
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.3.07
DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-8-711-719

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОИЗВОДНОЙ ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕЛЬТА-СИГМА-МОДУЛЯТОРА ДЛЯ БЕЗДАТЧИКОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

А. С. Анучин¹, Е. О. Столяров¹, А. А. Жарков¹, Д. К. Сурнин¹,
Г. Л. Демидова², Ю. Вагапов³

¹Национальный исследовательский университет „МЭИ“, 111250, Москва, Россия

²Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: demidova@itmo.ru

³Университет Глиндор, Уэльс, Великобритания

Рассматривается метод прямого измерения производной тока, необходимого для определения индуктивностей в электрических двигателях в целях надежного и эффективного бездатчикового управления электроприводами переменного тока. Метод основан на измерении падения напряжения на калиброванной катушке индуктивности, установленной непосредственно в силовой цепи преобразователя. Для повышения точности и снижения влияния переходных процессов и помех при измерении падения напряжения используется дельта-сигма-модулятор. Приведены результаты экспериментальных исследований трех различных конструкций индуктивных измерительных шунтов.

Ключевые слова: производная тока, электропривод, бездатчиковое управление, дельта-сигма-модулятор, индуктивный шунт

Введение. В последнее десятилетие особое внимание было обращено к бездатчиковым системам управления промышленными и тяговыми электроприводами переменного тока. Разработано большое количество методов бездатчикового управления в целях повышения эффективности и надежности самосенсорных систем управления различными электрическими машинами, такими как синхронный двигатель с постоянными магнитами [1, 2], асинхронный двигатель [3], вентильно-индукторные двигатели [4, 5]. Эти методы основаны на определении положения ротора путем анализа отношений измеренных индуктивностей по продольной и поперечной осям d и q . Корректное определение положения ротора играет ключевую роль в бездатчиковых системах векторного управления [6] или прямого управления моментом.

Существует несколько методов измерения индуктивности для оценки положения ротора. Один из самых простых способов заключается в инъекции высокочастотной составляющей в питающее напряжение и считывании отклика тока статора. Инъекция кругового годографа напряжения вызывает отклик в виде эллиптического годографа тока статора. Недостаток данного метода состоит в том, что инъекция высокочастотной составляющей напряжения приводит к пульсации момента и возникновению дополнительных звуковых эффектов. Другой недостаток такого способа связан с увеличением действующего и амплитудного значений

токов, приводящих к уменьшению КПД работы двигателя и преобразователя. Для решения указанных проблем авторами настоящей статьи предлагается использовать вместо отдельного инжектируемого сигнала непосредственно сам сигнал широтно-импульсной модуляции, служащий для управления инвертором. Каждое из состояний ключей инвертора соответствует определенным векторам напряжения, прикладываемым к обмоткам двигателя. Реакция токов на прикладываемые векторы напряжений может быть использована для вычисления индуктивностей и определения положения ротора [7, 8].

Для вычисления индуктивностей требуется измерение производной тока, которая может быть получена следующими способами:

- измерение тока и вычисление производной программным методом [9, 10];
- измерение тока и вычисление производной путем аппаратного дифференцирования [11];
- прямое измерение производной тока [12].

Для вычисления производной тока способом, предложенным в работах [9, 10], используется метод наименьших квадратов. Однако в данном случае необходимо большое количество последовательных измерений тока для достижения высокой точности вычисления производной, что требует значительных вычислительных ресурсов; данный способ может быть реализован, например, на программируемой логической матрице (ПЛМ). В работе [11] описывается способ, при котором ток, измеряемый с помощью датчика на основе эффекта Холла компенсационного типа, обрабатывается специальной цепью дифференцирования на операционных усилителях. Однако авторы [11] не предоставляют экспериментальных результатов работы с ШИМ-инвертором напряжения (возможно из-за высокой восприимчивости цепи измерения к помехам).

Способ прямого измерения производной тока предложен в [12]. Датчики Холла преобразовывают ток первичной цепи в ток вторичной цепи. В нормальных условиях работы преобразованный ток вторичной цепи пропускают через измерительное сопротивление. Если во вторичную цепь вместо сопротивления подключить катушку индуктивности, то падение напряжения на катушке будет пропорционально производной тока первичной цепи датчика. Основным недостатком данного способа — активное сопротивление у катушки индуктивности, влияющее на общее измеряемое падение напряжения, которое нужно компенсировать. Кроме того, возможна температурная нестабильность этого сопротивления. Другой недостаток — наличие колебательных процессов, возникающих каждый раз, когда инвертор меняет свое состояние. Эти колебания могут быть демпфированы с помощью RC -снаббера.

