

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ С ШУНТОВЫМИ ДАТЧИКАМИ И ДЕЛЬТА-СИГМА-МОДУЛЯЦИЕЙ СИГНАЛА

А. С. АНУЧИН<sup>1</sup>, Г. Л. ДЕМИДОВА<sup>2</sup>, Е. О. СТОЛЯРОВ<sup>1</sup>, А. А. ЖАРКОВ<sup>1</sup>,  
Д. К. СУРНИН<sup>1</sup>, Ф. БРИЗ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет „МЭИ“, 111250, Москва, Россия  
E-mail: anuchin.alecksey@gmail.com

<sup>2</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Университет Овьедо, Calle San Francisco, 3, 33003 Oviedo, Asturias Испания  
E-mail: fernando@isa.uniovi.es

Предложена технология измерения тока с помощью шунта и дельта-сигма-модуляции. Исследование проводилось на модели двигателя: разомкнутая система управления использовалась для определения точности измерения, тогда как замкнутая — для изучения влияния погрешности измерения на устойчивость системы и пульсации момента двигателя. Показано, что коэффициенты передискретизации цифровых фильтров, равные 8 и ниже, приводят к большим возмущениям в работе контура тока из-за значительной ошибки измерения, даже при использовании фильтра Sinc3. Приемлемые результаты достигаются при использовании коэффициента передискретизации 16 и выше при типе фильтра Sinc3.

**Ключевые слова:** шунтовой датчик тока, дельта-сигма-модуляция, регулирование тока, контур регулирования, пульсация момента, электропривод

**Введение.** В течение длительного времени измерение тока основанным на эффекте Холла датчиком компенсационного типа было преобладающим решением в силовых полупроводниковых преобразователях. Шунтовые датчики тока, как правило, применяются в маломощных и недорогих преобразователях, например, в бытовой технике или ручных инструментах. Для шунтового измерения тока в высокомоощных преобразователях необходима гальваническая развязка аналогового сигнала, которая повышает стоимость, снижает точность измерений и сокращает полосу пропускания канала. К примеру, микросхемы линейных оптронов обладают плохой линейностью и точностью в сравнении со стандартными датчиками тока, основанными на эффекте Холла компенсационного типа. А микросхемы преобразователей напряжения в частоту, генерирующие цифровой сигнал, который можно гальванически развязать с помощью дешевых оптопар, обладают большой временной задержкой в измерении и дороги.

С появлением микросхем дельта-сигма-модуляторов ситуация изменилась. Дельта-сигма-модуляторы (такие как AMC1305 [1] от Texas Instruments) производятся некоторыми компаниями для измерения тока путем измерения падения напряжения на шунте и преобразования сигнала в цифровой вид, который в виде битового потока (битстрима) передается в систему управления. Демодуляция битового потока может быть осуществлена с помощью специального периферийного блока микроконтроллера или на программируемой логической матрице (ПЛИМ).

Semikron была первой компанией, начавшей производство силовых модулей с шунтовыми датчиками тока, встроенными в выходную цепь [2]. Производители микросхем изготавливают различные серии дельта-сигма-модуляторов [1], затем периферийные блоки модуляторов встраиваются в микроконтроллеры [3]. Такая система может заменить датчики

тока на эффекте Холла, с экономией в 30 долларов на каждой (для номинальных токов свыше 200 А) [4]. Однако вопрос о точности предложенной системы измерения тока не решен.

Данные публикаций и технической документации о точности шунтового измерения тока с использованием технологии дельта-сигма-модуляции кажутся противоречивыми. Часто в сопроводительной документации увеличение точности выходного разрешения обосновывают увеличением выходного разрешения при демодуляции битового потока с помощью фильтров высокого порядка [3, 5]. Если сигнал очень мал или велик (например, 1 % от входного диапазона), то битовый поток содержит много нулевых битов или, наоборот, единичных, и тогда количество последовательных идентичных битов может превысить время выборки. Однако эта проблема проявляется только при околограничных величинах входного сигнала, которые не достигаются в стандартных режимах работы силового преобразователя [5].

Как показано в [5], информация в битовом потоке представлена не только средним значением битов, но также и частотой смены битов в потоке. Эту информацию можно получить, лишь используя фильтры более высоких порядков, таких как Sinc2 и Sinc3, однако точность по-прежнему зависит от величины входного сигнала [6].

Шунтовое измерение тока с помощью дельта-сигма-модуляции исследовано в [7], а использование данного метода в бездатчиковых системах управления и в системах с управлением на основе прогнозирующей модели в [8, 9], но не исследованы точность измерения и ее влияние на систему управления, так как в этих работах устанавливалась заведомо высокая передискретизация. Чем больше коэффициент передискретизации и порядок Sinc-фильтра, тем выше точность, но при этом также больше время измерения. Поэтому при настройке цифровых фильтров всегда нужно искать компромисс между точностью и временем измерения тока. Основная цель настоящей статьи — выработка рекомендаций по настройке цифровых фильтров, обеспечивающей минимальное время измерения при достаточной точности.

