



УДК 621.313.3

В. Н. Мещеряков, А. А. Муравьев
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Электроэнергетическая установка на базе машины двойного питания с релейной системой управления возбуждением

Рассмотрена электроэнергетическая установка на базе машины двойного питания с релейной системой управления возбуждением, предложены алгоритмы управления инвертором, подключенным к цепи ротора автономного асинхронного генератора. Проанализированы показатели, характеризующие работу установки – коэффициент нелинейных искажений THD и частота коммутаций ключей инвертора.

Автономный генератор, асинхронный двигатель с фазным ротором, коэффициент нелинейных искажений, инвертор, частота коммутаций

Генерация электроэнергии высокого качества в ветроустановках, а также в установках промышленных предприятий, осуществляющих выработку электроэнергии преобразованием энергии воздуха (газов), движущегося с переменной скоростью по трубопроводам, может производиться с использованием генераторной установки, выполненной на базе машины двойного питания (МДП). Для обеспечения высокого качества электроэнергии, получаемой с выводов обмотки статора, со стабилизированными значениями амплитуды и частоты гармонического напряжения при переменной скорости вращения вала генератора ω_p необходимо регулировать с требуемым быстродействием амплитуду и частоту гармонического тока возбуждения, подаваемого в обмотку ротора МДП.

Требуемая частота тока возбуждения определяется по формуле

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega_p, \quad (1)$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi \cdot 50 = 314$ рад/с, f_1 – частота сети [1].

Требуемую амплитуду тока возбуждения, зависящую от скорости вращения вала и электрической нагрузки, питающейся от обмотки статора, можно сформировать и регулировать с заданными показателями точности и быстродействия, по-

строив систему автоматического управления током возбуждения.

В установившемся режиме зависимость между основными переменными МДП можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} E_{1m} &= U_1 - I_1 R_1 - I_1 X_{1\sigma}; \\ E'_{2m} &= U'_2 - I'_2 R'_2 - I'_2 X'_{2\sigma}; \\ E'_{2m} &= E_{1m} s; \quad E_{1m} = I_m X_m; \\ I_m &= I_1 + I'_2; \quad U_1 = I_H Z_H, \end{aligned}$$

где $R_1, X_{1\sigma}, R_2, X'_{2\sigma}$ – активные и реактивные сопротивления рассеивания обмоток статора и ротора; U_1, I_1, U'_2, I'_2 – напряжения и токи статора и ротора; E_{1m}, E'_{2m}, s – ЭДС взаимной индукции и скольжения; I_m, X_m – ток и сопротивление цепи намагничивания; I_H, Z_H – ток и сопротивление цепи нагрузки.

Регулируя амплитуду и частоту подведенного к обмотке ротора напряжения U_2 , при изменении скорости вращения ротора, и, соответственно, скольжения s , можно поддерживать на заданном уровне напряжение на выводах обмотки статора генератора.

Функциональная схема генерирующей установки, построенной на базе МДП, приведена на рис. 1.