Для того чтобы увеличить точность измерения производной тока предлагается использовать калиброванную катушку индуктивности, подключаемую непосредственно в силовую цепь инвертора. Падение напряжения на катушке индуктивности, пропорциональной производной тока, измеряется с помощью дельта-сигма-модулятора [13]. Настоящая статья посвящена реализации данного способа измерения и оценке его точности.

Измерение производной тока с помощью дельта-сигма-модулятора. Для исключения недостатков описываемого в работе [12] способа прямого измерения производной тока предлагается установить катушку индуктивности непосредственно в силовую цепь и с помощью нее измерять производную тока.

Падение напряжения на катушке может быть измерено с использованием микросхемы дельта-сигма-модулятора. В настоящее время дельта-сигма-модуляторы производятся несколькими компаниями; в ходе эксперимента использован АМС1305 фирмы “Texas Instruments” [14]. Итак, осуществляется модуляция входного сигнала и на выходе формируется гальванически развязанный сигнал — битовый поток, передаваемый в систему управления. Демодуляция битового потока может быть осуществлена с помощью специальных периферийных блоков современных микроконтроллеров или с помощью ПЛМ. Схема предлагаемого решения приведена на рис. 1.

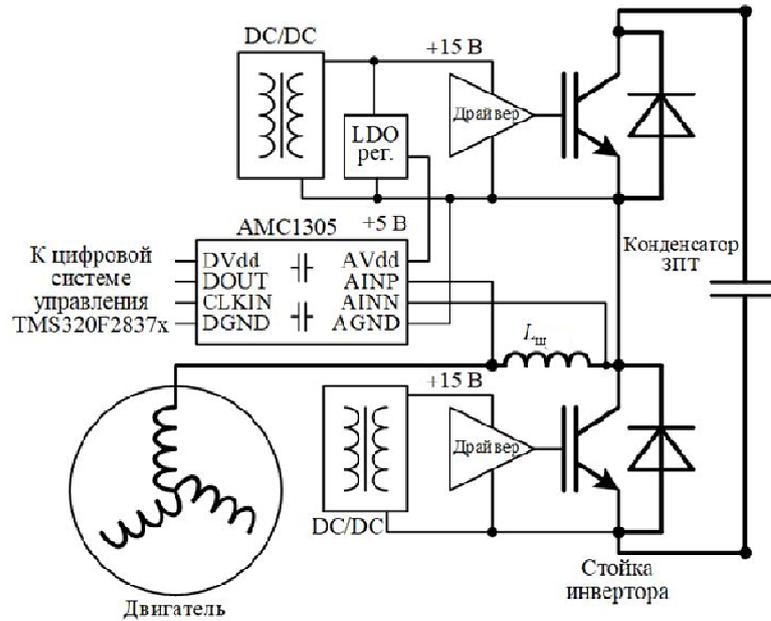


Рис. 1

Битовый поток должен быть отфильтрован фильтром низких частот для демодуляции. Как правило, используются Sinc-фильтры различных порядков. В общем случае Sinc-фильтр первого порядка представляет собой фильтр скользящего среднего с передаточной функцией в виде фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ) [15]:

$$H(z) = \frac{1}{N} \left(1 + z^{-1} + z^{-2} + \dots + z^{-(N-1)} \right), \quad (1)$$

где z — оператор временного сдвига, N — коэффициент передискретизации или число битов передаваемого сигнала, которые используются в фильтре.

Последовательное соединение КИХ-фильтров увеличивает точность демодулированного сигнала благодаря извлечению дополнительной информации из частоты смены битов в битовом потоке [13]. Два Sinc-фильтра, соединенные последовательно, формируют Sinc2-фильтр, три фильтра, соединенные последовательно, — Sinc3-фильтр.

