

УДК 621.3

PACS: 07.50.Ek

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-110-116

EDN: OPDMHQ



Алгоритм работы системы управления двунаправленного инверторного привода СДПМ в составе гибридного летательного аппарата с распределённой силовой установкой

А. Н. Варюхин, М. В. Гордин, А. В. Дутов, Я. Е. Жарков, А. Л. Козлов,
С. И. Мошкунов, В. Ю. Хомич

Произведено формирование облика системы управления двунаправленного инверторного привода синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ). Приведённая система позволяет осуществлять управление электродвигателем как в режиме генерации крутящего момента, так и в режиме рекуперации мощности, обеспечивая высокую эффективность работы и безопасность функционирования СДПМ в обоих случаях.

Ключевые слова: двунаправленный инверторный привод, синхронный двигатель с постоянными магнитами, система управления, двигательный режим, рекуперативный режим.

Введение

Интенсивное развитие вычислительной техники и микропроцессоров, получившее старт в конце прошлого века, открыло возможности быстрого и детального проектирования электрических устройств, позволяя оптимизировать их конструкцию, а также применять комплексные системы управления для обеспечения их максимальной функциональности. Данная тенденция также коснулась и области проектирования электродвигателей различного типа, и, в частности, синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ),

позволяя создавать легковесные и компактные машины, которые нашли широкое применение в современной автомобильной технике из-за высоких рабочих характеристик.

В настоящее время совершенствование конструкции и масса-габаритных показателей электрических устройств и двигателей [1–4] открывает возможность их применения также и в авиационной технике, в частности, возможность создания гибридного электрического летательного аппарата, в котором двигатель внутреннего сгорания обеспечивает генерацию электроэнергии, которая может быть накоплена в аккумуляторных батареях и использована

Варюхин Антон Николаевич¹, зам. ген. директора, к.т.н.
Гордин Михаил Валерьевич², ректор, к.т.н.
Дутов Андрей Владимирович³, ген. директор, д.т.н.
Жарков Ярослав Евгеньевич⁴, м.н.с.
Козлов Андрей Львович¹, ген. директор.
Мошкунов Сергей Игоревич⁴, рук. направления, д.т.н.,
член-корр. РАН.

E-mail: serg-moshkunov@yandex.ru

Хомич Владислав Юрьевич⁴, научный руководитель,
д.ф.-м.н., академик РАН.

¹ ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова».

Россия, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2.

² Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, улица 2-я Бауманская, 5, к. 1.

E-mail: bauman@bmstu.ru

³ ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Институт имени Н. Е. Жуковского».

Россия, 125319, Москва, ул. Викторенко, 7.

E-mail: info@nrczh.ru

⁴ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.

Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18.

Статья поступила в редакцию 14.07.2023

После доработки 31.07.2023

Принята к публикации 10.08.2023

© Варюхин А. Н., Гордин М. В., Дутов А. В., Жарков Я. Е.,
Козлов А. Л., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., 2023

для осуществления электрической тяги, генерируемой СДПМ. Одним из ключевых устройств, осуществляющее питания СДПМ, является инверторный преобразователь, формирующий ток на обмотках статора СДПМ. Современные инверторные устройства, применяемые в авиации, имеют отставание характеристик от устройств, применяемых в автомобилях. Это обосновывается повышенными отраслевыми требованиями к надёжности применяемых в преобразователях элементной базы: используемые компоненты должны обладать устойчивостью к быстрым перепадам температур и давления, обладать электромагнитной совместимостью с иной бортовой аппаратурой. Данные требования приводят к ухудшению масса-габаритных показателей из-за применения дополнительных элементов в устройстве инвертора, таких как фильтрующие цепочки и радиаторов системы охлаждения, что негативно сказывается на предельной дальности полёта гибридного электрического летательного аппарата.

