

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-2-72-78

УДК 62-83:621

А. С. КОВАЛЬ, канд. техн. наук, доц.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

К ВОПРОСУ ЗАМЕНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА РОТОРЕ (СДПМ) ОСЛАБЛЕНИЕМ ПОТОКА НА ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Аннотация

На основе структурной схемы частотно-регулируемого электропривода с реализацией регулирования скорости синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) с поверхностным расположением магнитов на роторе двигателя выше номинальной за счет ослабления потока синхронного двигателя выполнен сравнительный анализ и показана целесообразность замены регулирования скорости ослаблением потока на частотное регулирование с использованием повышающего DC/DC-преобразователя в цепи постоянного тока.

Ключевые слова:

синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ), ослабление потока, регулирование скорости, составляющие тока статора, графики изменения момента, скорости, тока и потока, DC/DC-преобразователь.

Для цитирования:

Коваль, А. С. К вопросу замены регулирования скорости синхронного двигателя с постоянными магнитами на роторе (СДПМ) ослаблением потока на частотное регулирование / А. С. Коваль // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 2 (91). – С. 72–78.

В практике систем регулируемого электропривода переменного тока частотное регулирование скорости вниз от номинальной с соответствующим уменьшением напряжения и частоты от номинальных значений рассматривается как основной режим регулирования скорости [1]. При частотном двухзонном регулировании (регулирование с постоянством мощности) тепловой режим работы двигателя при увеличении скорости вверх от номинальной обеспечивается за счет снижения нагрузки при сохранении на двигателе номинального напряжения [1].

При регулировании частоты напряжения на двигателе вверх от номи-

нальной возможно обеспечить потребляемый ток двигателя не выше номинального при сохранении нагрузки на валу двигателя за счет соответствующего с частотой увеличения напряжения на двигателе [2]. Увеличение напряжения на выходе преобразователя частоты с инвертором напряжения затруднено при фиксированном и ограниченном напряжении питающей сети на входе выпрямителя, формирующего напряжение цепи постоянного тока. Возможно более значимое увеличение напряжения на статоре двигателя при использовании повышающих DC/DC-преобразователей постоянного тока в цепи питания инвертора напряжения [3]. Возможность ра-

боты двигателя при скорости выше номинальной за счет увеличения частоты и напряжения преобразователя частоты интересна для синхронных двигателей с постоянными магнитами на роторе (СДПМ), т. к. позволяет в определенном диапазоне регулирования частоты вращения заменить режим регулирования частоты вращения ослаблением потока на частотное регулирование. При этом существенно уменьшается потребляемый двигателем ток из-за отсутствия

размагничивающей составляющей тока при увеличении скорости выше номинальной.

Оценим возможный ток низкоскоростного высокомоментного синхронного двигателя с постоянными магнитами на поверхности ротора (табл. 1) для обеспечения, например, увеличения частоты вращения идеального холостого хода при номинальной частоте на 20 % за счет ослабления потока двигателя.

Табл.1. Расчетные параметры СДПМ

J , кг·м	R , Ом	M , Н·м	I , А	P , Вт	L , Гн	Ψ , Вб	Ω , с ⁻¹	p_n	$I_{1к}$, А
132	0,652	710	12,4	3400	0,033	4,87	4,88	15	582,82

Ослабление магнитного потока двигателя обеспечивается формированием продольно-размагничивающей реакции якоря отрицательной составляющей тока I_d при формировании опережающего угла управления между вектором напряжения на двигателе и составляющей тока статора I_q в осях $d-q$ [4]. Для обеспечения увеличения частоты вращения идеального холостого хода на 20 % может быть рассчитан этот необходимый угол управления и, соответственно, определен необходимый для этого ток [4].

Необходимый опережающий угол управления определяется [4] как

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\gamma_0}{\sqrt{1 + \gamma_0^2 \cdot \varepsilon^2}} \right) - \arctg \left(\frac{1}{\gamma_0 \varepsilon} \right), \quad (1)$$

где γ_0 – относительное увеличение частоты вращения идеального холостого хода; ε – коэффициент, рассчитывается следующим образом:

$$\varepsilon = \omega_{0ном} \cdot \tau.$$

Относительное значение постоянной времени

$$\tau = p_n \cdot T_1 = 15 \cdot 0,051 = 0,765,$$

где p_n – число пар полюсов; T_1 – электромагнитная постоянная времени,

$$T_1 = \frac{0,033}{0,652} = 0,051 \text{ с.}$$

Соответственно коэффициент $\varepsilon = 6,663 \cdot 0,621 = 4,117$.