Обычно диапазон входных значений напряжения микросхем составляет ± 50 или ± 250 мВ. Поэтому падение напряжения на индуктивном шунте $L_{ш}$ не должно превышать эти допустимые границы:

$$U_{ш \max} = L_{ш} \frac{di}{dt}. \quad (2)$$

При заданных максимальной межфазной индуктивности ($L_{м-ф \max}$) и максимальном напряжении звена постоянного тока ($U_{ЗПТ \max}$) индуктивность шунта может быть определена из следующего уравнения:

$$L_{ш} = L_{м-ф \max} \frac{U_{ш \max}}{2U_{ЗПТ \max}},$$

где падение напряжения на шунте всегда должно быть в диапазоне $\pm U_{ш \max}$, даже в наихудшем случае, когда напряжение противо-ЭДС машины равно напряжению звена постоянного тока и они суммируются. Уравнение (2) также используется для вычисления производной тока.

Результаты эксперимента. Схема экспериментального стенда приведена на рис. 2. Преобразователь частоты состоит из диодного моста-выпрямителя, конденсатора ЗПТ, трехфазного 6-ключевого инвертора и системы управления на основе микроконтроллера TMS320F28377D. К двум фазам инвертора подключена катушка с индуктивностью 6 мГн.

Регулятор тока системы управления работает на частоте 4 кГц и создает пилообразный ток в катушке. Благодаря пилообразной форме тока анализ процессов в цепи измерения производной тока упрощается.

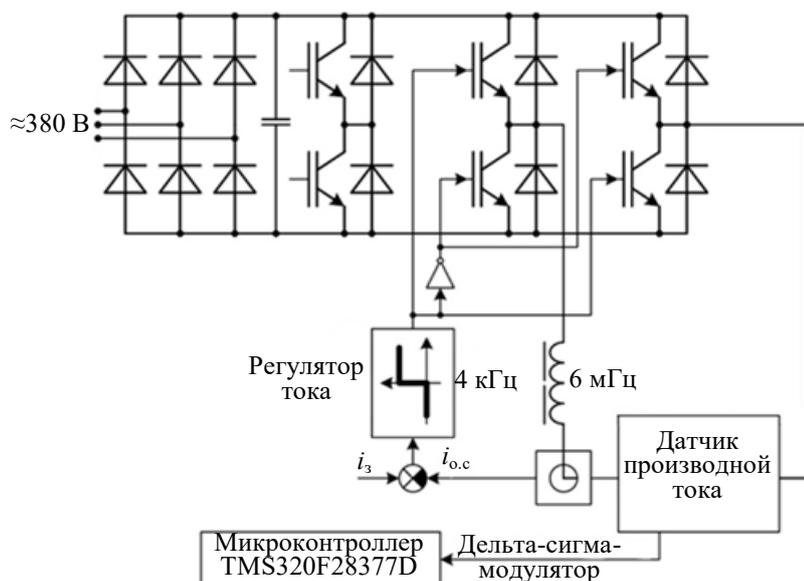


Рис. 2

Преобразователь частоты имеет встроенный датчик Холла. Последовательно к датчику подключена цепь измерения производной тока, состоящая из индуктивного шунта и микросхемы дельта-сигма-модулятора, расположенных на отдельной печатной плате, как показано на рис. 3. Выходной сигнал дельта-сигма-модулятора, т.е. битовый поток, передается на микроконтроллер для демодуляции и обработки.

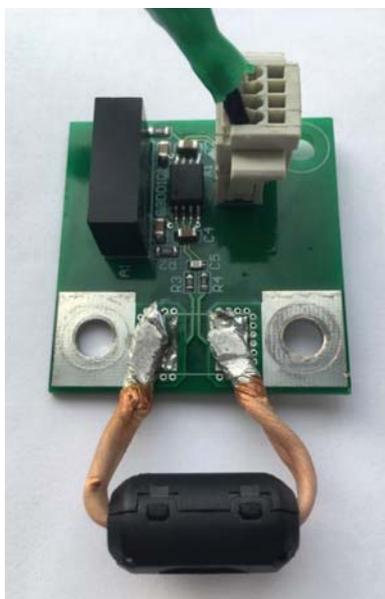


Рис. 3

Эксперименты проводились для трех различных конструкций индуктивного шунта:

- 1) одновитковая катушка в виде 25-сантиметрового многожильного провода без сердечника;
- 2) одновитковая катушка в виде 6-сантиметрового многожильного провода с ферритовым сердечником;
- 3) 6-сантиметровый высокочастотный многожильный провод литцендрат с ферритовой шайбой (см. рис. 3).