Одним из способов повысить масса-мощностные показатели пары устройств «СДПМ–инверторный привод» является применение эффективных алгоритмов системы управления, позволяющими увеличить общее КПД электрического узла. В случае СДПМ, согласно [5], максимальная эффективность работы двигателя достигается при применении полеориентированного управления (ПОУ, FOC), обеспечивающего возможность достижения высокого КПД (свыше 95 %) работы электрической системы. Дополнительным способом увеличить дальность полёта гибридного летательного аппарата является применение алгоритмов рекуперации механической энергии вращения ротора в тех случаях, когда момент на валу ротора СДПМ избыточен, например, в случаях посадки или снижения высоты полёта.

Формирование системы управления с применением как двигательных, так и рекуперативных алгоритмов, позволяющими добиться высокого КПД работы устройства, безопасной работы СДПМ и, как следствие, увеличение дальности полёта является целью настоящей работы.

Алгоритм работы двунаправленного инверторного привода электродвигателя в двигательном режиме

На рис. 1 приведена блок-схема системы управления (СУ) инверторного привода в двигательном режиме. Она содержит схематические изображения аккумуляторной батареи – АБ, полупроводниковой части инвертора, синхронного двигателя с постоянными магнитами – СДПМ, а также блока управления, реализующего формирование сигнала управления фазными коммутаторами инвертора. Условные обозначения на рис. 1 включают: U_{DC} – напряжение шины постоянного тока; v_{dq} и i_{dq} – опорные сигналы токов и напряжений в системе координат $d-q$; I_ϕ – вектор фазных токов; ω и θ – механическая частота вращения ротора СДПМ и угол его расположения (прим. индексом e обозначены электрические параметры); $\bar{\omega}$ – опорный сигнал угловой частоты вращения.

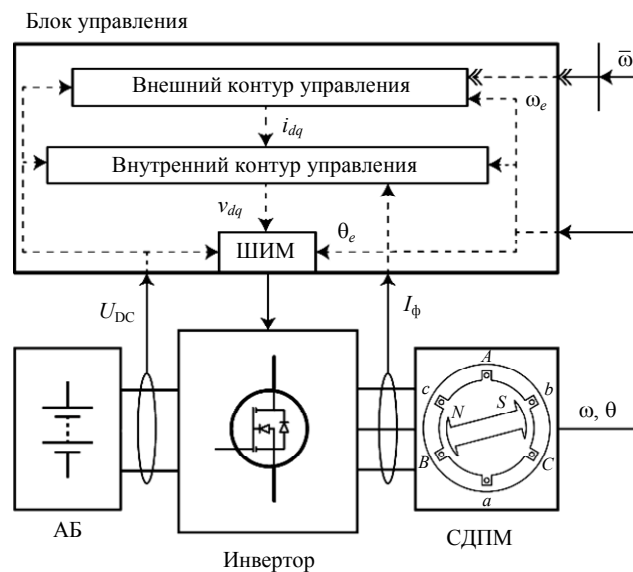


Рис. 1. Блок-схема СУ инверторного привода в двигательном режиме

Работу блока управления можно описать следующими этапами: 1) формирование опорного токового сигнала i_{dq} с применением преобразования Кларк-Парка на базе математической модели управляемого СДПМ; 2) генерация опорного сигнала напряжения v_{dq} с использованием полученного вектора тока i_{dq} ;

3) приведение сигнала v_{dq} в фазную систему координат СДПМ с применением обратного преобразования Кларк-Парка, генерация коммутационных сигналов затворов транзисторов в составе инвертора с применением векторной ШИМ.

На первом этапе регистрируемые датчиками сигналы постоянного напряжения U_{DC} на АК, фазных токов СДПМ I_ϕ , угловой скорости ω СДПМ поступают на внешний контур управления, принцип действия которого проиллюстрирован блок-схемой на рис. 2.

