в результате протекания тока в соседней фазе преобразователя. Этот эффект можно учесть, используя алгоритм измерения, учитывающий другие протекающие в системе токи, однако это требует постановки сложных экспериментов на этапе разработки программного обеспечения.

Шунтовые датчики тока, как правило, применяются в маломощных преобразователях, но для промышленных силовых преобразователей и электроприводов с токами более 50 А они обычно не использовались из-за отсутствия гальванической развязки. Одним из возможных решений может быть установка АЦП с последовательным интерфейсом

непосредственно на шунт и передача данных через цифровую гальваническую развязку, что, однако, приводит к задержке в измерительном канале. Вместо АЦП с последовательным интерфейсом возможна установка специализированной микросхемы преобразователя «напряжение—частота» [2]. Однако подобные преобразователи имеют низкую разрешающую способность на высоких частотах сигнала и недопустимую задержку измерения сигналов.

Следующим шагом в развитии средств измерения тока стало появление специальных микросхем, осуществляющих дельта-сигма модуляцию, и специальных периферийных устройств, встроенных в современные микроконтроллеры: демодуляторов и цифровых фильтров. Так, микросхема АМС1305 от Texas Instruments измеряет падение напряжения на сопротивлении шунта и производит модулированный цифровой поток данных с помощью дельта-сигма модулятора. Поток данных имеет частоту до 20 МГц, и для его передачи используются либо две линии — для тактового и информационного сигналов, либо одна, если данные передаются в Манчестерском коде.

Многие мировые компании, специализирующиеся на преобразовательной технике и системах управления, начали развивать это направление. Например, фирмой Semikron серийно производятся силовые модули со встроенными измерительными шунтами [3], расположенными в выходных цепях модуля. Компания Texas Instruments, следуя современным тенденциям, разработала серию дельта-сигма модуляторов [4] и микроконтроллеров со встроенными демодуляторами [5]. Если объединить новые типы силовых модулей со схемами дель-

та-сигма модуляторов и использовать новый формат входа микроконтроллера для демодуляции, то можно заменить дорогостоящий датчик на эффекте Холла компенсационного типа, позволяя сэкономить до 30 USD с каждого датчика (для датчиков с номинальным током измерения 200 А). Существуют также решения, которые объединяют резистивные шунты и сигма-дельта модуляторы в одном корпусе.

Производители силовой электроники относительно давно применяют микросхемы дельта-сигма модуляции для измерения токов [6, 7] и учитывают погрешности в измерительных шунтах [8], однако нет четкого понимания об абсолютной погрешности измеренного сигнала, полученного с помощью демодуляции потока дельта-сигма данных. Есть редкие документы, предоставляемые производителями, которые приводят некоторую информацию о зависимостях между коэффициентом передискретизации, типом фильтра и разрешения. К сожалению, они содержат неверные сведения об эффективной разрядности [9] и, кроме того, часто путают между собой разрешение и точность полученного результата.

Цель данной статьи — исследование точности и максимальной погрешности шунтового измерения тока с помощью идеализированного дельта-сигма модулятора. Исследование проводится при различных значениях коэффициента передискретизации и типах фильтров демодулятора. Результаты сравниваются с традиционными 12-битными АЦП, которые обычно используются в современных силовых преобразователях и электроприводах. Сравнение проводится с учетом точности и времени измерения, которое должно быть минимальным для высокопроизводительных систем управления с быстрой реакцией по току [10].

#### Принципы шунтового измерения тока. Шунт.

Шунт устанавливается последовательно в цепь протекания тока (рис. 1). Для шунтов диапазон типовых рабочих напряжений составляет от 50 до 250 мВ. Предельное рабочее напряжение на шунте определяется при протекании через него максимального тока, и обычно оно в два раза превышает номинальное значение. Более высокое значение падения напряжения на шунте приводит к увеличению потерь в измерительной системе. Например, при номинальном токе 400 А рассеивание энергии на шунте для одной фазы будет составлять 10 и 50 Вт для шунтов 50 и 250 мВ. Данное обстоятельство оказывает влияние на тепловой режим работы измерительной цепи, хотя влияние на общую эффективность силового преобразователя относительно мало.

*Дельта-сигма модулятор (преобразователь).* Микросхема дельта-сигма модулятора подключает-

ся напрямую к шунту и имеет встроенную гальваническую развязку, поэтому питание микросхемы разделено на две части: первичную и вторичную. Вторичная цепь питания модулятора гальванически связана с питанием микроконтроллера. При подключении токового шунта согласно рис. 1 потенциал на входе микросхемы модулятора будет изменяться на периоде коммутации силовых ключей, поэтому для питания первичной цепи микросхемы можно использовать питание драйвера верхнего ключа.