Система управления силового преобразователя генерирует одинаковую пилообразную форму тока (показана на рис. 4) для всех конструкций шунта.

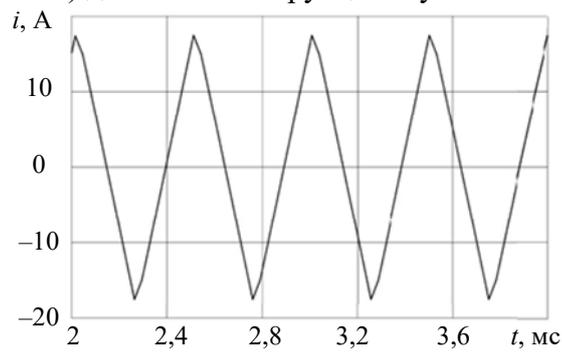


Рис. 4

Сигнал производной тока получен при использовании коэффициента передискретизации $N=16$ и цифрового фильтра типа Sinc3. Результаты для различных конструкций индуктивного шунта представлены на рис. 5.

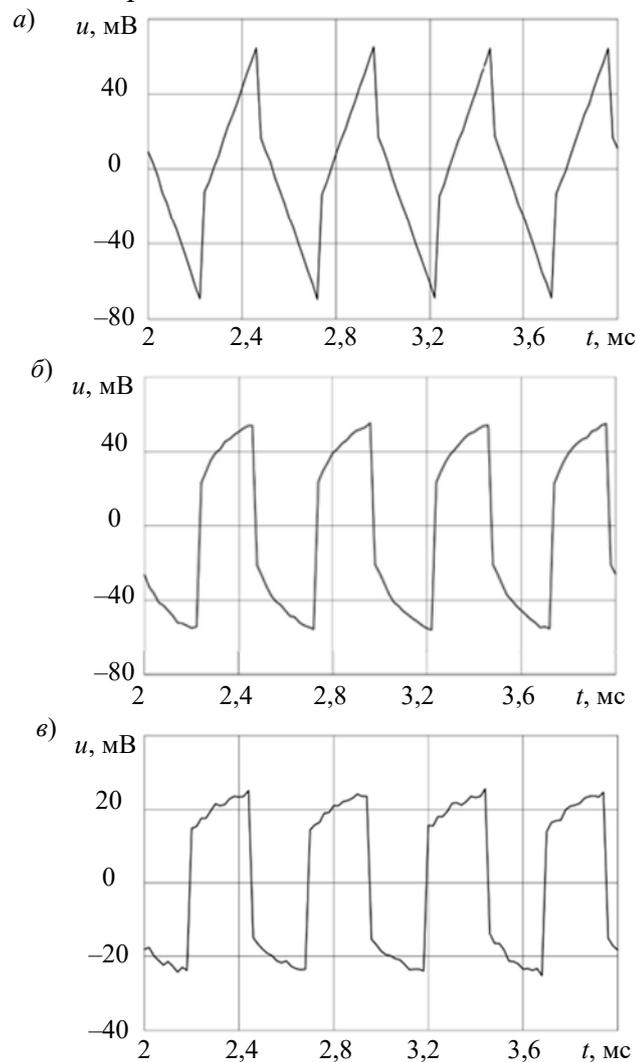


Рис. 5

Эксперимент, проведенный для первой конструкции (рис. 5, а), показывает, что сопротивление многожильного провода относительно велико и может оказывать значительное влияние на выходное напряжение. Поскольку падение напряжения на активном сопротивлении сравнимо с измеряемым сигналом, программная компенсация внесет дополнительную погрешность.

Во втором эксперименте провод был укорочен примерно до 6 см. Для того чтобы компенсировать уменьшение индуктивности из-за меньшей длины провода в катушке, на провод был дополнительно установлен ферритовый сердечник. Производная тока легче определяется на графике выходного сигнала (см. рис. 5, б), однако форма сигнала говорит о том, что сопротивление индуктивного шунта меняется с течением времени из-за эффекта вытеснения тока.

