

2. Воробьев, А. М. Сценарий и механизмы создания ЕИП ракетно-космической промышленности. Электронный архив технической документации как основа ЕИП / [А. М. Воробьев и др.] // CADmaster. – 2010. – №5.
3. Ершова, Т. Б. Организационные аспекты создания единого информационного пространства предприятия / Т. Б. Ершова // Транспортное дело России. – 2009. – № 2. – С. 56–57.
4. Измайлов, И. А. Проектирование многоагентных систем в управлении сетевыми ресурсами предприятия / И. А. Измайлов, Е. А. Бахтенко, А. А. Сукончиков // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы VII Межд. науч.-техн. конф. – Вологда, 2012. – С. 66–70.
5. Кабанов, А. Г. Основные направления и результаты работ по применению CALS-технологий для повышения качества и конкурентоспособности военной продукции / [А. Г. Кабанов и др.] // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2000. – № 2. – С. 3–6.
6. Концепция формирования и развития единого информационного пространства России и соответствующих

государственных информационных ресурсов // Информационное общество. – М., 1995. – № 4. – С. 22–24.

7. Судов, Е. В. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России / [Е. В. Судов и др.] // НИЦ CALS- технологий «Прикладная логистика». – 2002.

8. Сукончиков, А. А. Спирально-адаптивная схема жизненного цикла информационной системы / А. А. Сукончиков, Д. А. Малышев // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы VI Межд. НТК. – Вологда, 2010. – Т. 1. – С. 187–189.

9. Сукончиков, А. А. Масштабирование параллельных систем / А. А. Сукончиков, Д. А. Яковлев // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2011. – №2. – С. 66–69.

10. Сукончиков, А. А. Обобщенная модель системы ситуационного интеллектуально-агентного моделирования / А. А. Сукончиков, Д. А. Яковлев // Информационно-управляющие системы. – 2010. – Т. 45. – №2. – С. 9–14.

УДК 621.314.1

Б. Ю. Васильев

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В статье основное внимание сконцентрировано на системе управления автономным инвертором двухзвенного преобразователя частоты на основе алгоритма пространственно-векторной модуляции и методах повышения его эффективности. Рассмотрен метод повышения эффективности за счет угловой дифференциации пространственной плоскости. Исследована эффективность предложенного метода.

Электропривод, преобразователь частоты, автономный инвертор, пространственно-векторная модуляция, угловая дифференциация.

In the paper the main focus is on the control system of the inverter of the frequency converter based on the algorithm of space vector modulation and the methods of improving efficiency of the control system. The method of improving the efficiency is considered through angular differentiation. The efficiency of the proposed method is studied in the paper.

Electrical drive, frequency converter, inverter, space-vector modulation, angular differentiation.

Введение.

Силовые активные полупроводниковые преобразователи (АПП), которые выполнены на основе полностью управляемых полупроводниковых приборах (транзисторах или тиристорах), используются в различных электротехнических комплексах и системах [1], [2], [6], [7], [8]. Например, в источниках электроэнергии на основе ветроэнергетических установок и солнечных энергоустановок активные полупроводниковые преобразователи используются для стабилизации частоты и амплитуды выходного напряжения. В сетях электроснабжения используются активные фильтры для компенсации высших гармоник и повышения коэффициента мощности.

Основная часть.

Наиболее широкое применение АПП нашли в электроприводах переменного тока (ЭПТ). В современных ЭПТ используются АПП типа активный выпрямитель (АВ) и автономный инвертор (АИ) для электроснабжения и управления режимами работ приводных электродвигателей. Структурная схема электропривода приведена на рис. 1.

Эффективность функционирования электротехнических комплексов и систем с АПП в значительной степени определяется эффективностью его управления. В данной статье описаны и исследованы методы повышения эффективности АПП энергии путем модернизации пространственно-векторной системы управления, которые используются в промышленных ЭПТ и других приложениях (рис. 1) [3], [5], [10], [11].