Микросхемы, подобные АМС1305, содержат цепь приема и усиления входного сигнала, подключенную к дельта-сигма модулятору второго порядка, который превращает входной аналоговый сигнал в цифровой одноразрядный поток данных (битовый поток). Структура модуляторов, приведенная в технической документации, как правило, неточна [4], поскольку в ней отсутствуют коэффициенты усиления для блоков интеграторов, что делает структуру неработоспособной. Структура для данного исследования была взята из [11] и представлена на рис. 2. Реализация обоих интеграторов в дискретной форме делает структуру инвариантной по времени независимо от частоты модуляции.

*Демодуляция битового потока.* Демодуляция передаваемого модулятором битового потока может быть осуществлена с помощью специальных периферийных устройств современных микроконтроллеров или с использованием ПЛИС. Для преобразования в цифровой вид, подходящий для обработки микроконтроллерной системой управления, модулированный битовый поток должен быть обработан фильтром низких частот, примером которого являются Sinc-фильтры [12] разных порядков. Sinc-фильтр первого порядка является (далее Sinc) фильтром скользящего среднего и может быть за-

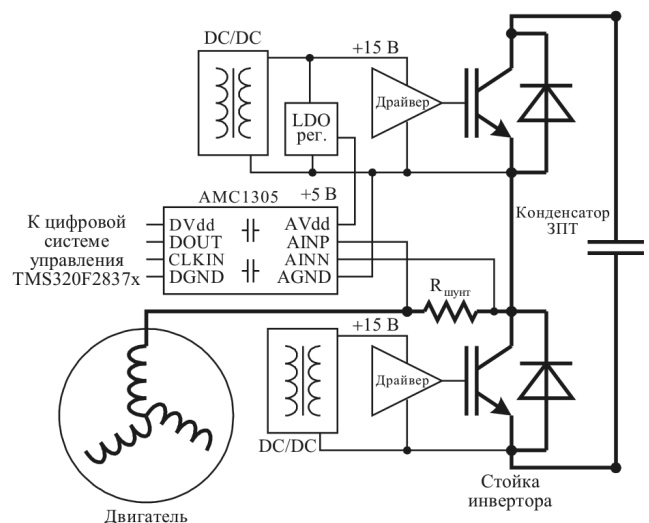


Рис. 1. Топология шунтового измерения тока в электроприводах с помощью дельта-сигма модулятора

та-сигма модуляторов и использовать новый формат входа микроконтроллера для демодуляции, то можно заменить дорогостоящий датчик на эффекте Холла компенсационного типа, позволяя сэкономить до 30 USD с каждого датчика (для датчиков с номинальным током измерения 200 А). Существуют также решения, которые объединяют резистивные шунты и сигма-дельта модуляторы в одном корпусе.

Производители силовой электроники относительно давно применяют микросхемы дельта-сигма модуляции для измерения токов [6, 7] и учитывают погрешности в измерительных шунтах [8], однако нет четкого понимания об абсолютной погрешности измеренного сигнала, полученного с помощью демодуляции потока дельта-сигма данных. Есть редкие документы, предоставляемые производителями, которые приводят некоторую информацию о зависимостях между коэффициентом передискретизации, типом фильтра и разрешения. К сожалению, они содержат неверные сведения об эффективной разрядности [9] и, кроме того, часто путают между собой разрешение и точность полученного результата.

Цель данной статьи — исследование точности и максимальной погрешности шунтового измерения тока с помощью идеализированного дельта-сигма модулятора. Исследование проводится при различных значениях коэффициента передискретизации и типах фильтров демодулятора. Результаты сравниваются с традиционными 12-битными АЦП, которые обычно используются в современных силовых преобразователях и электроприводах. Сравнение проводится с учетом точности и времени измерения, которое должно быть минимальным для высокопроизводительных систем управления с быстрой реакцией по току [10].

#### Принципы шунтового измерения тока. Шунт.

Шунт устанавливается последовательно в цепь протекания тока (рис. 1). Для шунтов диапазон типовых рабочих напряжений составляет от 50 до 250 мВ. Предельное рабочее напряжение на шунте определяется при протекании через него максимального тока, и обычно оно в два раза превышает номинальное значение. Более высокое значение падения напряжения на шунте приводит к увеличению потерь в измерительной системе. Например, при номинальном токе 400 А рассеивание энергии на шунте для одной фазы будет составлять 10 и 50 Вт для шунтов 50 и 250 мВ. Данное обстоятельство оказывает влияние на тепловой режим работы измерительной цепи, хотя влияние на общую эффективность силового преобразователя относительно мало.

*Дельта-сигма модулятор (преобразователь).* Микросхема дельта-сигма модулятора подключает-

ся напрямую к шунту и имеет встроенную гальваническую развязку, поэтому питание микросхемы разделено на две части: первичную и вторичную. Вторичная цепь питания модулятора гальванически связана с питанием микроконтроллера. При подключении токового шунта согласно рис. 1 потенциал на входе микросхемы модулятора будет изменяться на периоде коммутации силовых ключей, поэтому для питания первичной цепи микросхемы можно использовать питание драйвера верхнего ключа.