Для уменьшения влияния эффекта вытеснения тока в третьем эксперименте многожильный провод был заменен на специальный высокочастотный провод литцендрат. Как видно из рис. 5, в, сопротивление шунта по-прежнему влияет на результат измерения, при этом падение напряжения на сопротивлении составляет около 9,5 мВ. Значение сопротивления шунта $R_{L_{\text{ш}}} = 0,220$ мОм. При пиковом токе $i_{\text{max}} = 17,5$ А положительной или отрицательной полярности теоретическое падение напряжения должно составлять

$$\Delta u = 2R_{L_{\text{ш}}}i_{\text{max}} = 2 \cdot 0,22 \cdot 17,5 = 7,7 \text{ мВ.}$$

Расчитанное падение напряжения оказывается меньше измеренного примерно на 1,8 мВ. Разница между ними объясняется тем же скин-эффектом, что и на рис. 5, б. Однако эта разница намного меньше, поскольку поверхностный эффект в используемом проводе возникает только на его концах в местах пайки к печатной плате.

Падение напряжения на сопротивлении, наблюдаемое в третьем эксперименте, в дальнейшем может быть уменьшено путем доработки конструкции датчика или программной компенсации с использованием специального алгоритма в функции от протекающего тока. Что касается поверхностного эффекта, то его влияние можно нивелировать посредством оптимизации конструкции соединения высокочастотных проводов с печатной платой.

Заключение. Предложенное решение позволяет обеспечить прямое измерение производной тока, которое может быть применимо в бездатчиковых системах управления промышленными и тяговыми электроприводами.

Датчик тока имеет малые габариты и стоимость и обеспечивает высокую устойчивость к помехам благодаря использованию дельта-сигма-модуляции при измерении падения напряжения.

Измеряемый ШИМ-сигнал не имеет переходных процессов и колебаний, что позволяет использовать его как инжектируемый сигнал для бездатчиковых систем управления двигателями переменного тока.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jarzębowski L. Sensorless IPMSM drive with rotor position estimator based on analysis of phase current derivatives // Proc. IEEE Intern. Symp. on Industrial Electronics, Gdansk, Poland, 27—30 June 2011. P. 733—738.
2. Foo G., Xian Z., Maskell D. L., Vilathgamuwa D. M. Sensorless direct torque control of interior permanent magnet synchronous motor drives using the current derivative approach // Proc. IEEE Symp. on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED), Sydney, Australia, 7—8 June 2015. P. 1—6.
3. Brando G., Dannier A., Del Pizzo A., Rizzo R., Spina I. Torque derivative control in induction motor drives supplied by multilevel inverters // IET Power Electronics. 2016. Vol. 9, N 11. P. 2249—2261.
4. Lashkevich M., Anuchin A., Aliamkin D., Briz F. Investigation of self-sensing rotor position estimation methods for synchronous homopolar motor in traction applications // Proc. of the 43rd Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Society IECON-2017, Beijing, China, 29 Oct.—1 Nov. 2017. P. 8225—8229.
5. Aliamkin D., Anuchin A., Lashkevich M., Briz F. Sensorless control of two-phase switched reluctance drive in the whole speed range // Proc. of the 42nd Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Society IECON-2016, Florence, Italy, 23—26 Oct. 2016. P. 2917—2922.