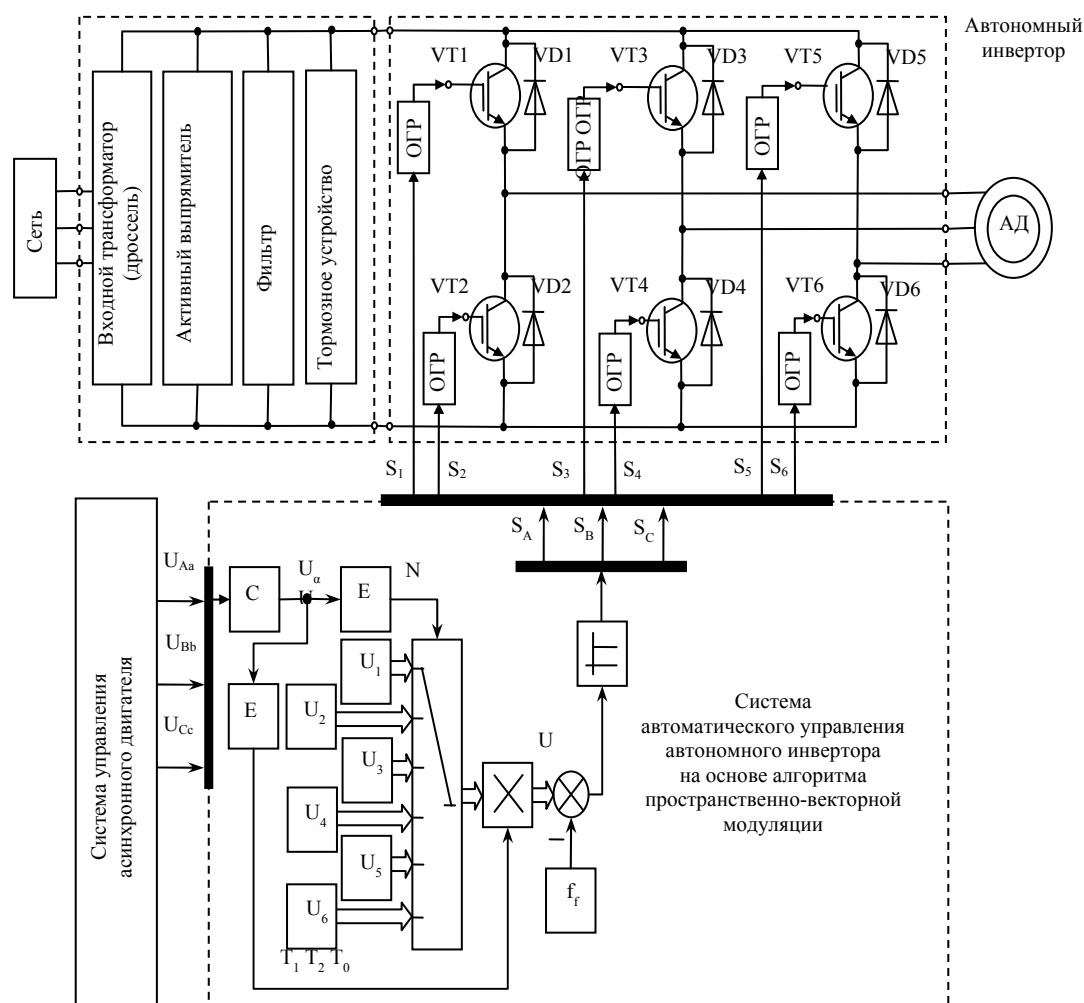


Рис. 1. Структурная схема электропривода с пространственно-векторным алгоритмом управления автономным инвертором

Алгоритм пространственно-векторной модуляции. В современных АИ для управления полупроводниковыми ключами широко используется алгоритм пространственно-векторной модуляции (ПВМ). Принцип этого алгоритма основан на том, что вектор выходного напряжения АИ формируется на одном модуляционном периоде за счет последовательного переключения основных векторов. Данный алгоритм позволяет обеспечить плавное перемещение результирующего вектора напряжения на выходе АИ, что делает его наиболее перспективным. Несмотря на преимущества алгоритма «классической» ПВМ, он может быть модернизирован с целью повышения эффективности управления ключами АИ и обеспечения более высоких энергетических характеристик, электромагнитной совместимости АИ с приводным электродвигателем [4], [9], [12], [13], [14].

Алгоритм вычисления управляющих функций АИ, а затем и формирование коммутационных функций, включает в себя следующие этапы расчета.