Микросхемы, подобные AMC1305, содержат цепь приема и усиления входного сигнала, подключенную к дельта-сигма модулятору второго порядка, который превращает входной аналоговый сигнал в цифровой одноразрядный поток данных (битовый поток). Структура модуляторов, приведенная в технической документации, как правило, неточна [4], поскольку в ней отсутствуют коэффициенты усиления для блоков интеграторов, что делает структуру неработоспособной. Структура для данного исследования была взята из [11] и представлена на рис. 2. Реализация обоих интеграторов в дискретной форме делает структуру инвариантной по времени независимо от частоты модуляции.

*Демодуляция битового потока.* Демодуляция передаваемого модулятором битового потока может быть осуществлена с помощью специальных периферийных устройств современных микроконтроллеров или с использованием ПЛИС. Для преобразования в цифровой вид, подходящий для обработки микроконтроллерной системой управления, модулированный битовый поток должен быть обработан фильтром низких частот, примером которого являются Sinc-фильтры [12] разных порядков. Sinc-фильтр первого порядка является (далее Sinc) фильтром скользящего среднего и может быть за-

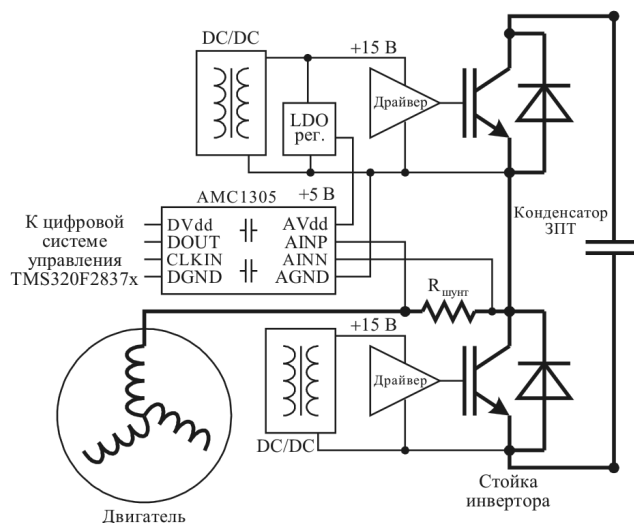


Рис. 1. Топология шунтового измерения тока в электроприводах с помощью дельта-сигма модулятора

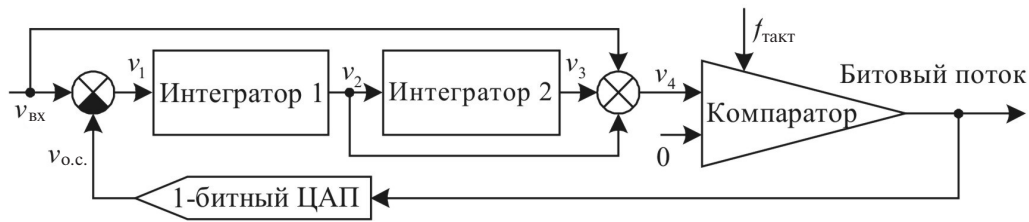


Рис. 2. Структура сигма-дельта модулятора второго порядка

писан в форме БИХ-фильтра (IIR) [9] или КИХ-фильтра (FIR), поскольку результат остается тем же:

$$H_{IIR}(z) = \frac{1(1 - z^{-N})}{N(1 - z^{-1})}; \quad (1)$$

$$H_{FIR}(z) = \frac{1}{N}(1 + z^{-1} + z^{-2} + \dots + z^{-(N-1)}). \quad (2)$$

где  $z$  – оператор прямого сдвига;  $N$  представляет коэффициент передискретизации (OSR) или число битов передаваемого сигнала, которые используются в фильтре. Абсолютной погрешностью сигнала, восстановленного таким фильтром, является обратное значение числа обработанных битов:

$$\delta = \frac{1}{N} 100\%. \quad (3)$$

В то же время выходной сигнал определяется не только средним значением битов в битовом потоке, но и частотой изменения состояния бит в потоке. Для выделения полезной информации применяются фильтры высоких порядков. Наиболее простой реализацией фильтра второго и третьего порядков является последовательное соединение двух или трех фильтров первого порядка. На рис. 3 показано сравнение работы фильтров Sinc, Sinc2 и Sinc3 при коэффициенте передискретизации, равном 8. На временной диаграмме в начальный момент времени уровень измеряемого сигнала составляет 60% по отношению ко всему диапазону, а в середине временного интервала возрастает до 90%.