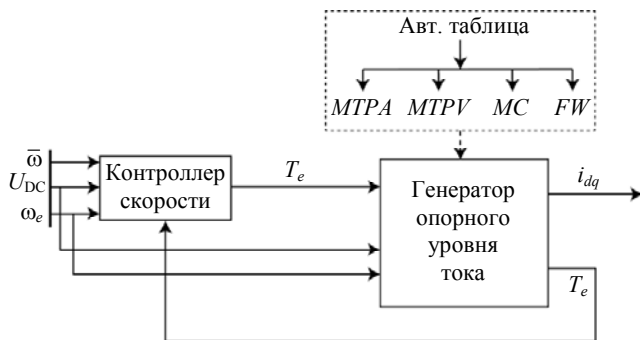


Рис. 2. Блок-схема внешнего контура управления

Согласно приведённому изображению, генерация опорного токового сигнала происходит на базе текущего значения электрической частоты ω_e и значения крутящего момента T_e , и может быть реализована с применением алгоритмов полеориентированного (ПОУ) управления [6–10]: генерация опорного сигнала происходит с применением предварительно сгенерированных таблиц на основе алгоритмов, таких как: *MTPA* – достижение максимального соотношения крутящего момента к току питания), *MC* – ограничение максимального тока, *MTPV* – достижение максимального соотношения крутящего момента к питающему напряжению, *FW* – режим ослабления поля. Приведённые алгоритмы управления позволяют обеспечить безопасную и эффективную работу СДПМ в широком диапазоне частоты вращения ротора. Недостатком данного способа генерации опорного сигнала является высокая вычислительная нагрузка на

микропроцессорное устройство, тем не менее, текущий уровень развития микропроцессорных устройств позволяет реализовать данные принципы на практике.

Значения крутящего момента T_e вычисляется посредством использования контроллера скорости (дискретный фильтр), который может быть описан *P-PI* дискретным регулятором

$$T_e = \frac{\left(K_{pw} + K_{iw} \frac{T_s}{z-1} \right) (\bar{\omega} - \omega) - K_{aw} z^{-1} T_{e,s}}{1 - K_{aw} z^{-1}}, \quad (1)$$

где K_{pw} , K_{iw} – коэффициенты пропорциональной и интегрирующей составляющей фильтра, K_{aw} – коэффициент цикла сброса; T_s – период дискретизации; $T_{e,s}$ – момент насыщения. Использование *PI*-регулирования приводит к появлению нуля в передаточной функции замкнутого контура, что может привести к нежелательному «проскакиванию» в отклике замкнутого контура. Этот нуль может быть нивелирован путем введения блока отмены нуля (*Zero-Cancellation*) в контур обратной связи. Передаточная функция дискретного фильтра отмены нуля в дискретном времени имеет вид

$$G_{ZC,w} = \frac{T_s K_{iw} / K_{pw}}{z + (T_s - K_{iw} / K_{pw}) / K_{iw} / K_{pw}}. \quad (2)$$

Принцип работы внутреннего контура управления может быть проиллюстрирован посредством блок-схемы, приведённой на рис. 3. Приведённая блок-схема состоит из блока, включающего преобразование Кларк-Парка $abc \rightarrow dq$, блока предварительного управления с опережением, блока ограничителя напряжения; двух блоков *PI*-регулирования: $PI(Z), id$ и $PI(Z), iq$ для отклонения фазных токов от опорного уровня i_{dq} , а также блока компенсации нуля $G_{ZC,idq}$ опорного токового сигнала. Работа блоков *PI*-регулирования и $G_{ZC,idq}$ описывается выражениями, аналогичными 1 и 2.

