

ЭЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Одним из приоритетных направлений в развитии энергетики является повышение энергоэффективности в электротехнических системах, в частности в электроприводах переменного тока. Повышение коэффициента полезного действия, а также уменьшение массогабаритных показателей систем электроприводов высокой мощности приводит к значительному сокращению капитальных затрат. На сегодняшний день ведется множество исследований и разработок систем энергоэффективных электроприводов. В статье предлагается альтернативный способ реализации электропривода переменного тока на базе машины двойного питания (МДП) с непосредственным преобразователем частоты (НПЧ). Наличие второго канала управления в МДП позволяет расширить функциональные возможности при управлении электроприводом. Цель исследования состоит в оценке энергоэффективности НПЧ на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем (ТВМП) при его использовании в рассматриваемом электроприводе. В статье приведено описание основных элементов рассматриваемого электропривода, обосновано решение по использованию альтернативного варианта реализации преобразователя частоты на базе НПЧ и ШИМ-преобразователя с промежуточным звеном. Авторами статьи предложена и рассмотрена возможность использования ТВМП в качестве такого промежуточного звена. При составлении математического описания ТВМП были использованы основные методы теории дифференциальных уравнений. Представлена функциональная схема такого электропривода, на основе которой построена имитационная модель в *Simulink*. Для сравнительного анализа выполнено моделирование системы управления с трехфазным НПЧ и системы с НПЧ на базе ТВМП. По результатам моделирования проведен гармонический анализ выходного напряжения преобразователя частоты. В заключении представлены основные преимущества такого электропривода над классическими вариантами.

Ключевые слова: машина двойного питания, непосредственный преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, трансформатор с вращающимся магнитным полем, гармонический анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Современные известные системы электроприводов переменного тока сконструированы для широкого спектра выполняемых задач и сильно различаются как по целевому применению, так и по своему исполнению. Под исполнением подразумеваются особенности конструкции системы электропривода и входящие в нее элементы. На сегодняшний день одним из основных видов регулируемого электропривода является электропривод по системе преобразователь частоты – двигатель. Ее широкое применение обусловлено относительно широким диапазоном и высокой точностью регулирования [1, 2]. Однако такой электропривод обладает существенными недостатками. Наличие промежуточного звена постоянного тока приводит к увеличению массогабаритных показателей системы, а двукратное преобразование энергии приводит к снижению КПД такого преобразователя [3]. Кроме того реализация таких систем электропривода на большую мощность связана с использованием высоковольтных ПЧ, а это дополнительно приводит к увеличению массогабаритных показателей, снижению надежности и увеличению стоимости таких систем.

Ослабить вышеперечисленные недостатки возможно, если в качестве приводного двигателя использовать машину двойного питания (МДП). Данное решение обосновано тем, что использование машины двойного питания целесообразно в приводах высокой мощности с относительно небольшим диапазоном регулирования. Примеры такого использования описаны в электропри-

водах с машиной двойного питания в судовых валогенераторных установках и генераторных подстанциях [4]. Отличительная особенность МДП состоит в том, что при ее управлении могут быть использованы два канала регулирования: первый – по цепи статора, второй – по цепи ротора. На **рис. 1** приведена функциональная схема электропривода на базе МДП [5, 6].

На **рис. 1** обозначены: ДН1, ДН2 – датчики напряжений статора и ротора; ДТ1, ДТ2 – датчики тока в цепи статора и ротора; 1 – машина двойного питания; Т – согласующий трансформатор; ЗДС – задатчик скорости; ДС – датчик скорости; ДТФ – датчик тригонометрических функций угла изображающего вектора напряжения системы; РУ – регулирующее устройство; ПЧ – преобразователь частоты; К1 – ключ, переключающий синхронный и асинхронный режимы работы.