Необходимый опережающий угол

$$\theta = \arcsin \left(\frac{1,2}{1 + 1,2^2 \cdot 4,12^2} \right) - \arctg \left(\frac{1}{1,2 \cdot 4,12} \right) = 1,871^\circ.$$

Относительное значение размагничивающего тока [4]

$$i_{1d} = i_k \cdot \left\{ \frac{\varepsilon [\cos \theta_{эл} - (1 - K_1) \cdot \gamma]}{1 + \varepsilon^2 \cdot \gamma^2} - \sin \theta_{эл} \right\},$$

где $i_k = \frac{I_{1к}}{I_{1ном}} = \frac{582,82}{12,4} = 47.$

Коэффициент K_1 определяется [4] как

$$K_1 = \tau \cdot \omega_{ном} \cdot \sin \theta_{эл} = \\ = 0,765 \cdot 6,63 \cdot 0,0327 = 0,1658.$$

Соответственно

$$i_{1d} = 47 \cdot \left\{ \frac{4,117[0,9994 - (1 - 0,17) \cdot 1,2]}{1 + 4,117^2 \cdot 1,2^2} - \right. \\ \left. - 0,0327 \right\} = -1,56.$$

Или в абсолютных значениях этот ток $I_d = 12,4 \cdot (-1,56) = -19,4$ А.

Проекция тока статора по оси q для этого случая $i_{1q} = 0$.

Полный ток статора в относительных единицах $i_1 = 1,56$.

В абсолютных значениях $I_1 = 1,56 \cdot 12,4 = 19,3$ А.

При падении скорости, например, на 10 % при этом опережающем угле за счет роста соответствующей нагрузки составляющая тока

$$i_{1d} = 47 \cdot \left\{ \frac{4,117[0,9994 - (1 - 0,17) \cdot 1,1]}{1 + 4,117^2 \cdot 1,1^2} - \right. \\ \left. - 0,0327 \right\} = -0,756.$$

Соответственно

$$i_{1q} = 47 \cdot \frac{0,9994 - (1 - 0,17) \cdot 1,1}{1 + 4,117^2 \cdot 1,1^2} = 0,18.$$

Относительный ток статора $i_1 = \sqrt{0,756^2 + 0,18^2} = 0,78$.

В абсолютных значениях $I_1 = 0,78 \cdot 12,4 = 9,67$ А.

Таким образом, для рассматриваемого СДПМ увеличение частоты вращения идеального холостого хода на 20 % за счет ослабления потока и последующее изменение скорости на 10 %

при набросе нагрузки, равном $0,18M_{ном}$, сопровождается изменением тока двигателя в диапазоне $(1,56...0,78)I_{ном}$. Дальнейший рост нагрузки приводит к нарушению теплового баланса работы двигателя, что ограничивает характером нагрузки возможный реализуемый данным способом диапазон регулирования скорости привода.

Как было отмечено ранее, увеличение напряжения на двигателе с ростом частоты выше номинальной при частотном регулировании может быть обеспечено использованием повышающего DC/DC-преобразователя постоянного напряжения. Функциональная схема силовой части преобразователя частоты частотно-регулируемого электропривода на базе СДПМ с поверхностным расположением постоянных магнитов на роторе и с возможностью регулирования напряжения в звене постоянного тока за счет использования повышающего DC/DC-преобразователя постоянного тока в звене постоянного тока показана на рис. 1 [6].

Модель этого привода на базе двигателя (см. табл. 1) с возможностью ослабления магнитного потока двигателя за счет отрицательной составляющей тока I_d при формировании опережающего угла управления в осях d - q представлена на рис. 2 [4]. Эта же модель реализует частотное регулирование скорости при пропорциональном увеличении напряжения на двигателе вместе с частотой при отсутствии продольной размагничивающей реакции якоря (составляющая тока статора $I_d = 0$). Результаты моделирования работы электропривода представлены на рис. 3–10.