**Принципы шунтового измерения тока с использованием дельта-сигма-модуляции.** Токовый шунт подключается между силовым выходом инвертора и фазой двигателя. Диапазон падения напряжения на шунте должен находиться в пределах  $\pm 50$  или  $\pm 250$  мВ для того, чтобы соответствовать стандартным входным диапазонам дельта-сигма-модуляторов. Питание верхнего IGBT-драйвера может быть использовано также для питания микросхемы дельта-сигма-модулятора (рис. 1). Эти микросхемы обычно реализуют дельта-сигма-модулирование второго порядка (рис. 2), которое обеспечивает лучшее распределение нулей и единиц в генерируемом битовом потоке по сравнению с дельта-сигма-модуляцией первого порядка [10]. Выходной битовый поток содержит информацию о величине протекающего в фазе двигателя тока. Поскольку битовый поток является цифровым сигналом, то обеспечить гальваническую развязку такого сигнала гораздо дешевле, чем развязку аналогового сигнала.

Частота дельта-сигма-модулятора должна быть синхронизирована с частотой тактирования  $f_{clk}$  периферийного блока цифровой фильтрации микроконтроллера. Обычно максимальная частота тактирования микросхем 20 МГц. Работа на более низкой частоте приводит к увеличению времени измерения. Демодуляцию битового потока может выполнять специальное периферийное устройство, которое содержат многие современные микроконтроллеры, такие как TMS320F28377D от Texas Instruments или K1921BK028 от НИИЭТ (Воронеж). Битовый поток должен быть отфильтрован с использованием фильтра низких частот, которым обычно являются Sinc-фильтры [6] различных порядков. В общем случае Sinc-фильтр первого порядка может быть представлен фильтрами скользящего среднего

$$H_{\text{IR}}(z) = \frac{1}{N} \frac{(1 - z^{-N})}{(1 - z^{-1})}, \quad (1)$$

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

где  $z$  — оператор временного сдвига,  $N$  — коэффициент передискретизации, или число битов передаваемого сигнала, которые используются в фильтре, IIR — БИХ-фильтр [11], FIR — КИХ-фильтр.

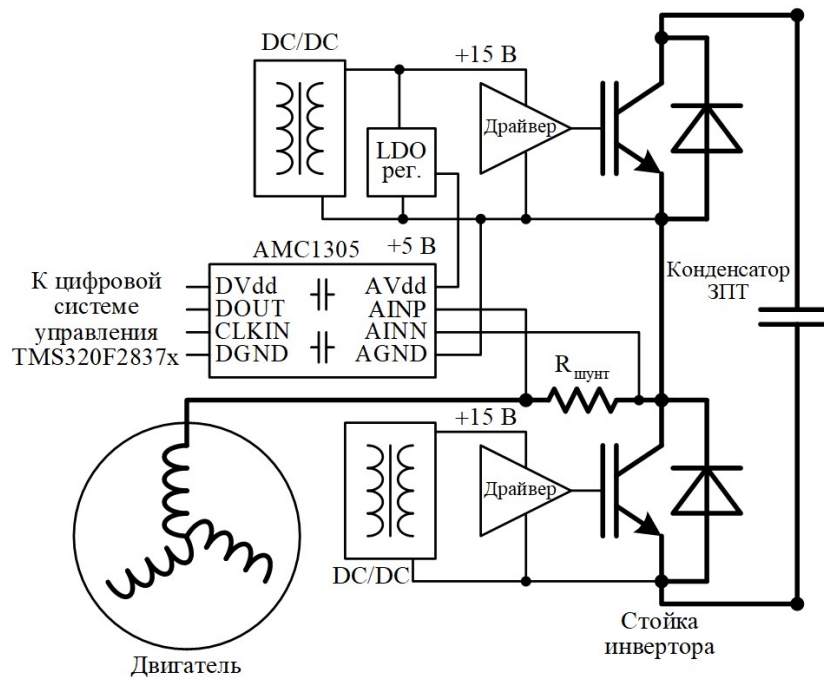
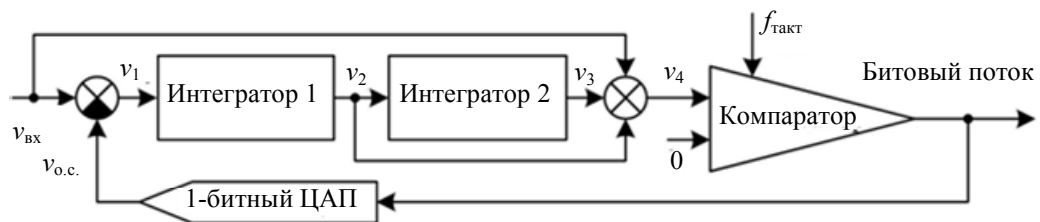