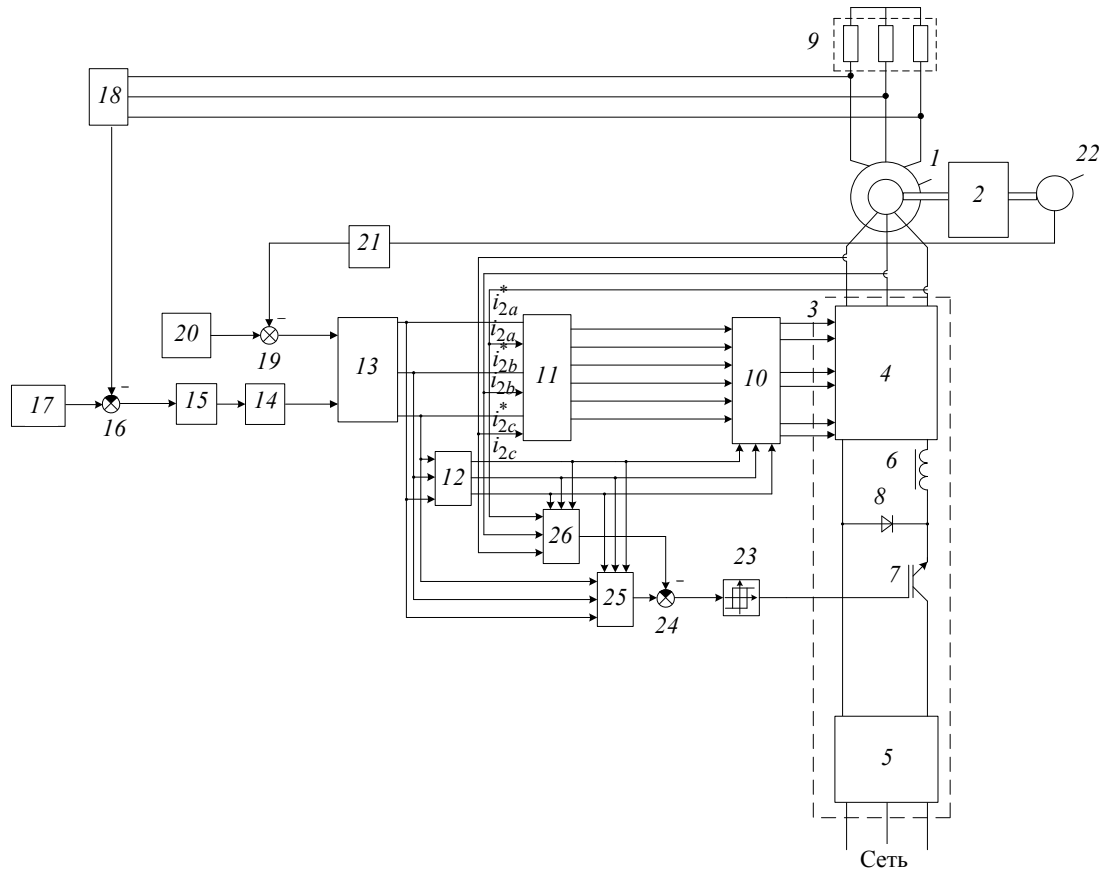


Рис. 1

Вал асинхронного двигателя 1 соединен с источником механической энергии 2. Вращающееся магнитное поле с частотой, рассчитываемой по (1), создается преобразователем 3, который состоит из инвертора 4 и выпрямителя 5. Между инвертором и выпрямителем включен сглаживающий реактор 6 для снижения темпа изменения тока на интервале работы ключевых элементов, что позволяет снизить частоту коммутаций ключей. Ключ 7 позволяет регулировать количество энергии, подаваемой на инвертор 4. В моменты времени, когда ключ 7 разомкнут, замкнутый контур протекания тока образуется благодаря диоду 8. К выходным зажимам статора подключена нагрузка 9. Если нагрузка активная, то параллельно резисторам должны быть подключены конденсаторы для питания генератора реактивной мощностью.

Контур управления частотой содержит датчик скорости 22, блок задания 20, пропорциональный коэффициент 21 и сумматор 19, выходной сигнал которого поступает на частотный вход формирователя 13 задания синусоидальных фазных токов. Любое изменение частоты вращения вала генератора сопровождается изменением частоты тока на

выходе инвертора в соответствии с (1), в результате частота тока на выходе генератора ω_1 поддерживается на заданном уровне.

Блок 17 вырабатывает задание на выходное напряжение генератора 1, которое сравнивается в узле сравнения 16 с измеренным датчиком 18 значением выходного напряжения генератора 1. Сигнал отклонения преобразуется ПИ-регулятором 15 в сигнал задания на амплитуду выходного тока инвертора и через ограничитель 14 поступает на амплитудный вход формирователя 13, который формирует сигнал задания на синусоидальные фазные токи на выходе инвертора 4, сдвинутые относительно друг друга на угол $2\pi/3$.