6. *Schroedl M.* Sensorless control of AC machines at low speed and standstill based on the INFORM method // Proc. of the 31st IEEE Annual Meeting of Industry Applications Conf. IAS 96, San Diego, CA, USA, 6—10 Oct. 1996. Vol. 1. P. 270—277.
7. *Bui M. X., Guan D. Q., Xiao D., Rahman M. F.* Sensorless control of interior permanent magnet synchronous motor based on the fundamental pulse width modulation excitation over a wide speed range // Proc. of the 19th Intern. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiba, Japan, 13—16 Nov. 2016. P. 1—6.
8. *Hua Y., Sumner M., Asher G., Gao Q.* Sensorless control for a PM machine with reduced current distortion using space vector PWM excitation // Proc. of the 13th European Conf. on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain, 8—10 Sept. 2009. P. 1—10.
9. *Bui M. X., Guan D., Xiao D., Rahman M. F.* A modified sensorless control scheme for interior permanent magnet synchronous motor over zero to rated speed range using current derivative measurements // IEEE Transact. on Industrial Electronics. 2018. DOI: 10.1109/TIE.2018.2823663.
10. *Duan Y., Sumner M.* A novel current derivative measurement using recursive least square algorithms for sensorless control of permanent magnet synchronous machine // Proc. of the 7th Intern. Power Electronics and Motion Control Conf., Harbin, China, 2—5 June 2012. Vol. 2. P. 1193—1200.
11. *Liu C., Yi H., Liu J.-G., Zhang Q.* A novel method for measuring current derivative signal with closed loop Hall-effect current sensor // Proc. Intern. Conf. for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, PCIM Europe 2015, Nuremberg, Germany, 19—20 May 2015. P. 1—8.
12. *Anuchin A., Zharkov A., Shpak D., Aliamkin D., Vagapov Y.* Current derivative measurement using closed-loop Hall-effect current sensor // Proc. of the 9th IET Intern. Conf. on Power Electronics, Machines and Drives, PEMD-2018, Liverpool, UK, 17—19 Apr. 2018. P. 1—5.
13. *Anuchin A., Surnin D., Lashkevich M.* Accuracy analysis of shunt current sensing by means of delta-sigma modulation in electric drives // Proc. of the 17th Intern. Ural Conf. on AC Electric Drives (ACED), Ekaterinburg, Russia, 26—30 March 2018. P. 1—5.
14. AMC1305x Small, High-Precision, Reinforced Isolated Delta-Sigma Modulators: Datasheet SBAS654F. Texas Instruments, TX, USA, June 2014, Rev. March 2017.
15. *Oljaca M., Hendrick T.* Combining the ADS1202 with an FPGA digital filter for current measurement in motor control applications: Application Rep. SBAA094. Texas Instruments, Dallas, TX, USA, June 2003.

Сведения об авторах

- Алексей Сергеевич Анучин** — д-р техн. наук, доцент; НИУ „МЭИ“, кафедра автоматизированного электропривода; заведующий кафедрой; E-mail: anuchin.alecksey@gmail.com
- Евгений Олегович Столяров** — студент; НИУ „МЭИ“, кафедра автоматизированного электропривода; E-mail: stolyarovevgen@mail.ru
- Александр Александрович Жарков** — канд. техн. наук; НИУ „МЭИ“, кафедра автоматизированного электропривода; E-mail: ZharkovAA@mpei.ru
- Димид Константинович Сурнин** — студент; НИУ „МЭИ“, кафедра автоматизированного электропривода; E-mail: dimidsurnin@gmail.com
- Галина Львовна Демидова** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; факультет компьютерных технологий и управления; E-mail: demidova@itmo.ru
- Юрий Вагапов** — канд. техн. наук; Университет Глиндор, кафедра прикладных наук, вычислительной техники и инженерии; E-mail: y.vagapov@glyndwr.ac.uk

Поступила в редакцию
29.06.2020 г.

Ссылка для цитирования: Анучин А. С., Столяров Е. О., Жарков А. А., Сурнин Д. К., Демидова Г. Л., Вагапов Ю. Измерение производной тока с использованием дельта-сигма-модулятора для бездатчикового управления тяговым электроприводом // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 8. С. 711—719.

MEASURING THE DERIVATIVE OF CURRENT USING A DELTA-SIGMA MODULATOR FOR SENSORLESS CONTROL OF A TRACTION ELECTRIC DRIVE

A. S. Anuchin¹, E. O. Stolyarov¹, A. A. Zharkov¹, D. K. Surnin¹, G. L. Demidova², Yu. Vagapov³

¹Moscow Power Engineering Institute, 111250, Moscow, Russia

²ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: demidova@itmo.ru

³Glyndwr University, Wales, United Kingdom

A method of direct measurement of the derivative of current necessary to determine the inductances in electric motors for reliable and efficient operation of sensorless control in AC electric drives is considered. The method is based on measuring the voltage drop across a calibrated inductance installed directly in the converter power circuit. To improve the method accuracy and reduce the effects of transients and interference, a delta-sigma modulator is used to measure the voltage drop. Experimental results obtained for three different inductive measuring shunts are presented.