СДПМ в режиме частотного регулирования при увеличении частоты формируемого напряжения выше номинальной и набросе нагрузки ($M_{ст} = 0,18M_{ном}$) потребляет существенно меньший ток ($I_1 = 1,5$ А, см. рис. 10) в сравнении с реализацией этого режима работы за счет ослабления потока машины ($I_1 = 13,04$ А, см. рис. 6).

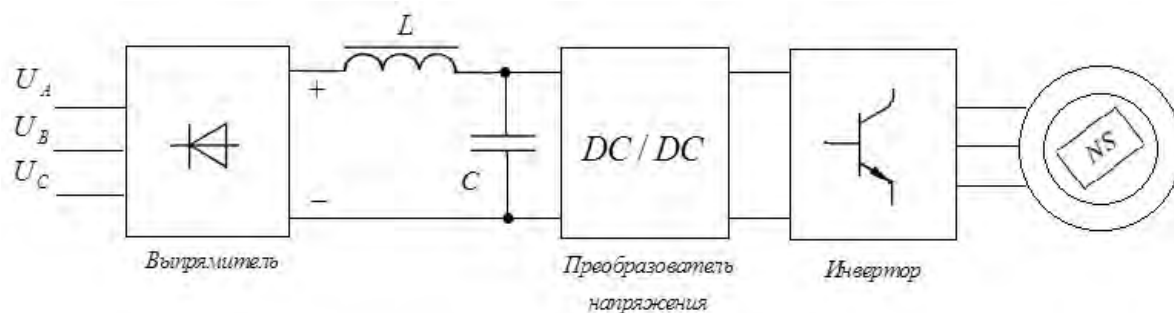


Рис. 1. Функциональная схема силовой части электропривода с использованием DC/DC-преобразователя

Такая замена способов регулирования для получения скорости выше номинальной целесообразна для СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе, у которых номинальная частота определена при номинальном напряжении, значительно меньшем возможного максимального напряжения в цепи постоянного тока инвертора напряжения. Например, это лифтовые низкоскоростные высокомоментные синхронные двигатели с постоянными магнитами на роторе, используемые в безредукторных лебедках пассажирских лифтов и имеющие номинальную скорость вращения вала при номинальных частотах, значительно меньших 50 Гц. При линейном напряжении питающей сети 400 В и напряжении в звене постоянного тока 540 В использование дополнительно повышающего DC/DC-преобразователя с возможностью увеличения напряжения в звене постоянного тока, например, до 1000 В позволяет в этом случае реализовать частотное регулирование с увеличением частоты до 50 Гц, т. е. существенно увеличить диапазон регулирования скорости двигателя и, соответственно, возможную скорость перемещения кабины лифта при сохранении загрузки кабины лифта.

Заключение

Использование повышающего DC/DC-преобразователя постоянного тока в звене постоянного тока преобразователя частоты с инвертором напряжения с возможностью повышения напряжения на шине постоянного тока, например, для СДПМ с номинальной частотой меньше 50 Гц при номинальном напряжении (высокомоментные низкооборотные лифтовые СДПМ) позволяет использовать частотное регулирование скорости для увеличения скорости выше номинальной вместо регулирования ослаблением потока. Показано, что работа двигателя при увеличении частоты вращения идеального холостого хода на 20 % за счет ослабления потока и набросе нагрузки ($M_{ст} = 0,18M_{ном}$) сопровождается увеличением тока до $1,05I_{ном}$. При частотном регулировании с пропорциональным увеличением напряжения на двигателе в этом случае ток двигателя в 8 раз меньше. Такая замена в частотно-регулируемом электроприводе, например, с СДПМ и поверхностным расположением магнитов на роторе существенно расширяет возможности электропривода.