**Оценка точности измерения.** Анализ переходных процессов показывает, что использование фильтров высоких порядков увеличивает разрешение оцифрованного сигнала и его точность. Стоит также учесть, что точность также зависит от частоты битового потока, а частота — от значения входного сигнала относительно его максимального и минимального значений.

При увеличении коэффициента передискретизации и порядка цифрового фильтра улучшается точность измерения. Но это приводит к увеличению времени измерения, что нежелательно сказывается на системах управления из-за роста задерж-

ки в контуре обратной связи по току. Следовательно, для достижения максимальной эффективности работы контура тока необходимо соблюдать баланс между точностью и временем измерения.

OSR, бит	Характеристики Sinc-фильтра третьего порядка (Sync3)		
	Отношение сигнал/шум, дБ	ENOB, бит	Время отклика фильтра, мкс
4	25	3,9 [9] 3 [4]	0,6
8	40	6,4 [9] 5 [4]	1,2
16	55	8,9 [9] 8 [4]	2,4
32	70	11,4 [9] 10,5 [4]	4,8
64	85	13,9 [9] 12,5 [4]	9,6

В [9] приводится оценка точности в виде эффективной разрядности (ENOB) для различных коэффициентов передискретизации и конфигураций фильтров. Характеристики Sinc3-фильтра представлены в таблице. Длительность измерения тока или время отклика фильтра даны при тактовом сигнале 20 МГц. В соответствии с таблицей приемлемое

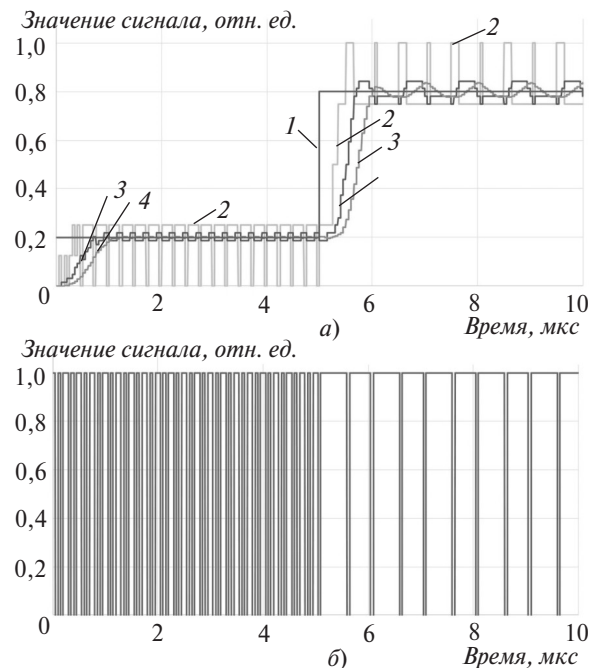


Рис. 3. Работа Sinc, Sinc2, и Sinc3 фильтров при OSR = 8 (верхний график: 1 – входной сигнал; 2 – выход фильтра Sinc; 3 – выход фильтра Sinc2; 4 – выход фильтра Sinc3; нижний график: битовый поток)

значение OSR лежит в пределах 16 и 32. Как правило, 12-битный АЦП имеет от 10 до 11 ENOB, поэтому нет смысла увеличивать OSR для достижения более высокой точности контура тока. Заметим, что эти параметры отличны от приведенных в [4].

Оценка эффективной разрядности является непростой задачей, поскольку ENOB зависит не только от числа битов, но и от частоты изменения состояния бит в потоке. Для проверки данных в таблице рассмотрим крайний случай, когда используется фильтр Sinc3, OSR равен 16, а входной сигнал равен 1/49 всего диапазона, что соответствует одному биту ENOB. Это означает, что модулирован-

ный сигнал имеет 1 положительный бит и 48 отрицательных. При таком измерении мы можем получить два разных результата. Первый, когда один положительный бит приходит вместе с 47 отрицательными, и тогда измеряемая величина не будет равна нулю. Второй, когда приходят 48 отрицательных импульсов и ни одного положительного, и тогда измеряемая величина будет равняться нулю. Для второго случая максимальная погрешность составляет 1/49 всей шкалы измерений или 2%, в то время как погрешность, исходя из эффективной разрядности, должна быть равна 0,4% в соответствии с [4] и 0,2% в соответствии с [9]. Это расхо-