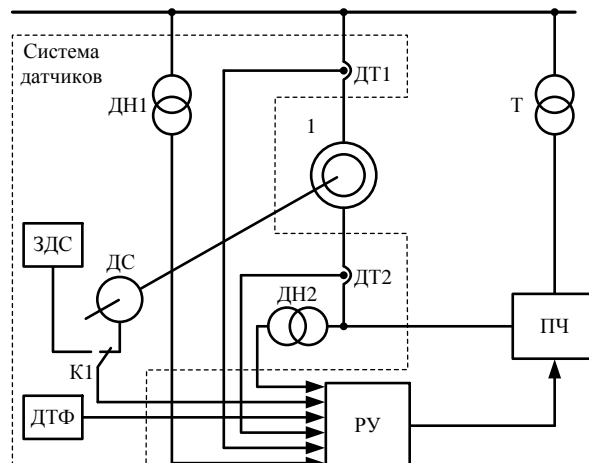


Рис. 1. Функциональная схема электропривода на базе МДП

Для любой электрической машины нормальный установившийся режим существует в том случае, если магнитные потоки, созданные статорными и роторными токами, оказываются в пространстве взаимно неподвижными при произвольном значении угловой скорости ротора [3]. Из этого условия следует также, что МДС, создающие указанные магнитные потоки или изображающие векторы токов и напряжений статора и ротора, также должны быть взаимно неподвижными. Данное условие записывается следующим образом:

$$\omega = \omega_f \pm \omega_r, \quad (1)$$

где ω_f – частота напряжения статора; ω_r – частота напряжения ротора; ω – угловая скорость вращения ротора.

Поскольку скорость вращения ротора МДП пропорциональна алгебраической сумме частот напряжений статора и ротора, то данное техническое решение позволяет в высокомоощном электроприводе с небольшим диапазоном регулирования использовать ПЧ невысокого напряжения, в силу того что у двигателей высокого напряжения (от 6 кВ) напряжение на роторе намного ниже такового на статоре. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению капитальных затрат.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

Как уже было выше отмечено, классические преобразователи частоты с промежуточным звеном обладают относительно низким КПД и большими массогабаритными показателями [3]. Учитывая, что применение МДП целесообразно в первую очередь для высокомоощных электроприводов с невысоким диапазоном регулирования, то в качестве регулируемого преобразователя эффективнее использовать непосредственный преобразователь частоты. Из-за однократного преобразования энергии НПЧ обладают высоким КПД, а отсутствие промежуточного звена снижает их стоимость и массогабаритные показатели. Помимо этого, достоинствами НПЧ является возможность автономного регулирования напряжения и тока, а коммутация силовых ключей может осуществляться естественным путем [7].

Стоит отметить, что основным недостатком НПЧ остается искаженная форма выходного напряжения из-за высокого содержания в ней гармоник высшего порядка. Это приводит к дополнительным потерям энергии, ударным нагрузкам на валу двигателя и перенапряжениям в электрических цепях с управляющими элементами. Такая форма напряжения обусловлена тем, что НПЧ ее формирует непосредственно из участков синусоид напряжения сети.

Известно, что коэффициент гармоник становится тем выше, чем выше частота выходного напряжения НПЧ по отношению к частоте напряжения сети и чем меньше фазность преобразователя [3, 7]. В связи с этим для ослабления вышеуказанного недостатка авторами предложено использовать вместо трехфазного НПЧ многофазный. Это решение позволит уменьшить содержание вредных гармоник и тем самым улучшить форму выходного напряжения.

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Использование многофазного НПЧ возможно с наличием источника многофазного напряжения. На

рис. 1 между сетью и ПЧ расположен согласующий трансформатор Т, который является трехфазным источником питания для преобразователя. Данную проблему можно решить, если вместо классического трехфазного трансформатора использовать многофазный трансформатор с вращающимся магнитным полем (ТВМП).

При этом в качестве источника переменного напряжения первичной цепи ТВМП можно использовать источник постоянного напряжения с управляемым коммутатором. Это позволяет исключить привязку к трехфазной сети переменного тока, уменьшить массогабаритные показатели первичной цепи ТВМП и расширить функциональные возможности при формировании входного напряжения. В качестве примера на **рис. 2** приведена схема двухфазно-пятифазного ТВМП. Источником питания для такого ТВМП может выступать ШИМ-преобразователь. Схема такого подключения изображена на **рис. 2**.