I этап: преобразование вектора выходного напряжения, формирующегося на выходе системы автоматического управления асинхронного двигателя – эталонного вектора, из трехфазной системы координат в двухфазную:

$$U_{\alpha} = U_{Aa};$$

$$U_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{Bb} - U_{Cc}).$$

II этап: вычисление модуля и фазы эталонного вектора напряжения:

$$|\bar{U}| = \sqrt{U_{\alpha}^2 + U_{\beta}^2};$$

$$\varphi_U = \arctan(U_{\alpha}/U_{\beta}).$$

III этап: определение сектора, в котором находится эталонный вектор напряжения:

если $-\pi/6 < \varphi_U < \pi/6$, то $\bar{U} \in \text{сектор } 1$;
 если $\pi/6 < \varphi_U < \pi/2$, то $\bar{U} \in \text{сектор } 2$;
 если $\pi/2 < \varphi_U < 5\pi/6$, то $\bar{U} \in \text{сектор } 3$;
 если $5\pi/6 < \varphi_U < -5\pi/6$, то $\bar{U} \in \text{сектор } 4$;
 если $-5\pi/6 < \varphi_U < \pi/2$, то $\bar{U} \in \text{сектор } 5$;
 если $-\pi/2 < \varphi_U < -\pi/6$, то $\bar{U} \in \text{сектор } 6$.

IV этап: вычисление временных интервалов включения основных векторов напряжения:

$$\begin{aligned} T_1 &= kT_f \frac{\sin(\pi/2 - \varphi_U)}{\sin(\pi/2)}; \\ T_2 &= kT_f \frac{\sin(\varphi_U)}{\sin(\pi/3)}; \\ T_0 &= T_f - (T_1 + T_2); \\ k &= 3\sqrt{U} / |2U_{dc}|; \\ T_f &= 1/f_f. \end{aligned}$$

V этап: формирование коммутационных функций управления ключами АИ.

На рис. 2а представлен годограф вектора выходного напряжения автономного инвертора, собранного по трехфазной мостовой схеме. Функционирование системы автоматического управления АИ на основе алгоритма ПВМ происходит следующим образом. Например, если эталонный вектор выходного напряжения АИ находится в первом секторе, как это показано на рис. 2а, то для формирования такого же результирующего вектора напряжения на выходе АИ на одном модуляционном периоде должны последовательно включаться транзисторы, обеспечивающие работу векторов $U_0 - U_1 - U_2 - U_7 - U_7 - U_2 - U_1 - U_0$ в течении времени T_1 , T_2 и T_0 .

Повышение эффективности алгоритма ПВМ за счет угловой дифференциации координатной плоскости. Повысить эффективность работы алгоритма ПВМ можно путем угловой дифференциации (разбиения) координатной плоскости на подсекторы. На рис. 2 б, в, г показано разбиение координатной плоскости на 36, 72 и 120 подсекторов, соответственно.

Угловая дифференциация координатной плоскости (α - β) позволит обеспечить улучшение формы кривой тока, а именно: снизить коэффициент искажения выходного тока и увеличить амплитуду основной гармоники выходного напряжения. При этом нет необходимости структурного изменения силовой схемы АИ.

Модернизация алгоритма ПВМ угловой дифференциации координатной плоскости осуществляется за счет изменения вычислительного алгоритма временных интервалов включения основных векторов напряжения. Расчет временных интервалов T_1 и T_2 с учетом подсектора (n), в котором находится эталонный вектор, можно осуществить с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{\sqrt{3}T_f|U|}{U_{dc}} \left(\sin \frac{\pi}{3} n \cos \varphi_U - \cos \frac{\pi}{3} n \sin \varphi_U \right); \\ T_2 &= \frac{\sqrt{3}T_f|U|}{U_{dc}} \left(-\cos \varphi_U \sin \frac{\pi}{3} (n-1) - \sin \varphi_U \cos \frac{\pi}{3} (n-1) \right). \end{aligned}$$