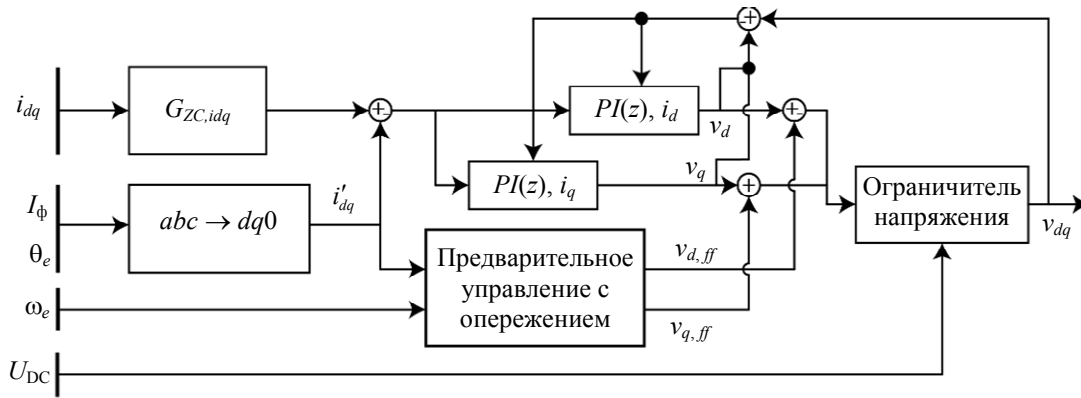


Рис. 3. Блок-схема внутреннего контура управления

На первом этапе из вектор опорного тока i_{dq} , пройдя фильтр $G_{ZC, idq}$, вычитается вектор токовых сигналов i'_{dq} , полученного с помощью преобразования Кларк-Парка из вектора фазных токов I_ϕ . Данная ошибка поступает на дискретный P - PI регулятор, коэффициенты которого отличаются для каждого из токов в системе координат d - q . Единновременно с этим, сигнал i'_{dq} поступает на блок предварительного управления с опережением, описываемый выражениями

$$\begin{cases} v_{d, ff} = -\omega_e L_q i_q, \\ v_{q, ff} = \omega_e (L_d i_d + \Psi_{pm}), \end{cases}$$

где L_d и L_q – значение индуктивностей по осям, Ψ_{pm} – потокосцепление с постоянными магнитами. На втором этапе, сигнал v_{dq} , полученный после прохождения P - PI регулятора, комбинируется с сигналом $v_{dq, ff}$ и поступает на блок ограничителя напряжения, назначение которого – ограничение нормы вектора $\|v_{dq} \pm v_{dq, ff}\|$ ниже значения $U_{DC}/\sqrt{3}$. Алгоритм работы блока можно описать посредством выражения

$$\begin{aligned} v_{d, s} &= \min(\max(v_{d, u}, -U_{d, \max}), U_{d, \max}), \\ v_{q, s} &= \min(\max(v_{q, u}, -U_{q, \max}), U_{q, \max}), \end{aligned} \quad (3)$$

$$U_{d, \max} = \frac{U_{DC} |v_{d, u}|}{\sqrt{3} \sqrt{v_{d, u}^2 + v_{q, u}^2}}, \quad U_{q, \max} = \frac{U_{DC} |v_{q, u}|}{\sqrt{3} \sqrt{v_{d, u}^2 + v_{q, u}^2}},$$

где индексами u и s обозначены значения напряжений с отсутствием ограничения и ограниченные значения соответственно. После прохождения блока ограничителя напряжения сигнал напряжения в осях d - q , преобразуется в фазные напряжения с применением обратного

преобразования Кларк-Парка и подаётся на блок векторного ШИМ для формирования управляющих сигналов коммутаторов в составе инвертора.

Алгоритм работы двунаправленного инверторного привода электродвигателя в смешенном режиме

Принцип рекуперативного управления, приведённый в [10–12], базируется на анализе полной электрической мощности системы СДПМ в системе координат d - q , которая представлена выражением

$$P_e = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q). \quad (4)$$

Обеспечение работы в смешенном режиме, т. е. с использованием инвертора как в двигательном режиме, так и в режиме рекуперации, может быть осуществлено посредством добавления в систему управления в двигательном режиме дополнительного алгоритма. Исходя из рассмотренного выше принципа регулировки в двигательном режиме, добавление дополнительного алгоритма, отвечающего за рекуперацию, должно быть произведено во внешних контурах, т. к. он осуществляет генерацию опорных сигналов тока в системе d - q .