Эти сигналы задания мгновенных значений фазных токов i_{2a}^* , i_{2b}^* , i_{2c}^* поступают на первые входы релейно-гистерезисных регуляторов тока 11 в виде синусоидального сигнала с требуемой амплитудой I^* и частотой ω^* , на вторые входы регуляторов 11 поступают мгновенные значения фазных токов i_{2a} , i_{2b} , i_{2c} , измеряемые на выходе инвертора 4.

Блок определения фазы с максимальным значением по модулю 12, который определяет сигналы управления в зависимости от значений фазных токов, работает по следующему алгоритму:

если $|i_{2a}^*| > |i_{2b}^*|$ и $|i_{2a}^*| > |i_{2c}^*|$, то $I_{\max A} = \langle 1 \rangle$,
 $I_{\max B} = \langle 0 \rangle$, $I_{\max C} = \langle 0 \rangle$;

если $|i_{2b}^*| > |i_{2a}^*|$ и $|i_{2b}^*| > |i_{2c}^*|$, то $I_{\max B} = \langle 1 \rangle$,
 $I_{\max A} = \langle 0 \rangle$, $I_{\max C} = \langle 0 \rangle$;

если $|i_{2c}^*| > |i_{2a}^*|$ и $|i_{2c}^*| > |i_{2b}^*|$, то $I_{\max C} = \langle 1 \rangle$,
 $I_{\max A} = \langle 0 \rangle$, $I_{\max B} = \langle 0 \rangle$.

Если на блок выбора сигналов 10 поступает сигнал от блока 12 с максимальным значением по модулю тока в фазе $I_{\max A}$, или $I_{\max B}$, или $I_{\max C}$, то управляющие сигналы, поступающие на ключи инвертора, которые отвечают за ток в этой фазе, генерируются таким образом, чтобы обеспечить заданное направление протекания тока. Сигналы управления остальными ключами проходят через блок 10 без изменения от блока регулятора тока 11.

Ток I_d выпрямленной цепи регулируется по отклонению от уровня сигнала задания $I_{d\text{зад}}$. Релейный регулятор 23 формирует сигналы управления ключом 7 по сигналу рассогласования, поступающего с узла сравнения 24. Сигнал задания выпрямленного тока $I_{d\text{зад}}$ определяется блоком задания выпрямленного тока преобразователя 25 на основании сигналов задания мгновенных значений фазных токов инвертора 4 i_{2a}^* , i_{2b}^* , i_{2c}^* , поступающих от формирователя 13, и сигнала управления от блока определения фазы 12. Сигнал I_d определяется согласно следующему алгоритму:

если $I_{\max A} = \langle 1 \rangle$, $I_{\max B} = \langle 0 \rangle$, $I_{\max C} = \langle 0 \rangle$, то
 $I_d = |i_{2a}|$;

если $I_{\max B} = \langle 1 \rangle$, $I_{\max A} = \langle 0 \rangle$, $I_{\max C} = \langle 0 \rangle$, то
 $I_d = |i_{2b}|$;

если $I_{\max C} = \langle 1 \rangle$, $I_{\max A} = \langle 0 \rangle$, $I_{\max B} = \langle 0 \rangle$, то
 $I_d = |i_{2c}|$.

Блок расчета эквивалентного выпрямленного тока преобразователя 26 работает аналогично блоку задания выпрямленного тока преобразователя 25 и вырабатывает на выходах значения мгновенных фазных токов соответствующей фазы [2].

На рис. 2 представлена блок-схема компьютерной модели силовой части системы. В модели параллельно катушке индуктивности подключен дополнительный обратный диод для обеспечения цепи протекания тока при коммутационных процессах, связанных с работой инвертора.