Рис. 1

а)



б)

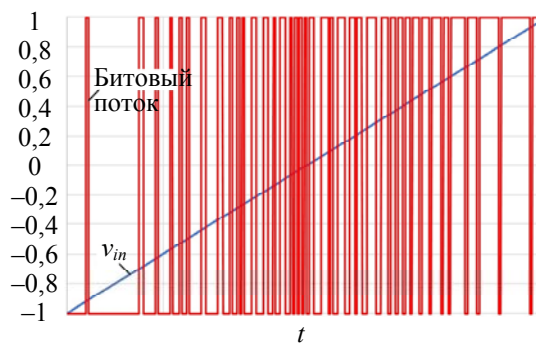


Рис. 2

Точность измерения тока зависит от числа битов в битовом потоке, используемых для одного измерения в цифровом фильтре. Чем больше битов (коэффициент передискретизации) и выше порядок фильтра, тем выше точность измерения. В то же время повышение точности за счет увеличения числа битов или порядка фильтра приводит к возрастанию времени измерения. Следовательно, правильная настройка фильтра является компромиссом между точностью и временем измерения. Время измерения может быть вычислено по следующей формуле:

$$t = \frac{N}{f_{clk}} F_{order}, \quad (3)$$

где  $F_{order}$  — порядок Sinc-фильтра.

Обычно для измерений по одному каналу используются сразу два типа фильтра: один для точных измерений — Sinc2 или Sinc3 с большим  $N$ , а другой — для токовых защит — Sinc1 с малым  $N$ .

**Исследуемая система.** Шунтовое измерение тока исследовалось в разомкнутой и замкнутой системах управления на модели асинхронного двигателя, подключенного к двухуровневому инвертору. Максимальный диапазон измерения шунтового датчика тока  $\pm 100$  А. Точность измерения исследовалась на разомкнутой системе. В замкнутой системе проверялась устойчивость системы при различных настройках цифрового фильтра. Во всех экспериментах использовался Sinc3-фильтр с коэффициентами передискретизации 8, 16 и 32, время измерения при использовании которых, согласно формуле (3), составляет 1,2, 2,4 и 4,8 мкс соответственно. Частота ШИМ установлена на 2000 Гц для того, чтобы получить видимые пульсации тока.

*Разомкнутая скалярная система управления с законом  $U/f$ .* Первый эксперимент проводился в скалярной системе управления при номинальной нагрузке. Структурная схема системы управления представлена на рис. 3, а. Данная структура реализует вращение вектора напряжения номинальной величины и частоты.