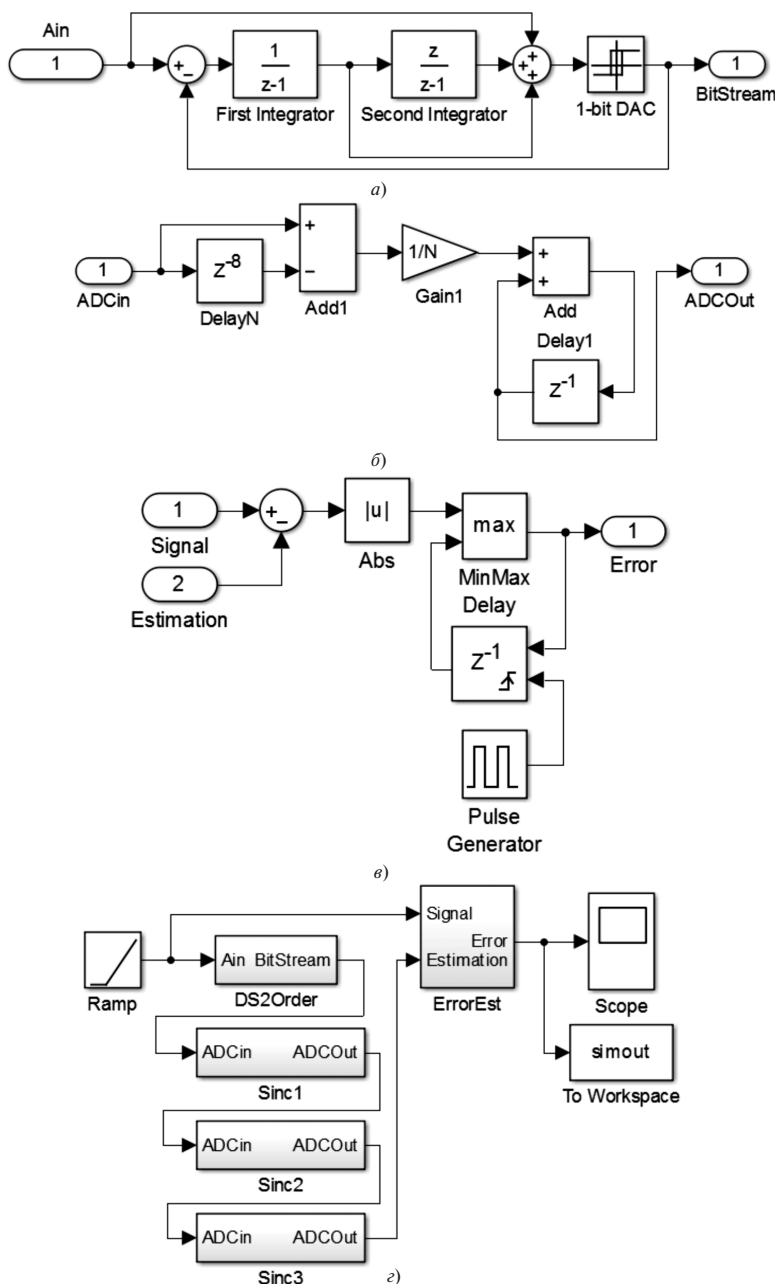


Рис. 4. Модель экспериментальной установки: а — подсистема дельта-сигма модулятора второго порядка (DS2Order); б — подсистема фильтра Sinc (Sinc1, Sinc2, Sinc3); в — подсистема датчика максимальной погрешности (ErrorEst); г — модель экспериментальной установки

дение будет исследовано при моделировании дельта-сигма модуляции и демодуляции.

**Модель для оценки точности.** Модель состоит из источника входного сигнала, дельта-сигма модулятора второго порядка (рис. 4,а) и последовательно соединенных Sinc-фильтров. Результатом работы первого фильтра является усреднение сигнала на периоде дискретизации. Полученный результат не учитывает дополнительную информацию о частоте изменения уровня сигнала в битовом потоке, поэтому выход с Sinc-фильтра первого порядка не рассматривается. Сравняться будут выходы с Sinc2- и Sinc3-фильтров при одинаковом времени измерения. Сигнал на выходе с фильтра сравнивается с входным сигналом, что позволяет рассматривать погрешность как функцию входного сигнала. Входной сигнал изменяется от середины всего диапазона и до максимума. Изменять входной сигнал во всем диапазоне не имеет смысла, так как результат будет симметричным. Модель была реализована в Simulink MATLAB, ее структура показана на рис. 4,г. Sinc-фильтр реализован в соответствии с (1), его модель изображена на рис. 4,б. Для оценки точности в модели разработан отдельный

блок (рис. 4,е), который определяет максимальную погрешность на 100 измерений.

**Результаты моделирования.** Первый эксперимент проведен при  $OSR = 8$  и Sinc3-фильтре (рис. 5,а);  $OSR = 12$  и Sinc2-фильтре (рис. 5,б). В обоих случаях обрабатывались 8,3 и 12,2 бит из битового потока. Результаты показывают, что в обоих случаях максимальная погрешность достигает самых высоких значений, когда входной сигнал приближается к своему максимуму. Характеристика Sinc2 более плоская в области от 0 до 75%, в то время как характеристика Sinc3 начинает расти после 50% максимального значения входной величины.