Выбор нестандартного количества фаз вторичного напряжения ТВМ связано с демонстрацией возможности построения НПЧ с ТВМП на любое произвольное количество фаз и оценкой влияния нестандартного количества фаз на уровень высших гармоник выходного напряжения.

Принцип работы такой системы заключается в следующем. Входы ШИМ-преобразователя 3 и 4 подключаются к источнику постоянного напряжения. Первая (положительная группа) 1 (ключи 5-8) и вторая (отрицательная) группа 2 (ключи 9-12) работают последовательно в выпрямительном и инверторном режимах и формируют двухфазное переменное напряжение. Фазы этого напряжения со сдвигом в 90° подаются на первичные обмотки ТВМП 13 и 14, тем самым формируя вращающееся магнитное поле в магнитопроводе 15. Это поле, в свою очередь, формирует на выходе ТВМП в каждой обмотке А, В, С, D, E переменное напряжение той же частоты, сдвинутое на угол $\varphi = 360^\circ/5 = 72^\circ$. К выходам А, В, С, D, E может быть подключен пятифазный НПЧ.

Решение по реализации системы управления с использованием ТВМП может расширить функциональные возможности электропривода, поскольку появляется дополнительный канал регулирования на входе ТВМП.

Несмотря на то, что использование ТВМП в электроприводах широко не распространено, работы по конструированию и исследованию ТВМП известны за рубежом [8, 9].

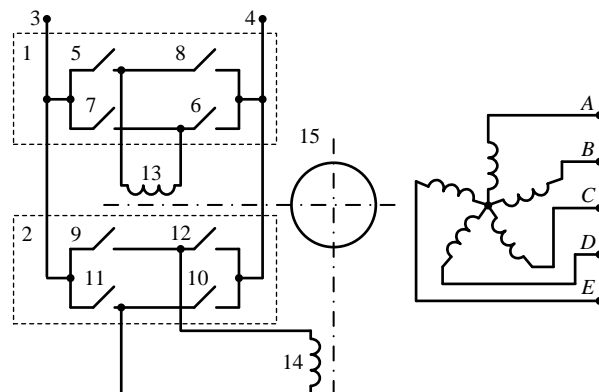


Рис. 2. Схема подключения ТВМП

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТВМП

Система уравнений (2), отражающая основные электрофизические процессы в ТВМП, основывается на уравнениях электрического баланса напряжений в контурах первичных и вторичных обмоток трансформатора. Конечный расчет необходимых параметров для дальнейшего использования такого математического описания сводится к расчету взаимных и собственных индуктивностей между обмотками ТВМП.

$$\begin{cases}
 U_1 = r_1' i_1' + L_{11}' \frac{di_1'}{dt} + L_{12}' \frac{di_2'}{dt} + M_{11} \frac{di_1''}{dt} + \\
 + M_{12} \frac{di_2''}{dt} + M_{13} \frac{di_3''}{dt} + M_{14} \frac{di_4''}{dt} + M_{15} \frac{di_5''}{dt}; \\
 U_2 = r_2' i_2' + L_{21}' \frac{di_1'}{dt} + L_{22}' \frac{di_2'}{dt} + M_{21} \frac{di_1''}{dt} + \\
 + M_{22} \frac{di_2''}{dt} + M_{23} \frac{di_3''}{dt} + M_{24} \frac{di_4''}{dt} + M_{25} \frac{di_5''}{dt}; \\
 -R_1 i_1'' = r_1'' i_1'' + L_{11}'' \frac{di_1''}{dt} + L_{12}'' \frac{di_2''}{dt} + L_{13}'' \frac{di_3''}{dt} + \\
 + L_{14}'' \frac{di_4''}{dt} + L_{15}'' \frac{di_5''}{dt} + M_{11} \frac{di_1'}{dt} + M_{21} \frac{di_2'}{dt}; \\
 -R_2 i_2'' = r_2'' i_2'' + L_{21}'' \frac{di_1''}{dt} + L_{22}'' \frac{di_2''}{dt} + L_{23}'' \frac{di_3''}{dt} + \\
 + L_{24}'' \frac{di_4''}{dt} + L_{25}'' \frac{di_5''}{dt} + M_{12} \frac{di_1'}{dt} + M_{22} \frac{di_2'}{dt}; \\
 -R_3 i_3'' = r_3'' i_3'' + L_{31}'' \frac{di_1''}{dt} + L_{32}'' \frac{di_2''}{dt} + L_{33}'' \frac{di_3''}{dt} + \\
 + L_{34}'' \frac{di_4''}{dt} + L_{35}'' \frac{di_5''}{dt} + M_{13} \frac{di_1'}{dt} + M_{23} \frac{di_2'}{dt}; \\
 -R_4 i_4'' = r_4'' i_4'' + L_{41}'' \frac{di_1''}{dt} + L_{42}'' \frac{di_2''}{dt} + L_{43}'' \frac{di_3''}{dt} + \\
 + L_{44}'' \frac{di_4''}{dt} + L_{45}'' \frac{di_5''}{dt} + M_{14} \frac{di_1'}{dt} + M_{24} \frac{di_2'}{dt}; \\
 -R_5 i_5'' = r_5'' i_5'' + L_{51}'' \frac{di_1''}{dt} + L_{52}'' \frac{di_2''}{dt} + L_{53}'' \frac{di_3''}{dt} + \\
 + L_{54}'' \frac{di_4''}{dt} + L_{55}'' \frac{di_5''}{dt} + M_{15} \frac{di_1'}{dt} + M_{25} \frac{di_2'}{dt}.
 \end{cases} \quad (2)$$