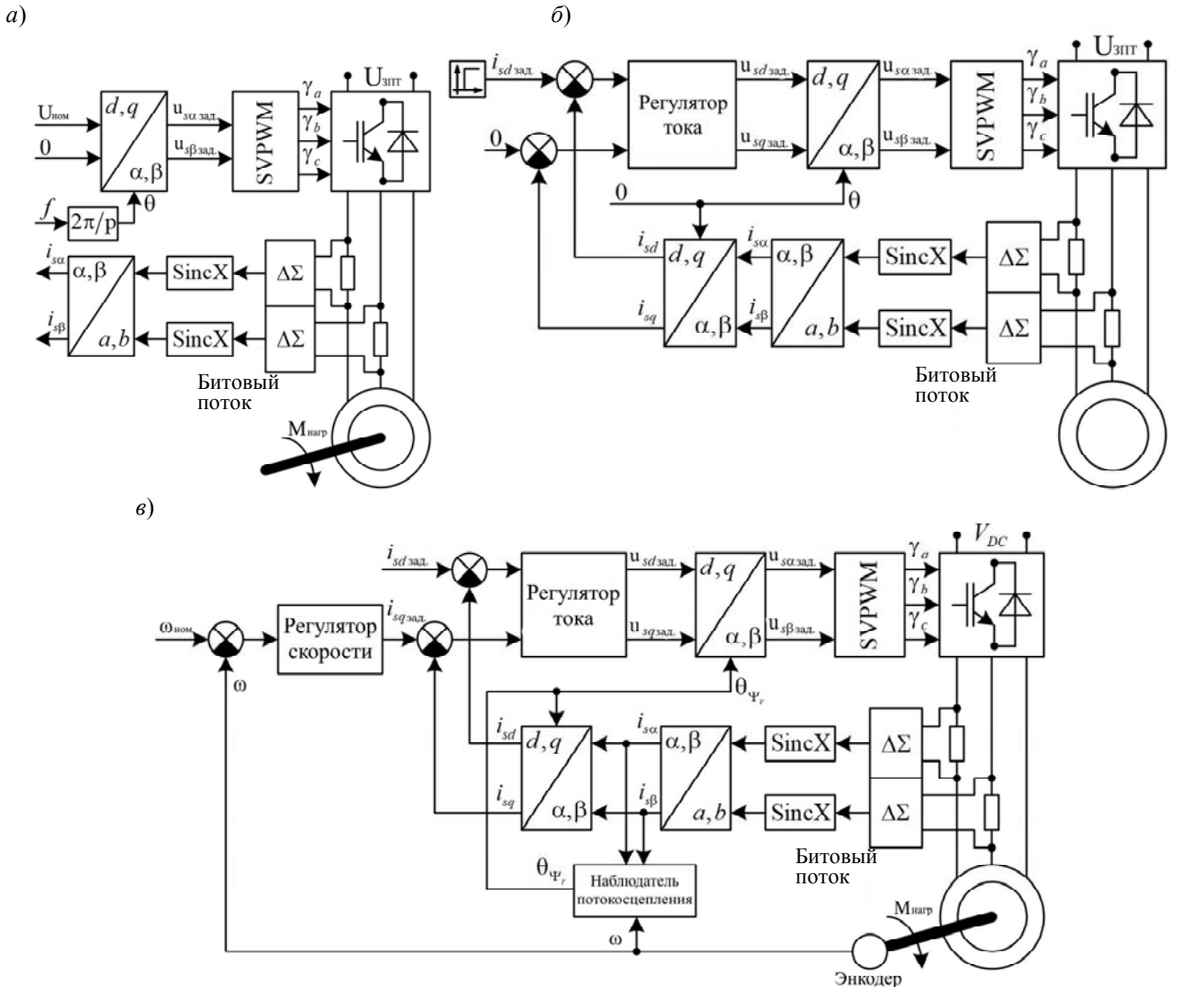


Рис. 3

*Замкнутая система: реакция на скачок входного воздействия.* Исследование в замкнутой системе началось с экспериментов по изучению реакции регуляторов тока на скачок при остановленном двигателе. Расчет регуляторов тока проводился в начале и середине каждого

периода ШИМ, следовательно, задание на скважность ШИМ обновлялось дважды за период. Таким образом, предполагалось, что управление происходит с помощью ПЛМ без задержек. Регуляторы тока были настроены на максимальное быстродействие таким образом, чтобы ток достигал установившегося значения за один период ШИМ. Соответствующая структурная схема приведена на рис. 3, б.

*Замкнутая система: номинальная скорость при номинальной нагрузке.* Моделирование с использованием векторной системы управления при вращении двигателя на номинальных скорости и моменте на валу позволило исследовать устойчивость системы при различных настройках цифрового фильтра, а также пульсации момента, которые возникали из-за ошибок в обратной связи по току (рис. 3, в).

**Результаты моделирования.** В первом эксперименте получены годографы непрерывных (истинных) токов и мгновенные значения токов, измеренных шунтовым датчиком тока в определенные дискретные моменты времени при двух разных коэффициентах передискретизации: 8 и 16 (рис. 4; голубой — истинный непрерывный ток, оранжевый — истинный ток в дискретные моменты времени начала и середины периода ШИМ, ярко-зеленый — измеряемый ток при  $N = 16$ , красный — при  $N = 8$ ). При  $N = 8$  процедура измерения тока была наименее длительной, но и результат менее точный, поскольку некоторые точки на годографе лежат достаточно далеко от истинного значения тока. При  $N = 16$  результаты измерения более точны.

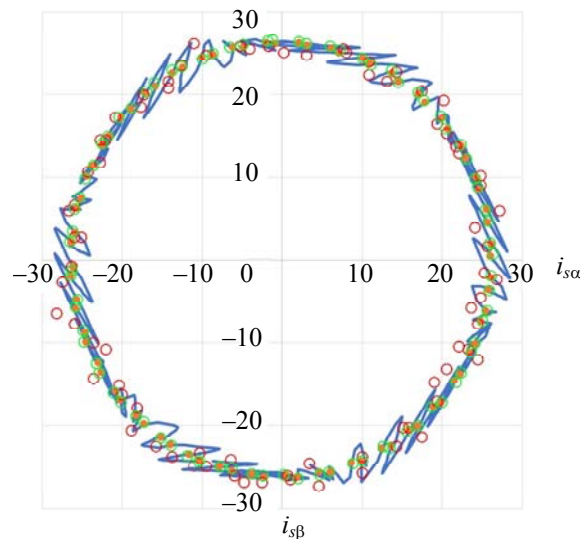


Рис. 4

Последний эксперимент проводился в векторной системе управления при номинальной нагрузке двигателя. В замкнутой системе регулирования на точность управления влияет и погрешность измерения токов. На рис. 5 представлены реакции на скачки задания тока 30 А в замкнутой системе управления при нулевой скорости и различных коэффициентах передискретизации: оранжевый — истинный непрерывный ток оси  $d$ , голубой — измеряемый ток, серый — задание напряжения оси  $d$ ). В случае  $N = 8$  большая погрешность измерения вызывает достаточно большие колебания тока вокруг заданной величины. Приемлемое качество регулирования достигается при  $N=16$ . Наилучшее качество регулирования достигнуто при наибольшем значении  $N = 32$ , при котором задержка измерения составляет 4,8 мкс. Система оставалась устойчивой, хотя увеличение задержки в канале обратной связи тока может сделать систему неустойчивой при тех же настройках регулятора. В этом случае отношение периода ШИМ к времени измерения тока более 1000, но для более высокой частоты ШИМ влияние задержки в измерении тока может быть более критично, поэтому она должна учитываться.