При увеличении времени измерения точность увеличивается. Максимальная погрешность для Sinc3-фильтра (рис. 6,а) стала меньше, чем у Sinc2 (рис. 6,б) и составляет от 0,25% (при нулевом входном сигнале) до 0,5% (при входном сигнале, равном 75% максимального значения). Эффективная разрядность для обоих случаев составляет примерно 8 разрядов, хотя точность измерения с фильтром Sinc2 в среднем ниже.

С увеличением коэффициента передискретизации до 32 в случае с Sinc3-фильтром максимальная погрешность составляет 0,05% в диапазоне от 0 до

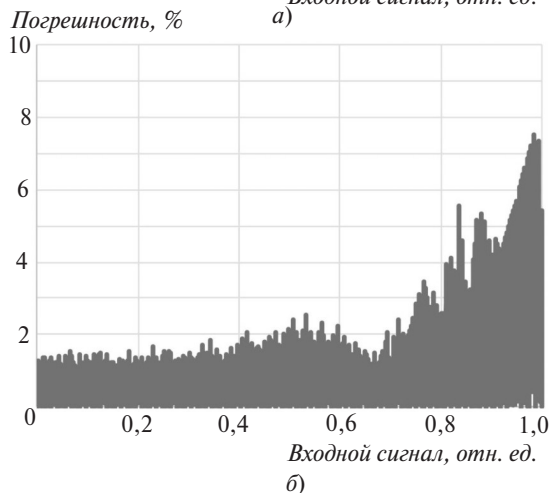
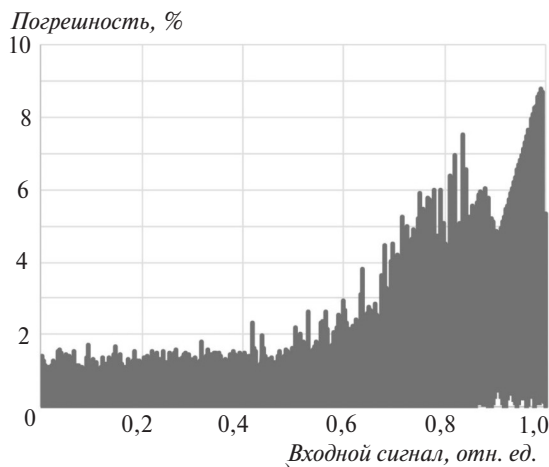


Рис. 5. Погрешности: а —  $OSR = 8$ , фильтр Sinc3; б —  $OSR = 12$ , фильтр Sinc2

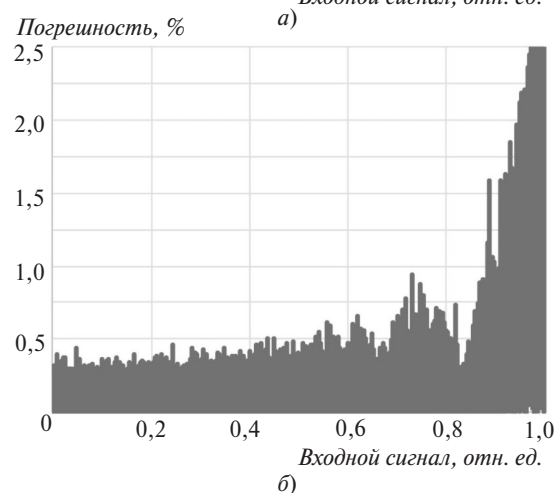
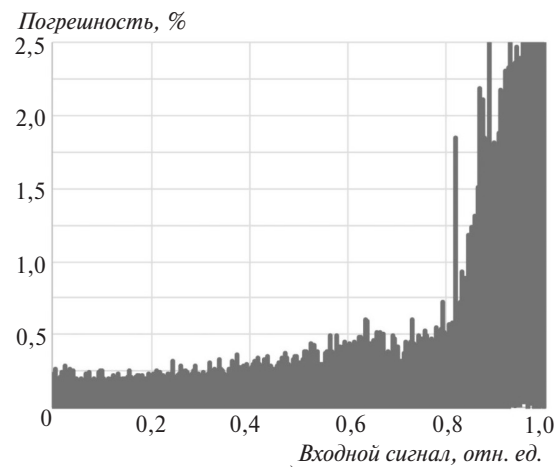


Рис. 6. Погрешности: а —  $OSR = 16$ , фильтр Sinc3; б —  $OSR = 24$ , фильтр Sinc2