Согласно [12], подставляя токи i_{dq} в систему уравнений СДПМ в координатах d - q и решая задачу оптимизации относительно момента P_e , возможно получить зависимость момента вращения как функцию от электрической угловой скорости для максимальной рекуперированной мощности в случаях совпадающих и отличающихся индуктивностей по осям

$$T_{e,MRPP}(\omega_e) = -\frac{3\psi_{pm}^2 n_p \omega_e}{8R} \Big|_{L_d=L_q}$$

$$T_{e,MRPP}(\omega_e) = -\frac{3\psi_{pm}^2 n_p \omega_e}{8R} \frac{\left(\frac{R}{L_d - L_q}\right)^4}{\left(\omega_e - \frac{R}{L_d - L_q}\right)^2 \left(\omega_e + \frac{R}{L_d - L_q}\right)^2} \Big|_{L_d \neq L_q} \quad (5)$$

где n_p – количество пар полюсов, R – значение активного сопротивления обмоток статора.

Из характера выражения (5) для случая отличающихся индуктивностей по осям видно, что выражение стремится к бесконечности при значениях угловой скорости, равной $\pm R / (L_d - L_q)$ и лимитирует применимость принципа рекуперации диапазоном скоростей $\omega_e \in [-R / (L_d - L_q); R / (L_d - L_q)]$, т. к. только на заданном интервале отражает физический смысл рекуперативного торможения. Помимо рассмотренного ограничения, следует учитывать также и пределы безопасного функционирования СДПМ, обусловленных механической конструкцией устройства – предельного момента вращения. На рис. 4а приведены иллюстрации к диапазонам функционирования двигателя в режиме рекуперации для случаев совпадающих и отличающихся индуктивностей по осям.

На приведенном изображении синим выделены области работы СДПМ в режиме рекуперации. Величины ω_{max} и ω'_{max} соответствуют предельной скорости работы в режиме рекуперации, а T_{sat} и T'_{sat} – предельные значения момента вращения, обусловленные конструкцией СДПМ. Кривыми красного цвета обозначение совокупности точек в пространстве $\omega - T_e$, соответствующие максимальной мощности рекуперации. Параметры ω_{max} и ω'_{max} могут быть получены посредством подстановки величин T_{sat} и T'_{sat} в выражения (5).

Принимая во внимания всё вышесказанное, интеграция режима рекуперации в работу внешнего контура управления может быть осуществлена посредством внесения в таблицу управления дополнительной области *RB* (*Regenerative Breaking*), опорные точки для которой могут быть получены согласно выражениям выражения (5) с учётом ограничений, проиллюстрированных на рис. 5б.