Работа данного инвертора имеет некоторые особенности по сравнению с типовыми инверторами. Используемые в современных системах частотного электропривода преобразователи ча-

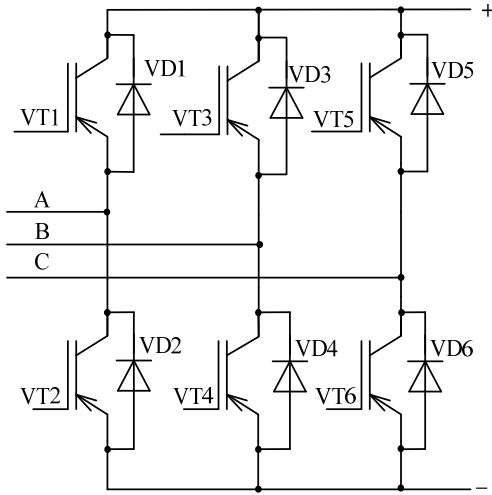
стоты со звеном постоянного тока содержат или инвертор напряжения с нерегулируемым выпрямителем, или инвертор тока с регулируемым выпрямителем. В инверторах напряжения диодный выпрямитель не регулирует поток энергии, передаваемый инвертору, регулирующему этот поток. Такой подход упрощает систему управления преобразователем частоты, но амплитуда импульсов напряжения на выходе инвертора всегда имеет постоянное нерегулируемое значение. В инверторах тока выпрямитель (регулируемый) управляет потоком энергии, поступающим из сети и передаваемым инвертором на вход двигателя, однако при этом ухудшается электромагнитная совместимость преобразователя частоты и питающей сети, в частности снижается коэффициент мощности преобразователя частоты и ухудшается гармонический состав напряжения.

В предлагаемом преобразователе частоты применяются нерегулируемый выпрямитель и дополнительный импульсный коммутатор в звене постоянного тока. При включенном состоянии коммутатора поток энергии поступает на вход инвертора от нерегулируемого выпрямителя, и кроме того накапливается в дросселе, включенном в звено постоянного тока, а также в обмотках двигателя. При отключенном состоянии коммутатора образуется электрическая цепь, позволяющая току продолжать протекать через дроссель и обмотки статора двигателя. Проведенные исследования показали, что при питании обмоток двигателя от данного инвертора на его выходе необходимо устанавливать конденсаторы, включаемые параллельно нагрузке, что упрощает снабжение двигателя требуемой реактивной мощностью.

При генерации электроэнергии для обеспечения высокого качества напряжения на выводах обмотки статора МДП при переменной скорости вращения ротора необходимо питать обмотку ротора синусоидальным током возбуждения с регулируемой частотой с допустимым уровнем высших гармонических составляющих.

Было проведено исследование различных алгоритмов, реализующих релейный принцип формирования синусоидального тока возбуждения с заданными показателями качества (допусками отклонений мгновенных значений тока от первой гармоники тока).

Известны системы релейного управления выходным током инвертора, в котором использован алгоритм переключения шести ключей инвертора [3]–[8], этот алгоритм в данном исследовании принят за эталонный. Схема соединения ключей инвертора приведена на рис. 3.



Для реализации других алгоритмов в силовую часть вводится дополнительный ключ VT7. Он формирует кривую изменения тока в верхней части синусоид, в частности на рис. 4 показано формирование тока фазы А в течение времени от t_0 до t_1 – таким образом регулируют максимальное по модулю значение тока на выходе инвертора.

В каждый момент времени происходит анализ состояния системы и выбор схемы замыкания требуемых ключей. Рассмотрим последовательность замыкания ключей на рис. 4 в течение времени от t_0 до t_1 . Для обеспечения протекания тока в выбранном направлении через фазу А на участке АВ ключ VT1 замкнут, а ключ VT2 разомкнут. Значение тока в фазе А определяется работой ключа VT7. На участках CF и ED формирование тока будет осуществляться за счет применения релейного алгоритма переключения ключей в

плечах фаз В, С. Алгоритм работы ключей представлен в табл. 1. За один период наблюдается 6 схем замыкания.