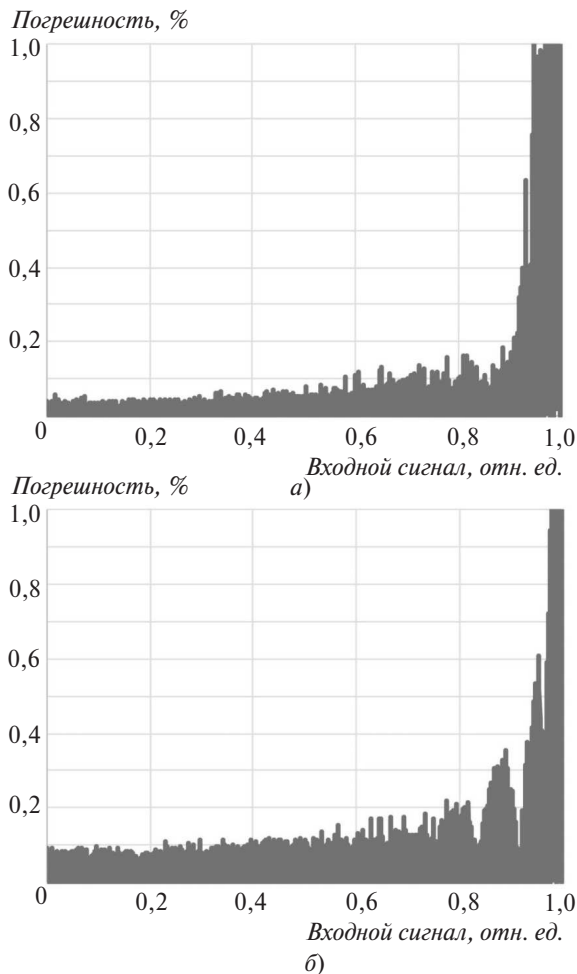


Рис. 7. Погрешности: а — OSR = 32, фильтр Sinc3; б — OSR = 48, фильтр Sinc2

50% максимального уровня входного сигнала (рис. 7,а). В данном случае эффективная разрядность достигает 11. Результаты для Sinc2 фильтра при том же времени измерения в целом хуже (рис. 7,б).

Увеличение погрешности в области больших значений входного сигнала не оказывает фактического влияния на эффективность работы контуров тока, так как большие значения сигналов достижимы только в условиях перегрузок, где высокие требования к качеству регулирования тока не применимы.

**Заключение.** Шунтовое измерение тока с использованием сигма-дельта модуляции является недорогим и точным методом измерения тока в системах управления. Метод обеспечивает высокую точность при малых входных сигналах, в то время как в условиях перегрузки она снижается. Еще одним преимуществом данного метода является его устойчивость к помехам, возникающим при коммутации ключей силового преобразователя. Время измерения сопоставимо с обычным АЦП и находится в пределах от 2,4 до 4,8 мкс при том же разрешении.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10618).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xiao Ch., Zhao L., Asada T., Odendaal W.G., van Wyk J.D. An overview of integratable current sensor technologies. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003, vol.2, 1251–1258.
2. LMx31x Precision Voltage-to-Frequency Converters, Datasheet, Texas Instruments, SNOSBI2C –JUNE 1999–REVISED SEPTEMBER 2015.
3. SEMiX603GB12E4Ip Trench IGBT Modules, Datasheet, Semikron, Rev. 2.0 – 25.01.2017.
4. AMC1305x Small High-Precision, Reinforced Isolated Delta-Sigma Modulators, Datasheet, Texas Instruments, SBAS654F, JUNE 2014, REVISED MARCH, 2017.
5. TMS320F2837xD Dual-Core Delfino Microcontrollers, Technical Reference Manual, Texas Instruments, Literature Number: SPRUHM8G, December 2013–Revised September, 2017.
6. Homann M., Schumacher W. High bandwidth phase voltage and phase current control loop of a permanent magnet synchronous motor based on delta sigma bitstreams. — 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), 2016, pp. 1–10.
7. Peters W., Schulz B., Mathapati Sh., Bocker J. Regular-sampled current measurement in AC drives using delta-sigma modulators. — 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009, pp. 1–9.
8. Spang M., Hofstoetter N. Evaluation of Current Measurement Accuracy for a Power Module with Integrated Shunt Resistors, PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2017, pp. 1–8.
9. Oljaca M., Hendrick T. Combining the ADS1202 with an FPGA Digital Filter for Current Measurement in Motor Control Applications. Application Report, Texas Instruments, SBAA094, June 2003.
10. Jarzbowicz L. Sensorless IPMSM drive with rotor position estimator based on analysis of phase current derivatives. — IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2011, pp. 733 – 738, DOI: 10.1109/ISIE.2011.5984248.
11. Schreier R. Second and Higher-Order Delta-Sigma Modulators. MEAD, March, 2008.
12. [https://en.wikipedia.org/wiki/Sinc\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Sinc_filter). Дата обращения: 03.04.2018.

[04.04.2018]

*А в т о р ы:* Ануцин Алексей Сергеевич окончил «НИУ «Московский энергетический институт» в 2001 г. В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка системы управления многофазного вентильно-индукторного привода с промежуточным регулируемым звеном постоянного тока». Заведующий кафедрой автоматизированного электропривода (АЭП) в «НИУ «МЭИ».