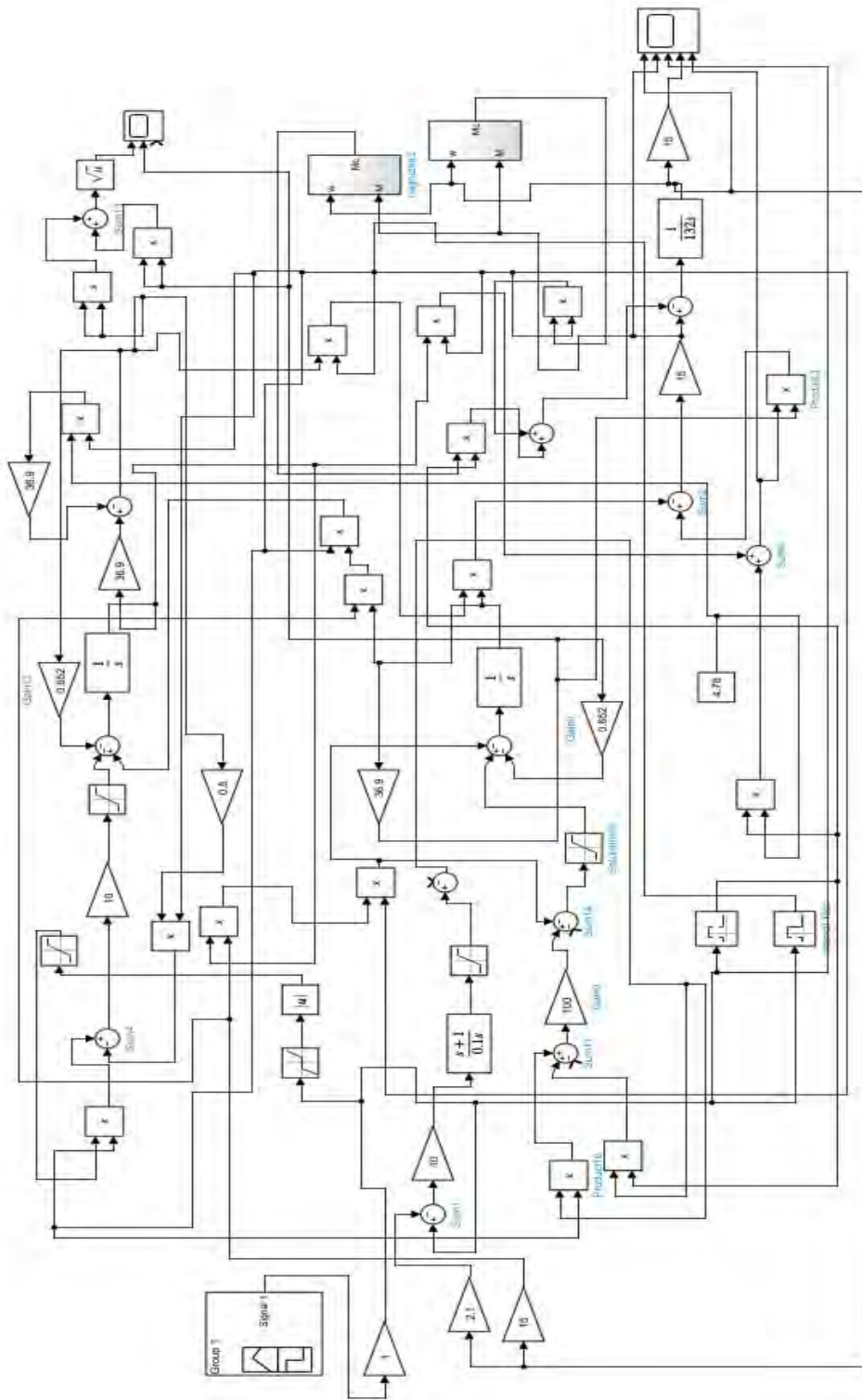


Рис. 2. Модель электропривода с возможностью ослабления потока

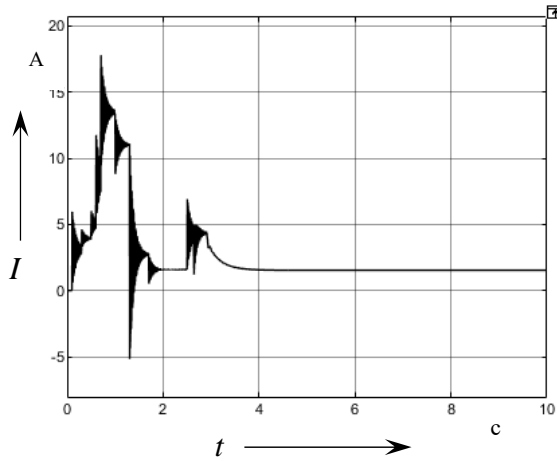


Рис. 3. Ток I_q при опережающем угле $1,871^\circ$ и $M_{ст} = 0,18M_{ном}$

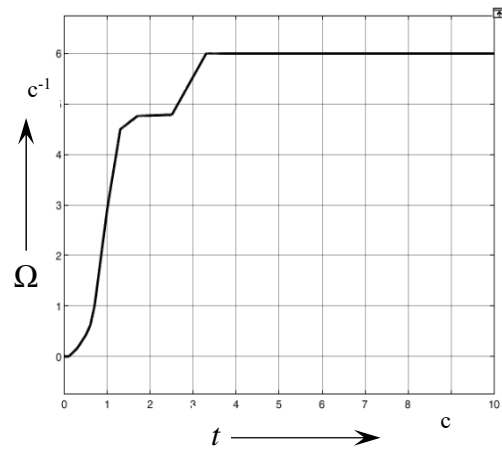


Рис. 4. Тахограмма задания скорости

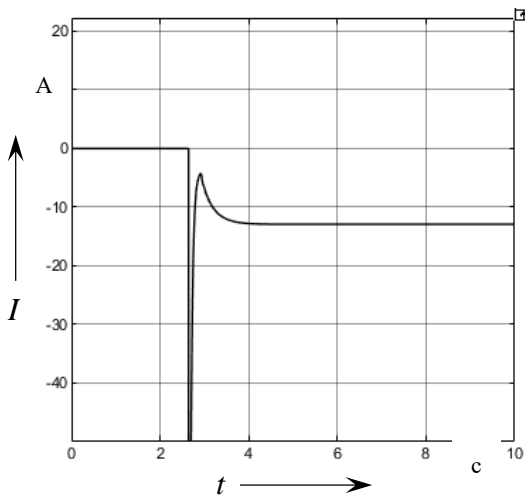