Во втором алгоритме на участке времени от t_0 до t'_0 для протекания токов в заданном направлении замыкают ключи VT1 и VT4. На участке CG синусоиды фазы С формирование тока происходит за счет релейного алгоритма переключения ключей. Ток в фазе А формируется седьмым ключом VT7. В фазе В ток определяется на основании закона Кирхгофа для общей точки соединения обмоток ротора:

$$i_{2b} = i_{2a} + i_{2c}.$$

После прохождения точки G происходит переключение: замыкаются ключи VT1 и VT6. Участок GD формируется за счет релейного алгоритма. Ток в фазе С формируется на основании сумм токов фаз А и В (алгоритм работы ключей представлен в табл. 2):

$$i_{2c} = i_{2a} + i_{2b}.$$

Третий алгоритм совмещает в себе второй и первый. За основной принят второй алгоритм, но при приближении к точке G для снижения отклонения от заданной синусоиды происходит переключение на первый. Время работы первого алгоритма составляет 10 % от периода синусоиды задания.

Исследования проводились при условии номинальной нагрузки 103 Ом и скорости вращения 83.776 рад/с. При таких значениях механическая мощность равна мощности в цепи статора. Мощ-

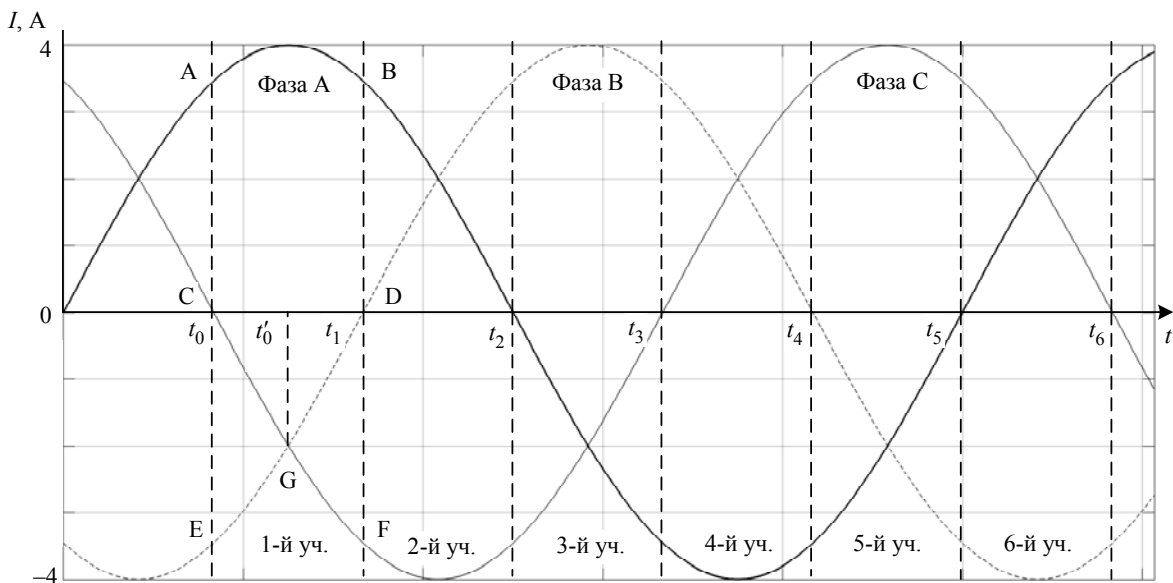


Рис. 4

Таблица 1

Ключ	1-й уч.	2-й уч.	3-й уч.	4-й уч.	5-й уч.	6-й уч.
VT1	1 (VT7)	P	P	0 (VT7)	P	P
VT2	0 (VT7)	P	P	1 (VT7)	P	P
VT3	P	P	1 (VT7)	P	P	0 (VT7)
VT4	P	P	0 (VT7)	P	P	1 (VT7)
VT5	P	0 (VT7)	P	P	1 (VT7)	P
VT6	P	1 (VT7)	P	P	0 (VT7)	P