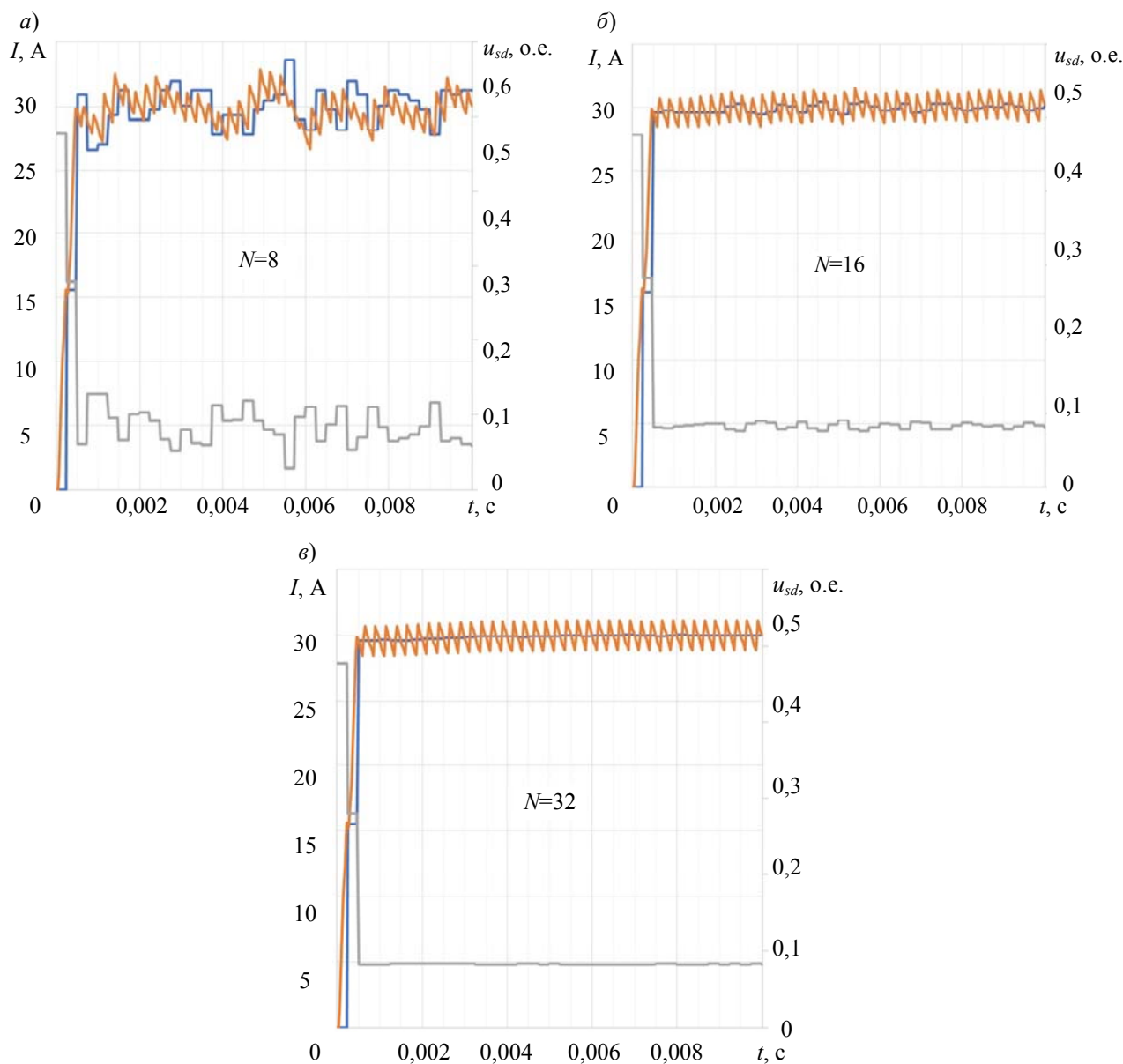


Рис. 5

Последний эксперимент проводился в векторной системе управления при номинальной нагрузке двигателя. Рабочий режим был примерно таким же, как и в эксперименте с разомкнутой системой, но ток контролировался регуляторами, на которые влияла погрешность измерения этих же токов. Погрешность в измерении тока приводит к погрешности в оценке потокосцепления, что вызывает пульсации тока, которые приводят к пульсациям момента двигателя. На рис. 6 представлена работа векторной системы управления в номинальных условиях: черный — момент двигателя, оранжевый — истинный ток фазы А, желтый — измеряемый ток фазы А, голубой — истинный ток фазы В, серый — измеряемый ток фазы В. Меньшие коэффициенты передискретизации приводят к большим пульсациям момента. При увеличении коэффициента