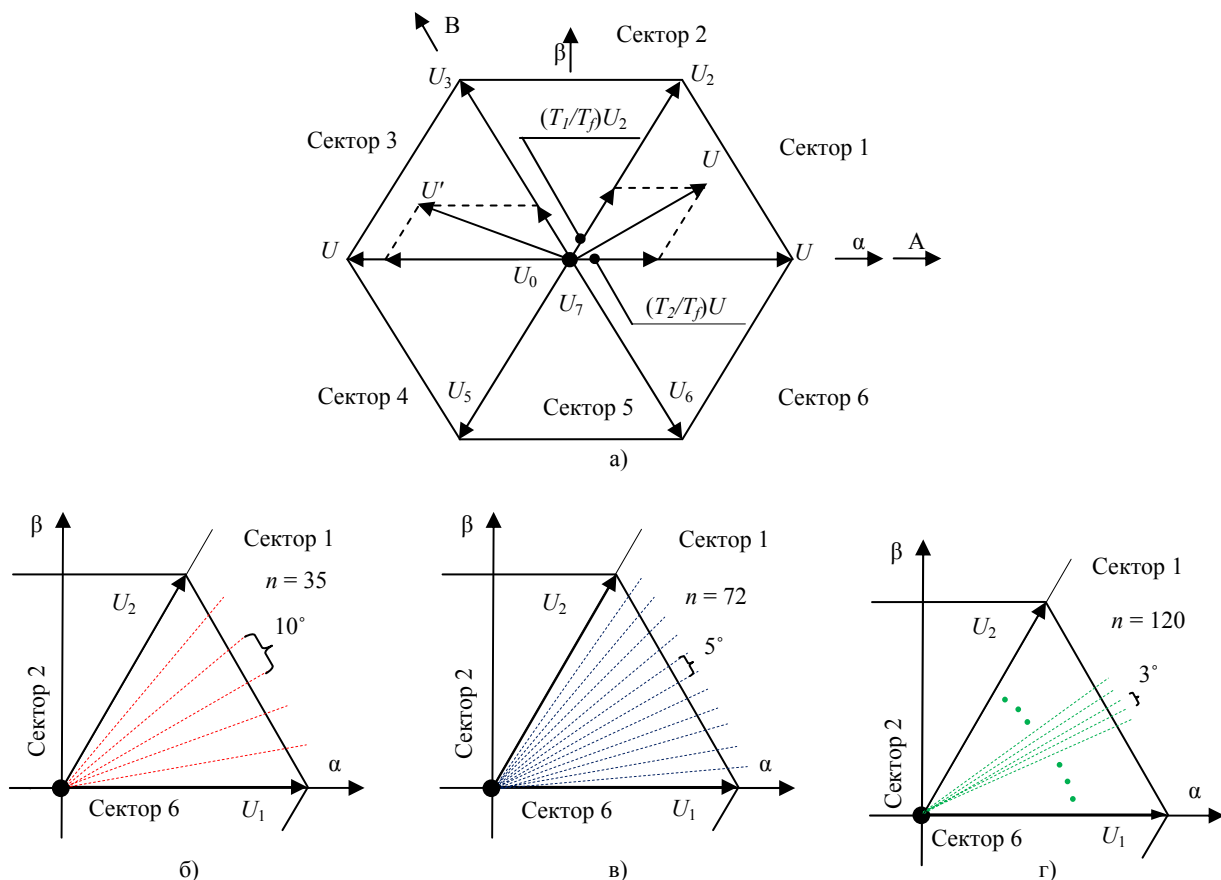


Рис. 2. Годограф вектора выходного напряжения автономного инвертора и угловая дифференциация координатной плоскости ($\alpha - \beta$)

Анализ эффективности метода угловой дифференциации координатной плоскости в алгоритме ПВМ. Для сравнения эффективности методов повышения алгоритма пространственно-векторной модуляции целесообразно использовать следующие критерии: амплитуда основной гармоники выходного напряжения; частота коммутации; коэффициент несинусоидальных искажений (далее коэффициент искажения или *THD* – *total harmonic distortion*) выходного тока и напряжения.

На рис. 3 представлены следующие кривые: а – форма кривой тока и напряжения на выходе АИ и первая гармоника выходного напряжения при вели-

чине сектора – 60° («классической» шестисекторной ПВМ); б – форма кривой тока и напряжения на выходе АИ и первая гармоника выходного напряжения при величине сектора – 3° ; в – зависимости, характеризующие изменение коэффициента искажений выходного фазного напряжения АИ при изменении относительной длительности коммутации; г – зависимости, характеризующие изменение коэффициента искажений выходного тока АИ при изменении относительной длительности коммутации; д – спектральный состав выходных токов АИ при разной величине сектора.