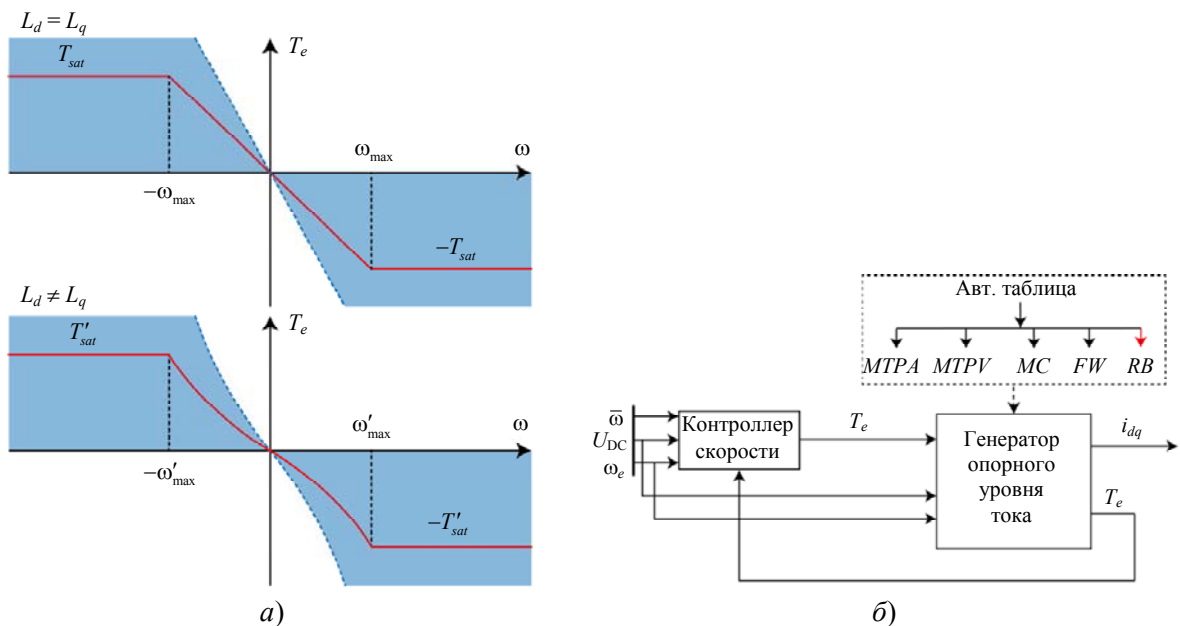


Рис. 4. Области рекуперативного торможения и оптимальные траектории (а) и интеграция рекуперативного торможения в систему управления (б)

Заключение

В работе произведено формирование алгоритма системы управления двунаправленного инверторного привода СДПМ в составе гибридного летательного аппарата с распределённой силовой установкой.

Сформированная архитектура системы управления силовой электроникой состоит из двух контуров: внутреннего и внешнего контура управления. Задачей внешнего контура управления является генерация опорного тока сигнала в пространстве $d-q$, которая реализуется посредством использования алгоритмов полеориентированного управления, функционирующих на базе математической модели СДПМ и обеспечивающих оптимальность работы двигателя без превышения его предельных параметров функционирования. Внешний контур управления служит для генерации сигнала напряжения в системе $d-q$ с использованием алгоритмов предварительного управления с опережением и нескольких P - PI регуляторов, которые обеспечивают генерацию опорного сигнала напряжения без превышения уровня напряжения на DC -шине распределённой силовой установки.

Последовательность работы системы управления СДПМ в двигательном режиме дополнена рекуперативным алгоритмом, позволяющим наиболее полно отбирать механическую энергию вращения ротора двигателя. Интеграция режима рекуперации в работу системы управления двунаправленного инвертора осуществляется без внесения изменений в общую архитектуру алгоритма и производится

за счёт дополнения данных, на базе которых функционирует алгоритм, что позволяет универсализировать способ управления, уменьшить количество исполняемого программного кода и снизить нагрузку на микропроцессорное устройство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варюхин А. Н., Гордин М. В., Дутов А. В. и др. / Прикладная физика. 2023. № 2. С. 109–116. EDN: XCUMDA
2. Варюхин А. Н., Гордин М. В., Дутов А. В. и др. / Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11. № 2. С. 155–166. EDN: OZFUJK
3. Варюхин А. Н., Гордин М. В., Дутов А. В. и др. / Электричество. 2021. № 8. С. 4–12. EDN: SBSSSR
4. Алешин Б. С., Дутов А. В., Мошкунев С. И., Хомич В. Ю. / Электричество. 2023. № 2. С. 4–12. EDN: SBQLLN
5. Bida V. M., Samokhvalov D. V., Al-Mahturi F. S. / Proc. 2018 IEEE Conf. Russ. Young Res. Electr. Electron. Eng. ElConRus 2018. 2018. Vol. 2018-Janua. № VVC. P. 577–581.
6. Morimoto S., Sanada M., Takeda Y. / IEEE Trans. Ind. Appl. 1994. Vol. 30. № 4. P. 920–926.
7. Liu C. / IEEE Trans. Energy Convers. 2018. Vol. 33. № 4. P. 2270–2280.
8. Lutonin A., Shklyarskiy A., Shklyarskiy Y. / E3S Web Conf. 2019. Vol. 140. P. 10006.
9. Sepulchre L. et al. / IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. № 6. P. 6081–6089. doi: 10.1109/TIA.2018.2856841
10. Deng Y., Foo S. Y., Bhattacharya I. / IEEE SOUTHEASTCON. 2014. doi: 10.1109/secon.2014.6950713
11. Lu D. et al. / Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng. 2014. Vol. 228. № 8. С. 894–908.
12. Choo K. M., Won C. Y. / IEEE Transactions on Power Electronics. 2020. Vol. 35. № 12. P. 13308–13321.