Keywords: derivative of current, electric drive, sensorless control, delta-sigma modulator, inductive shunt

REFERENCES

1. Jarzębowski L. *Proc. 2011 IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics*, Gdansk, Poland, 27–30 June 2011, pp. 733–738.
2. Foo G., Xinan Z., Maskell D.L., and Vilathgamuwa D.M. *Proc. 2015 IEEE Symp. on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED)*, Sydney, Australia, 7–8 June 2015, pp. 1–6.
3. Brando G., Dannier A., Del Pizzo A., Rizzo R., and Spina I. *IET Power Electronics*, 2016, no. 11(9), pp. 2249–2261.
4. Lashkevich M., Anuchin A., Aliamkin D., and Briz F. *Proc. 43rd Annu. Conf. IEEE Industrial Electronics Society IECON-2017*, Beijing, China, 29 Oct.–1 Nov. 2017, pp. 8225–8229.
5. Aliamkin D., Anuchin A., Lashkevich M., and Briz F. *Proc. 42nd Annu. Conf. IEEE Industrial Electronics Society IECON-2016*, Florence, Italy, 23–26 Oct. 2016, pp. 2917–2922.
6. Schroedl M. *Proc. 31st IEEE Annu. Meeting Industry Applications Conf. IAS 96*, San Diego, CA, USA, 6–10 Oct. 1996, vol. 1, pp. 270–277.
7. Bui M.X., Guan D.Q., Xiao D., and Rahman M.F. *Proc. 19th Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Chiba, Japan, 13–16 Nov. 2016, pp. 1–6.
8. Hua Y., Sumner M., Asher G., and Gao Q. *Proc. 13th European Conf. on Power Electronics and Applications*, Barcelona, Spain, 8–10 Sept. 2009, pp. 1–10.
9. Bui M.X., Guan D., Xiao D., and Rahman M.F. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2018. DOI: 10.1109/TIE.2018.2823663.
10. Duan Y., and Sumner M. *Proc. 7th Int. Power Electronics and Motion Control Conf.*, Harbin, China, 2–5 June 2012, vol. 2, pp. 1193–1200.
11. Liu C., Yi H., Liu J.-G., and Zhang Q. *Proc. Int. Conf. for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management PCIM Europe 2015*, Nuremberg, Germany, 19–20 May 2015, pp. 1–8.
12. Anuchin A., Zharkov A., Shpak D., Aliamkin D., and Vagapov Y. *Proc. 9th IET Int. Conf. on Power Electronics, Machines and Drives PEMD-2018*, Liverpool, UK, 17–19 April 2018, pp. 1–5.
13. Anuchin A., Surnin D., and Lashkevich M. *Proc. 17th Int. Ural Conf. on AC Electric Drives (ACED)*, Ekaterinburg, Russia, 26–30 March 2018, pp. 1–5.
14. *AMC1305x Small, High-Precision, Reinforced Isolated Delta-Sigma Modulators*, Texas Instruments, TX, USA, Datasheet SBAS654F, June 2014, Rev. March 2017.
15. Oljaca M., and Hendrick T. *Combining the ADS1202 with an FPGA digital filter for current measurement in motor control applications*, Texas Instruments, Dallas, TX, USA, Application Rep. SBAA094, June 2003.

Data on authors

- | | |
|-----------------------------|--|
| Alexey S. Anuchin | — Dr. Sci., Associate Professor; Moscow Power Engineering Institute, Department of Electric Drives; Head of the Department; E-mail: anuchin.alecksey@gmail.com |
| Evgeny O. Stolyarov | — Student; Moscow Power Engineering Institute, Department of Electric Drives; E-mail: stolyarovevgen@mail.ru |
| Alexander A. Zharkov | — PhD; Moscow Power Engineering Institute, Department of Electric Drives; E-mail: ZharkovAA@mpei.ru |
| Dimid K. Surnin | — Student; Moscow Power Engineering Institute, Department of Electric Drives; E-mail: dimidsurnin@gmail.com |
| Galina L. Demidova | — PhD; ITMO University, Faculty of Control System and Robotics; E-mail: demidova@itmo.ru |

Yuriy Vagapov

— PhD; Glyndwr University, School of Applied Science, Computing and Engineering; E-mail: y.vagapov@glyndwr.ac.uk

For citation: Anuchin A. S., Stolyarov E. O., Zharkov A. A., Surnin D. K., Demidova G. L., Vagapov Yu. Measuring the derivative of current using a delta-sigma modulator for sensorless control of a traction electric drive. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 8. P. 711—719 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-8-711-719