В системе (2) обозначены величины: L'_{11}, \dots, L'_{22} – взаимные индуктивности между первичными обмотками, здесь цифрами в индексе указаны номера соответствующих первичных обмоток, поэтому L'_{12}, \dots, L'_{21} и т.д.; M_{11}, \dots, M_{25} – взаимные индуктивности между первичными и вторичными обмотками, здесь первая цифра в индексе – номер первичной обмотки, а вторая цифра – номер вторичной обмотки, поэтому $M_{12} \neq M_{21}$; $L''_{11}, \dots, L''_{55}$ – взаимные индуктивности между вторичными обмотками, причем $L''_{12} = L''_{21}$ и т.д.; U_1, U_2 – напряжения, прикладываемые к первичным обмоткам; $r'_1, r'_2, r''_1, \dots, r''_5$ – активные сопротивления первичных и вторичных обмоток соответственно; R_1, \dots, R_5 – активные сопротивления нагрузки на вторичных обмотках; $i'_1, i'_2, i''_1, \dots, i''_5$ – токи первичных и вторичных обмоток соответственно.

Расчет индуктивностей ТВМП можно осуществить теоретическими методами, представленными в источнике [10]. Для этих расчетов должны быть известны

геометрические размеры и электрофизические параметры сердечника и обмоток трансформатора. Далее на основе расчетных данных можно составить имитационную модель в среде *Simulink* и использовать для дальнейшего исследования.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Имитационная модель системы управления включает в себя три основных звена – ШИМ-преобразователь, двухфазно-пятифазный ТВМП и пятифазный НПЧ. ШИМ-преобразователь, модель которого представлена на **рис. 3**, реализован на полностью управляемых ключах T^1 - T^4 . Управляющие импульсы формируются блоком *pulse_shaper_1*. На **рис. 3** приведена модель 1 группы ключей. Управление ключами осуществляется по традиционному методу пересечения треугольного и синусоидального сигналов управления. Выходное напряжение ШИМ-преобразователя представлено на **рис. 4**.

Ограничение вычислительной возможности при компьютерном моделировании системы управления обусловило использовать масштабирование по частоте. В связи с этим моделирование результатов было осуществлено при частотах напряжения в 10 раз меньше – 5 Гц на входе НПЧ и 2,5 Гц на выходе НПЧ. Таким образом, частота вращения магнитного поля ТВМП равна также 5 Гц.