Рис. 5. Ток I_d при опережающем угле $1,871^\circ$ и $M_{ст} = 0,18M_{ном}$

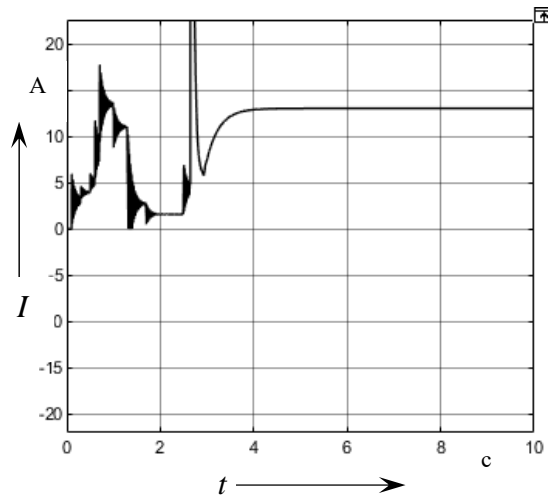


Рис. 6. Ток I_1 при опережающем угле $1,871^\circ$ и $M_{ст} = 0,18M_{ном}$

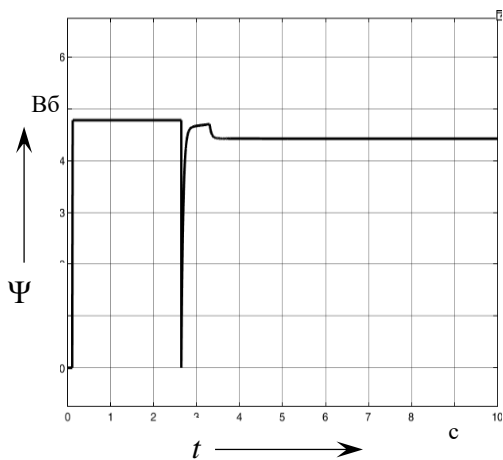


Рис. 7. Потокосцепление при увеличении скорости на 20 % и опережающем угле $1,871^\circ$