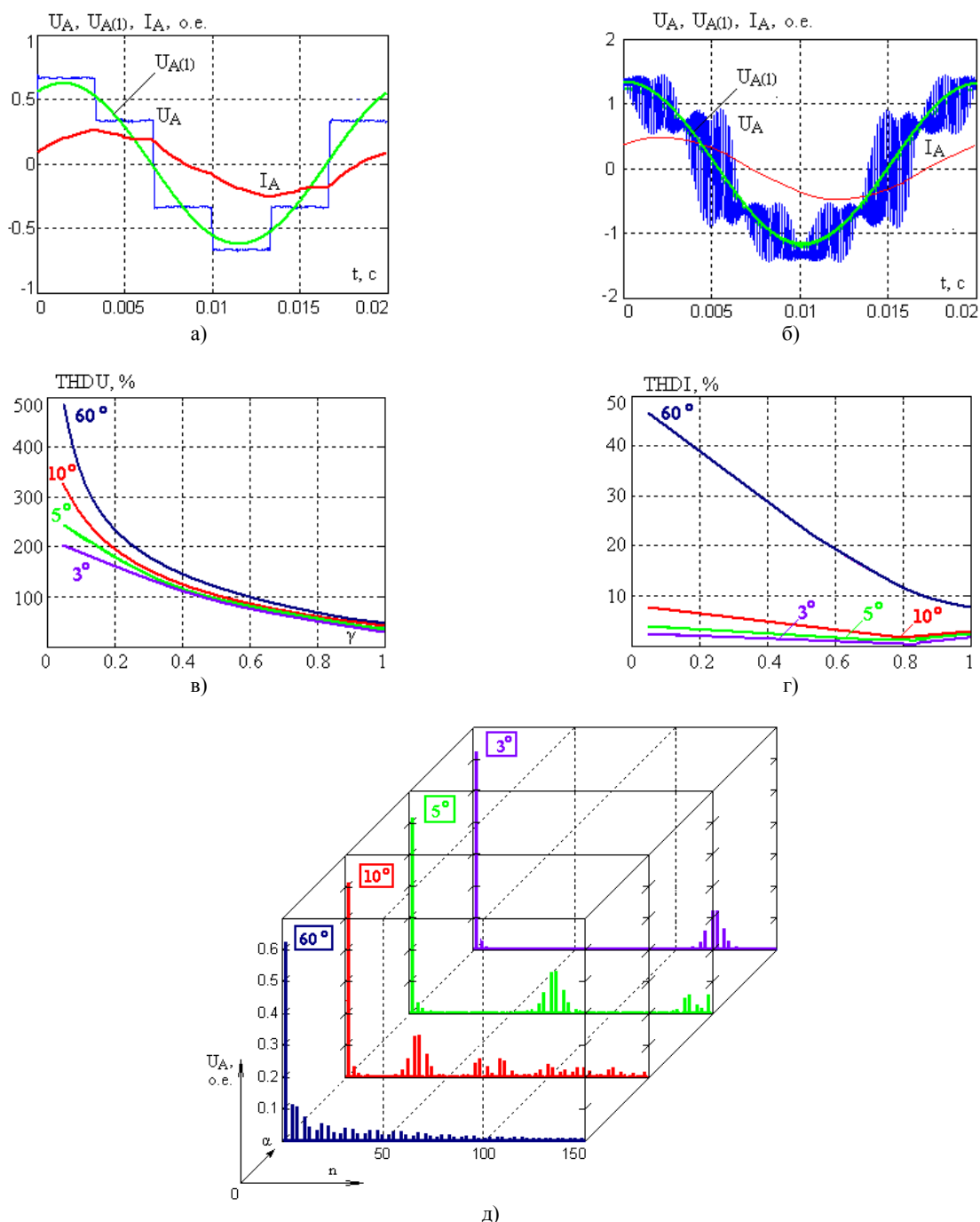


Рис. 3. Результаты исследования алгоритма ПВМ с угловой дифференциации координатной плоскости

Из рис. 3а видно, что при величине сектора 60° характер изменения напряжений и токов на выходе АИ с алгоритмом ПВМ соответствует АИ с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией. Это позволяет говорить о том, что использование «классической» шестисекторной ПВМ не обеспечивает повышение эффективности преобразования электрической энергии в АИ выше того уровня, что может обеспечить алгоритм синусоидальной широтно-импульсной модуляции.