передискретизации с 16 до 32 погрешность в измерении тока значительно снизилась. Это повлияло не только на форму фазного тока, но и на пульсации момента. Пульсации момента, которые остались при высоких значениях  $N$ , обусловлены в основном влиянием ШИМ составляющей в токе оси  $q$ .

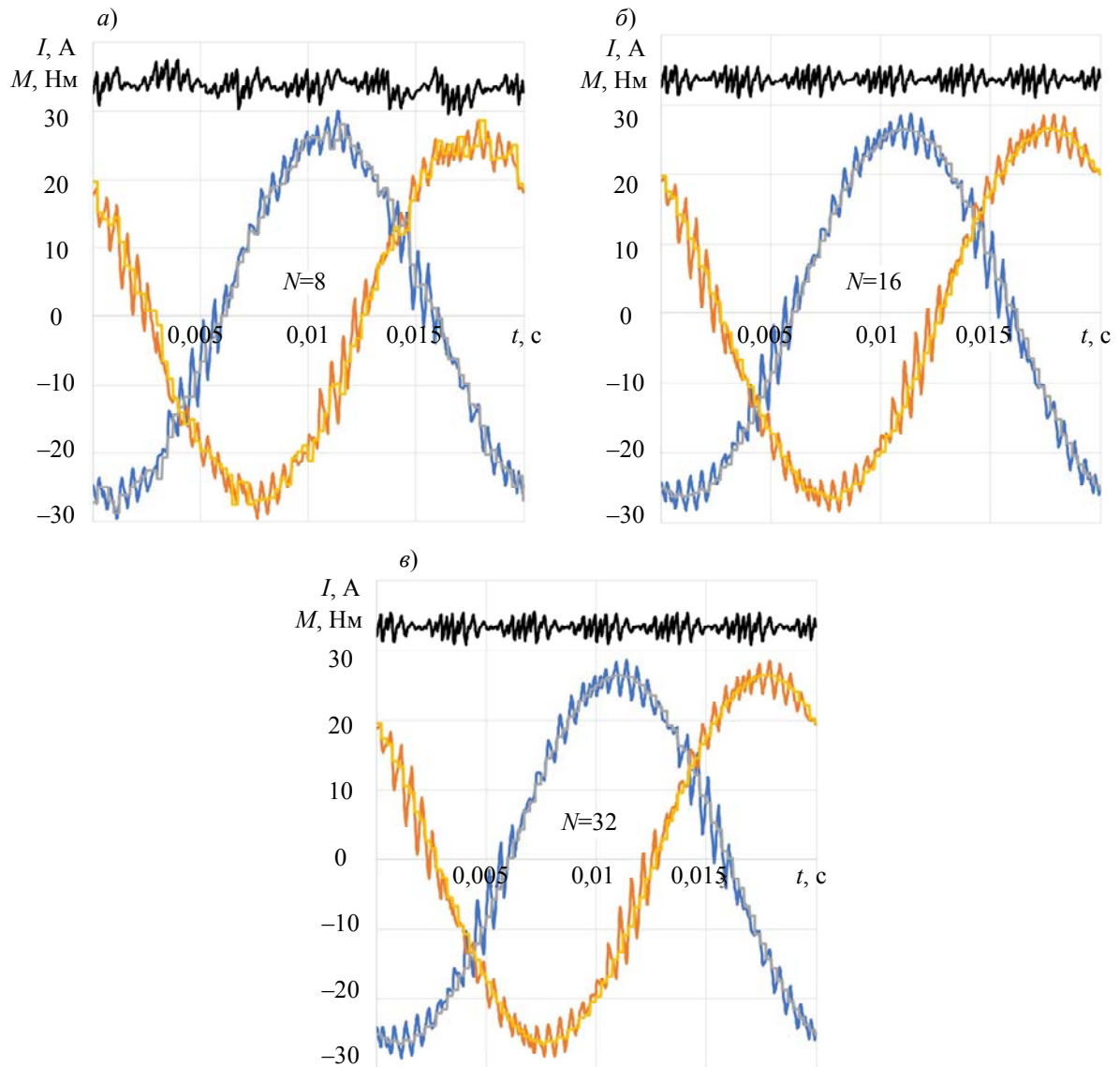


Рис. 6

### Выводы

1. Шунтовое измерение тока с помощью дельта-сигма-модуляции является недорогим решением для использования в современных электроприводах с замкнутыми системами управления. Точность измерения тока может изменяться путем изменения коэффициента передискретизации. Поскольку с повышением точности увеличивается также время измерения, выбор необходимого коэффициента передискретизации является компромиссным решением между достижением малой погрешности или быстрого отклика.