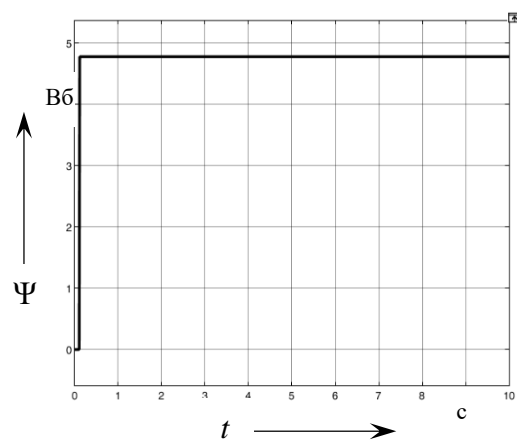
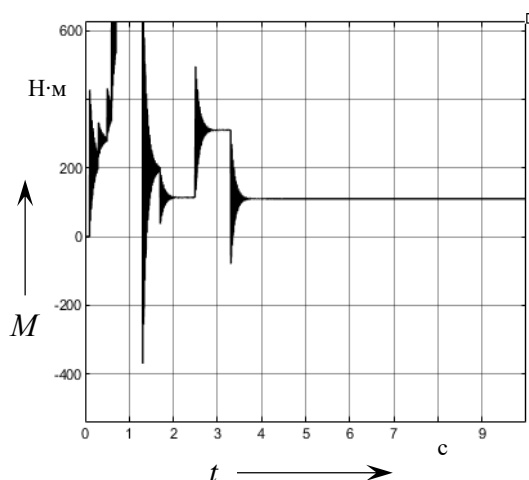
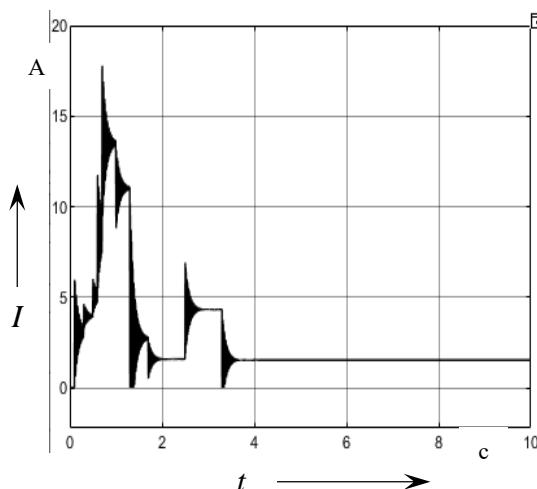


Рис. 8. Потокосцепление при частотном регулировании скорости

Рис. 9. Момент нагрузки привода $M_{ct} = 0,18M_{ном}$ Рис. 10. Ток I_1 при частотном регулировании и нагрузке $M_{ct} = 0,18M_{ном}$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Мн. : Техноперспектива, 2007. – 585 с.
2. **Булгаков, А. А.** Частотное управление асинхронными двигателями / А. А. Булгаков. – М. : АН СССР, 1965.
3. **Анучин, А. С.** Системы управления электроприводов / А. С. Анучин. – М. : МЭИ, 2015. – 373 с.
4. **Фираго, Б. И.** Векторные системы управления электроприводами / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. – Мн. : Выш. шк., 2016. – 159 с.
5. **Коваль, А. С.** Модель электропривода на базе СДПМ с поверхностным расположением магнитов на роторе и регулированием потока / А. С. Коваль, В. С. Яшин, А. И. Артеменко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2019. – № 3. – С. 121–129.
6. **Kichiro Yamamoto.** Characteristics of Permanent-Magnet Synchronous Motor Driven by PWM Inverter With Voltage Booster / Kichiro Yamamoto, Katsuji Shinohara, Takahiro Nagahama // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 2004. – Vol. 40, № 4.

Статья сдана в редакцию 27 марта 2026 года

Контакты:

eriapubru@gmail.com (Коваль Александр Сергеевич).

A. S. KOVAL

REPLACING SPEED CONTROL VIA FLUX WEAKENING IN A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR (PMSM) WITH VARIABLE FREQUENCY CONTROL

Abstract

Based on the block diagram of a variable-frequency drive, implementing speed control of a surface-mounted permanent magnet synchronous motor (SPMSM) above the rated speed through flux weakening, a comparative analysis was performed, demonstrating the feasibility of replacing flux-weakening speed control with variable-frequency control using a step-up DC/DC converter in the DC link.

Keywords:

permanent magnet synchronous motor (PMSM), flux weakening, speed control, stator current components, torque, speed, current, and flux curves, DC/DC converter.

For citation:

Koval, A. S. Replacing speed control via flux weakening in a permanent magnet synchronous motor (PMSM) with variable frequency control / A. S. Koval // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2026. – № 2 (91). – P. 72–78.