При уменьшении величины подсекторов и увеличении их количества увеличивается частота коммутации АИ. В свою очередь, это обеспечивает лучшую форму кривой выходного тока АИ. Максимальное значение амплитуды выходного фазного напряжения АИ равно 66,7 % от величины постоянного напряжения на входе АИ. Максимальное значение основной гармоники выходного фазного напряжения равно 61 % постоянного входного напряжения АИ.

Минимальное значение коэффициента искажений выходного тока (рис. 3г) достигается при величине подсектора равного 3° и работе АИ в режиме перемодуляции, т. е. при относительной длительности коммутации выше 0,866. Минимальное значение коэффициента искажения фазного напряжения (рис. 3в) достигается при величине относительной длительности коммутации АИ равной 0,866 и находится ниже 3 %.

На рис. 3д видно, что при уменьшении величины сектора «пакеты» высокочастотных составляющих выходного напряжения автономного инвертора сдвигаются в область высших частот, что значительно облегчает методы борьбы с ними. Это происходит из-за увеличения частоты коммутации автономного инвертора (рис. 3б).

Выводы.

Таким образом, в статье проведен анализ эффективности алгоритма ПВМ. Рассмотрен вычислительный алгоритм метода повышения эффективности управления полупроводниковыми ключами автономного инвертора за счет угловой дифференциации пространственной плоскости. Показано, что само по себе использование алгоритма «классической» ПВМ (при величине сектора 60°) не приводит к повышению эффективности работы АИ выше, чем это обеспечивает алгоритм синусоидальной широтно-импульсной модуляции. При этом значительное повышение эффективности достигается за счет использования алгоритма ПВМ с угловой дифференциацией координатной плоскости.

Литература

1. Васильев, Б. Ю. Автоматизированный электропривод объектов минерально-сырьевого комплекса (применение, моделирование, исследование) / Б. Ю. Васильев. – СПб., 2014.
2. Васильев, Б. Ю. Мехатронные перекачивающие комплексы на основе регулируемых электроприводов для подводного компримирования и транспортировки природного газа / Б. Ю. Васильев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – №3. – С. 55–60.
3. Васильев, Б. Ю. Повышение эффективности асинхронных электроприводов с прямым управлением моментом / Б. Ю. Васильев, А. Е. Козярук // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. – 2013. – Т. 13. – №2. – С. 75–84.
4. Васильев, Б. Ю. Эффективность управления электроприводом переменного тока с прямым управлением моментом / Б. Ю. Васильев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 1. – С. 71–75.
5. Васильев, Б. Ю. Эффективные алгоритмы управления полупроводниковыми преобразователями в асинхронных электроприводах / Б. Ю. Васильев, В. С. Добуш // Электричество. – 2014. – № 4. – С. 54–61.
6. Емельянов, А. П. Алгоритмы и технические средства управления автоматизированным электроприводом турбомеханизмов / А. П. Емельянов, Б. Ю. Васильев // Вестник Ивановского энергетического университета. – 2013. – № 1. – С. 92–96.
7. Козярук, А. Е. Алгоритмы управления энергоэффективным высокооборотным электроприводом газоперекачивающего агрегата / А. Е. Козярук, Б. Ю. Васильев // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2012. – №3. – С. 40–44.
8. Козярук, А. Е. Структура, состав и алгоритмы управления высокоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов / А. Е. Козярук, Б. Ю. Васильев // Электротехника. – 2013. – №2. – С. 43–51.
9. Пронин, М. В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов; под ред. Е. А. Крутякова. – СПб., 2003.
10. Усольцев, А. А. Частотное управление асинхронными двигателями / А. А. Усольцев. – СПб., 2006.
11. Шрейнер, Р. Т. Электроприводы переменного тока на базе непосредственных преобразователей частоты с ШИМ / Р. Т. Шрейнер, А. И. Калыгин, В. К. Кривовяз. – Екатеринбург, 2012.
12. Bimal, K. Bose. Modern Power Electronics and AC Drives / K. Bimal. – Prentice Hall. 2002.
13. Kozyaruk, A. E. Structure, composition, and control algorithms of high-efficiency electric drives of gas-compressor units / A. E. Kozyaruk, B. Yu. Vasil'ev // Russian Electrical Engineering. – 2013. – February. – Vol. 84. – Issue 2. – P. 94–102.
14. Sozanski, K. Digital Signal Processing in Power Electronics Control Circuits / K. Sozanski. – Springer, 2013.