2. Исследования показывают, что  $N \leq 8$  приводит к большой погрешности измерения тока, что вызывает колебания в контуре тока и пульсации момента на валу. Приемлемое значение  $N=16$  позволяет получить производительность, сравнимую с традиционным датчиком тока на эффекте Холла компенсационного типа и 12-битным АЦП.

3. Более высокие коэффициенты передискретизации хотя и приводят к еще меньшей погрешности измерения, увеличивают время измерения, что не всегда допустимо.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Texas Instruments, “AMC1305x Small, High-Precision, Reinforced Isolated Delta-Sigma Modulators”, SBAS654F datasheet, Jun. 2014 [Электронный ресурс]: <<http://www.tij.co.jp/jp/lit/ds/sbas654f/sbas654f.pdf>>.
2. Semikron, “Trench IGBT Modules,” SEMiX603GB12E4Ip datasheet, Jan. 25, 2017 [Revised 2.0] [Электронный ресурс]: <<https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-semix603gb12e4ip-27897000>>.
3. Texas Instruments, “TMS320F2837xD Dual-Core Delfino Microcontrollers, Technical Reference Manual,” SPRUHM8G datasheet, Dec. 2013 [Revised Sept. 2017] [Электронный ресурс]: <<https://www.ti.com/lit/ug/spruhm8h/spruhm8h.pdf>>.
4. Spang M. and Hofstoetter N. Evaluation of Current Measurement Accuracy for a Power Module with Integrated Shunt Resistors // PCIM Europe 2017. Intern. Exhibition and Conf. for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. 2017. P. 1—8.
5. Anuchin A., Surnin D., Lashkevich M. Accuracy Analysis of Shunt Current Sensing by Means of Delta-Sigma Modulation in Electric Drives // Proc. of 17th Intern. Ural Conf. on AC Electric Drives. 2018.
6. Pisani B. Digital Filter Types in Delta-Sigma ADCs, Application Report, Texas Instruments // Rep. SBAA230, May 2017 [Электронный ресурс]: <<https://www.ti.com/lit/pdf/sbaa230>>.
7. Peters W., Schulz B., Mathapati Sh., Bocker J. Regular-sampled current measurement in AC drives using delta-sigma modulators // 13th Europ. Conf. on Power Electronics and Applications. 2009. P. 1—9.
8. Ma Z. and Kennel R. FPGA based signal injection sensorless control of SMPMSM using Delta-Sigma A/D conversion // 3rd IEEE Intern. Symp. on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED 2012). 2012. P. 1—6.
9. Ramirez F. and Pacas M. Enhanced control of the torque ripple in a PMSM drive with variable switching frequency // 19th Europ. Conf. on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe). 2017. P. 1—10.
10. Schreier R. Second and Higher-Order Delta-Sigma Modulators // Rep. MEAD, Mar. 2008 [Электронный ресурс]: <<http://classes.engr.oregonstate.edu/eecs/spring2017/ece627/Lecture%20Notes/2nd%20&%20Higher-Order2.pdf>>.
11. Oljaca M. and Hendrick T. Combining the ADS1202 with an FPGA Digital Filter for Current Measurement in Motor Control Applications // Application Report, Texas Instruments, Rep. SBAA094. Jun. 2003.

## Сведения об авторах

- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| <b>Алексей Сергеевич Анучин</b>       | — д-р техн. наук, доцент; Национальный исследовательский университет „МЭИ“, кафедра автоматизированного электропривода; заведующий кафедрой; E-mail: anuchin.alecksey@gmail.com |
| <b>Галина Львовна Демидова</b>        | — канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет компьютерных технологий и управления; E-mail: demidova@itmo.ru  |
| <b>Евгений Олегович Столяров</b>      | — студент; Национальный исследовательский университет „МЭИ“, кафедра автоматизированного электропривода; E-mail: stolyarovevgen@mail.ru   |
| <b>Александр Александрович Жарков</b> | — канд. техн. наук; Национальный исследовательский университет „МЭИ“, кафедра автоматизированного электропривода; E-mail: ZharkovAA@mpei.ru                                     |
| <b>Димид Константинович Сурнин</b>    | — студент; Национальный исследовательский университет „МЭИ“, кафедра автоматизированного электропривода; E-mail: dimidsurnin@gmail.com  |
| <b>Фернандо Бриз</b>                  | — PhD; Университет Овьедо, кафедра электротехники, электроники, вычислительной техники и системотехники; профессор; E-mail: fernando@isa.uniovi.es                              |

Поступила в редакцию  
05.06.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Анучин А. С., Демидова Г. Л., Столяров Е. О., Жарков А. А., Сурнин Д. К., Бриз Ф. Исследование процессов регулирования тока в электроприводах с шунтовыми датчиками и дельта-сигма-модуляцией сигнала // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 10. С. 897—906.