Таблица 2

Ключ	1-й уч.		2-й уч.		3-й уч.		4-й уч.		5-й уч.		6-й уч.	
VT1	1 (VT7)		1	P	P	0	0 (VT7)	0	P	P	1	
VT2	0 (VT7)		0	P	P	1	1 (VT7)	1	P	P	0	
VT3	0	P	P	1	1 (VT7)		1	P	P	0	0 (VT7)	
VT4	1	P	P	0	0 (VT7)		0	P	P	1	1 (VT7)	
VT5	P	0	0 (VT7)		0	P	P	1	1 (VT7)	1	P	
VT6	P	1	1 (VT7)		1	P	P	0	0 (VT7)	0	P	

Таблица 3

Алгоритм	U_2		I_2		U_1		I_1	
	Amp, B	THD, %	Amp, A	THD, %	Amp, B	THD, %	Amp, A	THD, %
Эталонный	91.27	431.39	3.972	3.55	316.1	0.06	6.459	2.03
Первый	90.53	332.21	3.985	3.67	317	0.36	6.478	2.03
Второй	91.59	262.89	4.015	4.37	319.5	1.14	6.529	2.69
Третий	91.66	272.95	4.017	3.67	319.7	0.72	6.532	2.17

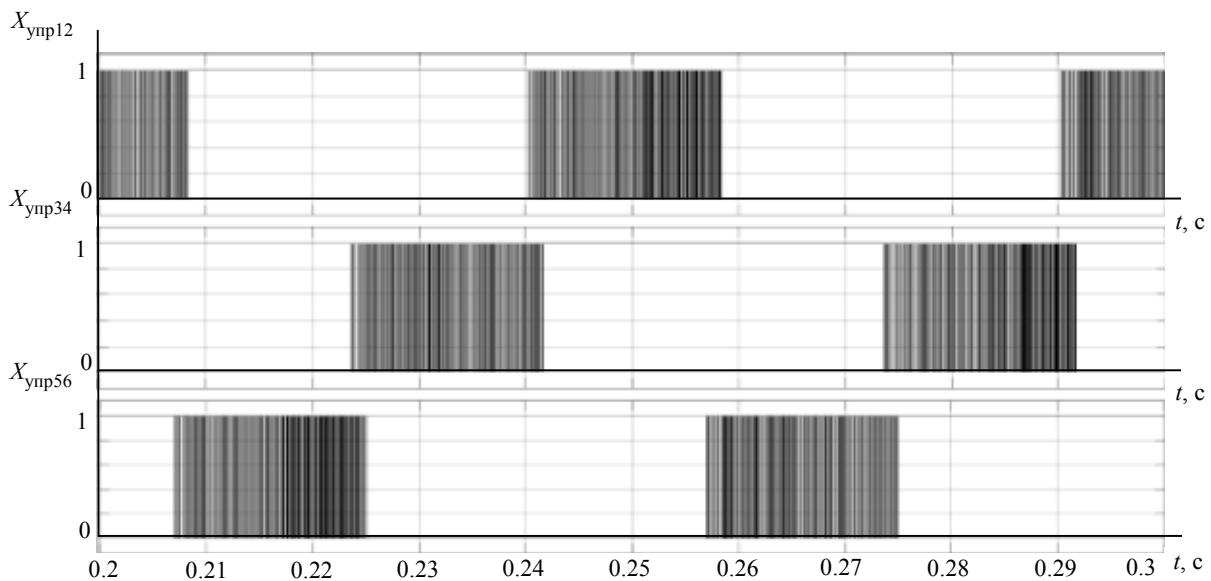


Рис. 5

ность, подаваемая в цепь ротора, равна потерям в электрической машине [9], [10].

Заданное амплитудное значение тока ротора составляло 4 А, что при нагрузке 103 Ом дает на выходе напряжение, близкое к номинальному линейному 380 В.

Результаты исследования несинусоидальности токов и напряжений на выходе инвертора и генератора представлены в табл. 3. В столбцах указано амплитудное значение параметра и зна-

чение коэффициента нелинейных искажений в процентах.