Сурнин Димид Константинович — студент «НИУ «МЭИ». Инженер-конструктор ООО «НПФ Вектор».

Лашкевич Максим Михайлович окончил «НИУ «МЭИ» в 2008 г. В 2013 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка системы управления для электротрансмиссии с тяговыми вентильно-индукторными двигателями». Инженер кафедры АЭП «НИУ «МЭИ».

**Жарков Александр Александрович** окончил «НИУ «МЭИ» в 2003 г. В 2008 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование вентильно-индукторного привода с независимым возбуждением с векторным управлением». Доцент кафедры АЭП «НИУ «МЭИ».

**Остриров Вадим Николаевич** окончил «НИУ «МЭИ» в 1977 г. В 2003 г. защитил докторскую диссертацию «Создание гаммы электронных преобразователей для электропривода на современной элементной базе». Профессор кафедры АЭП «НИУ «МЭИ».

*Elektrichestvo*, 2018, No. 7, pp. 47–53

DOI:10.24160/0013-5380-2018-7-47-53

## Analyzing the Accuracy of Measurement by a Shunt Current Sensor with a Delta-Sigma Converter in Electric Drives

**ANUCHIN Aleksei S.** (National Reserch University «Moscow Power Engineering Institute» («NRU «MPEI»), Moscow, Russia)—Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

**SURNIN Dimid K.** (LLC «NPF Vektor»; «NRU«MPEI», Moscow, Russia) — Engineer-designer; Student

**LASHKEVICH Maksim M.** (LLC «NPF Vektor»; «NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Ingeiner-programmer; Engineer of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

**ZHARKOV Aleksander A.** (LLC «NPF Vektor»; «NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Chief designer; Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

**OSTRIROV Vadim N.** (LLC «NPP Tsikl Plyus»; «NRU «MPEI») — General Director; Professor, Dr. Sci. (Eng.)

*This article considers the accuracy of current measurement using a shunt sensor in an adjustable speed drive using delta-sigma modulation. Current measurement with resistive shunts is becoming increasingly common due to the appearance of galvanically isolated delta-sigma microchips (modulators). This solution is cheaper than the closed-loop Hall-effect current sensors and has already been successfully used in some industrial electric drives. The accuracy of the obtained result after demodulation in the microcontroller is investigated in the article. By modeling, the maximum error was obtained as a function from the oversampling ratio, the type of digital filter and the relative value of the input sigal.*

**K e y w o r d s:** current measurement, shunt sensor, delta-sigma modulation, accuracy, response time, electric drives

### REFERENCES

1. **Xiao Ch., Zhao L., Asada T., Odendaal W.G., van Wyk J.D.** An overview of integratable current sensor technologies. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003, vol.2, 1251–1258.

2. **LMx31x Precision** Voltage-to-Frequency Converters, Datasheet, Texas Instruments, SNOSBI2C –JUNE 1999–REVISED SEPTEMBER 2015.

3. **SEMiX603GB12E4Ip** Trench IGBT Modules, Datasheet, Semikron, Rev. 2.0 – 25.01.2017.

4. **AMC1305x** Small High-Precision, Reinforced Isolated Delta-Sigma Modulators, Datasheet, Texas Instruments, SBAS654F, JUNE 2014, REVISED MARCH, 2017.

5. **TMS320F2837xD** Dual-Core Delfino Microcontrollers, Technical Reference Manual, Texas Instruments, Literature Number: SPRUHM8G, December 2013–Revised September, 2017.

6. **Homann M., Schumacher W.** High bandwidth phase voltage and phase current control loop of a permanent magnet synchronous motor based on delta sigma bitstreams. — 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), 2016, pp. 1–10.

7. **Peters W., Schulz B., Mathapati Sh., Bocker J.** Regular-sampled current measurement in AC drives using delta-sigma modulators. — 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009, pp. 1–9.

8. **Spang M., Hofstoetter N.** Evaluation of Current Measurement Accuracy for a Power Module with Integrated Shunt Resistors, PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2017, pp. 1–8.

9. **Oljaca M., Hendrick T.** Combining the ADS1202 with an FPGA Digital Filter for Current Measurement in Motor Control Applications. Application Report, Texas Instruments, SBAA094, June 2003.

10. **Jarzkowicz L.** Sensorless IPMSM drive with rotor position estimator based on analysis of phase current derivatives. — IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2011, pp. 733 – 738, DOI: 10.1109/ISIE.2011.5984248.

11. **Schreier R.** Second and Higher-Order Delta-Sigma Modulators. MEAD, March, 2008.

12. [https://en.wikipedia.org/wiki/Sinc\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Sinc_filter). Дата обращения: 03.04.2018.