## STUDY OF CURRENT REGULATION PROCESSES IN ELECTRIC DRIVES WITH SHUNT SENSORS AND DELTA-SIGMA SIGNAL MODULATION

A. S. Anuchin<sup>1</sup>, G. L. Demidova<sup>2</sup>, E. O. Stolyarov<sup>1</sup>, A. A. Zharkov<sup>1</sup>,  
D. K. Surnin<sup>1</sup>, F. Briz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Moscow Power Engineering Institute, 111250, Moscow, Russia  
E-mail: anuchin.alecksey@gmail.com

<sup>2</sup>ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>University of Oviedo, 33003, Oviedo, Asturias, Spain  
E-mail: fernando@isa.uniovi.es

A method is proposed for measuring electric current using shunt and delta-sigma modulation. The research is conducted with a mathematical model of the motor: the open-loop control system was used to determine the measurement accuracy, while the closed-loop system was employed to investigate the effect of measurement error on the system stability and the motor torque pulsation. It is shown that oversampling coefficients of digital filters equal to 8 and lower lead to large disturbances in the current loop due to a high measurement error, even when using the Sinc3 filter. Acceptable results are achieved using the oversampling factor of 16 or higher with the Sinc3 filter type.

**Keywords:** shunt current sensing, delta-sigma modulation, current control, closed-loop control, torque ripple, electric drive

### REFERENCES

1. Texas Instruments, "AMC1305x Small, High-Precision, Reinforced Isolated Delta-Sigma Modulators," SBAS654F datasheet, Jun. 2014, [Revised Mar. 2017], <http://www.tij.co.jp/jp/lit/ds/sbas654f/sbas654f.pdf>.
2. Semikron, "Trench IGBT Modules," SEMiX603GB12E4Ip datasheet, Jan. 25, 2017 [Revised 2.0], <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-semix603gb12e4ip-27897000>.
3. Texas Instruments, "TMS320F2837xD Dual-Core Delfino Microcontrollers, Technical Reference Manual," SPRUHM8G datasheet, Dec. 2013 [Revised Sept. 2017], <https://www.ti.com/lit/ug/spruhm8h/spruhm8h.pdf>.
4. Spang M. and Hofstoetter N. *PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2017, pp. 1–8.
5. Anuchin A., Surnin D., Lashkevich M. *Proc. of 17th International Ural Conference on AC Electric Drives*, 2018.
6. Pisani B. *Rep. SBAA230*, May 2017, <https://www.ti.com/lit/pdf/sbaa230>.
7. Peters W., Schulz B., Mathapati Sh., Bocker J. *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2009, pp. 1–9.
8. Ma Z. and Kennel R. *3rd IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED 2012)*, 2012, pp. 1–6.
9. Ramirez F. and Pacas M. *19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, 2017, pp. 1–10.
10. Schreier R. *Rep. MEAD*, Mar. 2008, <http://classes.engr.oregonstate.edu/eecs/spring2017/ece627/Lecture%20Notes/2nd%20Higher-Order2.pdf>.
11. Oljaca M. and Hendrick T. *Application Report, Texas Instruments*, Rep. SBAA094, Jun. 2003.

### Data on authors

- |                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>Aleksey S. Anuchin</b>   | — Dr. Sci., Associate Professor; Moscow Power Engineering Institute, Department of Automated Electric Drive; Head of the Department; E-mail: anuchin.alecksey@gmail.com |
| <b>Galina L. Demidova</b>   | — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: demidova@itmo.ru   |
| <b>Evgeny O. Stolyarov</b>  | — Student; Moscow Power Engineering Institute, Department of Automated Electric Drive; E-mail: stolyarovevgen@mail.ru   |
| <b>Alexander A. Zharkov</b> | — PhD; Moscow Power Engineering Institute, Department of Automated Electric Drive; E-mail: ZharkovAA@mpei.ru  |
| <b>Dimid K. Surnin</b>      | — Student; Moscow Power Engineering Institute, Department of Automated Electric Drive; E-mail: dimidsurnin@gmail.com  |
| <b>Fernando Briz</b>        | — PhD, Professor; University of Oviedo, Department of Electrical Engineering, Electronics, Computing and Systems Engineering; E-mail: fernando@isa.uniovi.es            |

**For citation:** Anuchin A. S., Demidova G. L., Stolyarov E. O., Zharkov A. A., Surnin D. K., Briz F. Study of current regulation processes in electric drives with shunt sensors and delta-sigma signal modulation. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 10. P. 897—906 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-10-897-906