Algorithm of operation of the control system of the bidirectional inverter drive SDPM of a hybrid aircraft with a distributed power supply

*A. N. Varyukhin, M. V. Gordin, A. V. Dutov, Ya. E. Zharkov, A. L. Kozlov,
S. I. Moshkunov and V. Yu. Khomich*

¹ FSUE “CIAM named after P. I. Baranov”
2 Aviamotornaya st., Moscow, 111116, Russia

² Moscow Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Bauman Moscow State Technical University”
5/1 Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia

³ National research center «Institute named after N. E. Zhukovsky»
7 Viktorenko st., Moscow, 125319, Russia

⁴ Institute for Electrophysics and Electric Power RAS
18 Dvortsovaya nab., St.-Petersburg, 191186, Russia
E-mail: serg-moshkunov@yandex.ru

Received 14.07.2023; revised 31.07.2023; accepted 10.08.2023

In this paper, a control system for a bi-directional inverter drive for a permanent magnet synchronous motor (PMS) has been designed. The given system allows to control the electric motor both in torque generation mode and in power recovery mode, providing high efficiency of operation and safety of SPM functioning in both cases.

Keywords: bidirectional inverter drive, permanent magnet synchronous motor, control system, motoring mode, regenerative mode.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-110-116

REFERENCES

1. Varyukhin A., Gordin M., Dutov A. et al., Applied Physics, № 2, 109–116 (2023) [in Russian]. EDN: XCUMDA
2. Varyukhin A., Gordin M., Dutov A. et al., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **11** (2), 155–166 (2023) [in Russian]. EDN: OZFUJK.
3. Varyukhin A., Gordin M., Dutov A. et al., The Electricity Journal **8**, 4–12 (2021). EDN: SBSSSR
4. Alyoshin B. S., Dutov A. V., Moshkunov S. I. and Khomich V. Yu., The Electricity Journal **2**, 4–12 (2023). doi: 10.24160/0013-5380-2023-2-4-12. EDN: SBQLLN
5. Bida V. M., Samokhvalov D. V. and Al-Mahturi F. S., Proc. 2018 IEEE Conf. Russ. Young Res. Electr. Electron. Eng. ElConRus 2018. **2018-Janua.** (VVC), 577–581 (2018).
6. Morimoto S., Sanada M. and Takeda Y., IEEE Trans. Ind. Appl. **30** (4), 920–926 (1994).
7. Liu C., IEEE Trans. Energy Convers **33** (4), 2270–2280 (2018).
8. Lutonin A., Shklyarskiy A. and Shklyarskiy Y., E3S Web Conf. **140**, 10006 (2019).
9. Sepulchre L. et al., IEEE Transactions on Industry Applications **54** (6), 6081–6089 (2018). doi: 10.1109/TIA.2018.2856841
10. Deng Y., Foo S. Y. and Bhattacharya I., IEEE SOUTHEASTCON (2014). doi: 10.1109/secon.2014.6950713
11. Lu D. et al., Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng. **228** (8), 894–908 (2014).
12. Choo K. M. and Won C. Y., IEEE Transactions on Power Electronics **35** (12), 13308–13321 (2020).