На рис. 5 представлен график сигналов управления ключами инвертора $X_{упр12}$, $X_{упр34}$, $X_{упр56}$ по третьему алгоритму, из которого видно, что в каждый момент времени работает только одна пара ключей в инверторе. Проиллюстрирован один период работы ключей при частоте тока ротора 10 Гц. В каждом плече ключи находятся в режиме коммутаций приблизительно 0.04 с.

Таким образом, третий алгоритм имеет некоторые преимущества, например в режиме релейного коммутирования работают только 3 ключа, а в эталонном – 6 ключей. Если учесть зоны переходных режимов, когда одна пара ключей сменяет

другую, что составляет не более 10 % от периода, то общее время коммутаций ключей сокращается приблизительно на 40 %. При этом несинусоидальность выходного тока инвертора ухудшается менее чем на 1 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2539347 РФ, МПК H02P9/44, H02P9/48. Способ управления автономным асинхронным двигателем / В. Н. Мещеряков, О. В. Мещерякова (Россия); заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет» (ЛГТУ) (RU) – № 2013135394/07; заявл. 26.07.2013; опубл. 20.01.2015. Бюл. № 2. 7 с.
2. Пат. 2606643 РФ, МПК H02P9/02, H02P9/48. Способ управления автономным асинхронным генератором / В. Н. Мещеряков, А. А. Муравьев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет» (ЛГТУ) (RU) – № 2015135745/07; заявл. 21.08.2015; опубл. 10.01.2017. Бюл. № 1. 12 с.
3. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 272 с.
4. Пат. 2456742 РФ, МПК H02P25/02, H02P27/04, H02P27/06. Способ управления электроприводом переменного тока / В. Н. Мещеряков, Д. В. Безденежных, А. М. Башлыков, А. С. Абросимов (Россия); заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Липецкий государственный технический университет (ГОУ ВПО ЛГТУ) (RU) – № 2011114789/07; заявл. 14.04.2011; опубл. 20.07.2012. Бюл. № 20. 9 с.
5. Meshcheryakov V. N., Voekov V. N. Developing a system of variable-frequency vector control based on a self-commutated current inverter in an AC electric drive // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij Chernozem'ja*. 2015. № 1. P. 6–13.
6. Мещеряков В. Н., Байков Д. В. Имитационная модель асинхронного электропривода на базе матричного преобразователя частоты // *Вестн. ЛГТУ*. 2015. № 3 (25). С. 12–18.
7. Пат. 2362264 РФ, МПК H02P25/02, H02P27/08. Способ управления электроприводом переменного тока / В. Н. Мещеряков, М. А. Туркин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет» (ГОУ ВПО ЛГТУ) (RU) – № 2007146855/09; заявл. 17.12.2007; опубл. 20.07.2009, бюл. № 20.
8. Мещеряков В. Н., Туркин М. А. Энергосбережение при рациональном режиме работы синхронного двигателя при частотном регулировании // *Системы управления и информационные технологии*. 2007. № 1(27). С. 180–183.
9. Мещеряков В. Н., Муравьев А. А. Асинхронный генератор на базе машины двойного питания // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2016. № 4. С. 45–49.
10. Разработка и исследование частотного асинхронного электропривода / В. Н. Мещеряков, А. А. Муравьев, А. М. Башлыков, О. В. Мещерякова // *Тр. 16-й Междунар. науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока»*. Екатеринбург, 2015. С. 175–178.

V. N. Meshcheryakov, A. A. Muravyev

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Lipetsk State Technical University»

ELECTRICITY GENERATING UNIT BASED ON DOUBLE-FED MACHINE WITH A RELAY EXCITATION CONTROL SYSTEM

Electricity generating unit based on double-fed machine with a relay excitation control system is considered, and algorithms for controlling an inverter connected to the rotor circuit of an isolated asynchronous generator are proposed. The unit performance measure is analyzed – the THD coefficient and the inverter keys switching frequency.

Isolated generator, wound-rotor induction motor, total harmonic distortion, inverter, switching frequency