Выходное напряжение ШИМ-преобразователя 5 Гц поступает на вход первичных обмоток ТВМП и формирует вращающееся магнитное поле. Модель ТВМП (**рис. 5**) включает в себя датчики напряжений, подключенные к фазам вторичных обмоток трансформатора. Первичные обмотки трансформатора обозначены 1 и 2, вторичные обмотки – A, B, C, D, E . Датчики напряжений $U_1, U_2, UA, UB, UC, UD, UE$ и токов $I_1, I_2, IA, IB, IC, ID, IE$ измеряют мгновенные значения токов и напряжений первичных и вторичных обмоток ТВМП. Это позволяет исследовать вольт-амперные характеристики трансформатора при нагрузочном и холостом режимах. Расчетные значения индуктивностей внесены в блок *TWMP_MR*.

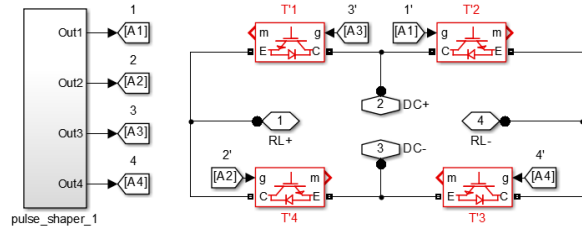


Рис. 3. Имитационная модель ШИМ-преобразователя

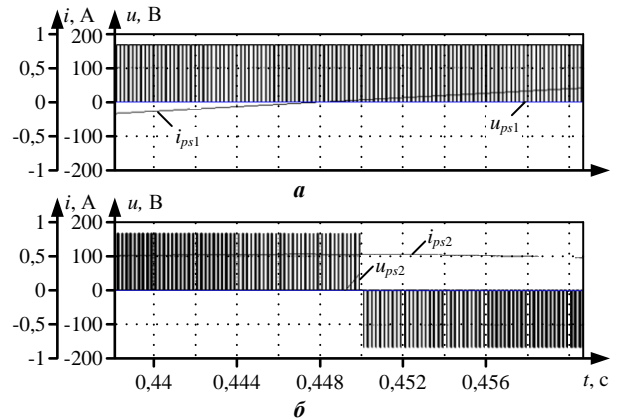


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения на выходе ШИМ-преобразователя: а – для первой обмотки ТВМП; б – для второй обмотки ТВМП (u_{ps1} – напряжение первой фазы, u_{ps2} – напряжение второй фазы, i_{ps1} – ток первой фазы, i_{ps2} – ток второй фазы)

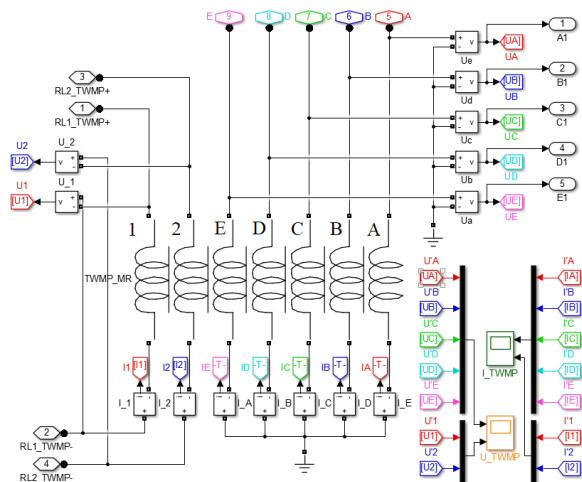


Рис. 5. Имитационная модель ТВМП

Выходы вторичных обмоток *A, B, C, D, E* подключаются к входам модели НПЧ, представленной на рис. 6. Вышеприведенная общая модель НПЧ состоит из трех пятифазных НПЧ, представленных в каждом блоке отдельно и подключенных к общему выходу ТВМП (7-11). Каждый из блоков (5fv2-1, 5fv2-2, 5fv2-3) представляет пятифазный НПЧ, формирующий одну фазу синусоидального напряжения.

Модель пятифазного НПЧ представлена на рис. 7 и отображает внутреннюю структуру блоков 5fv2-1, 5fv2-2, 5fv2-3. В каждом из трех таких блоков формируемое выходное синусоидальное напряжение сдвинуто на 120° относительно выходных напряжений других блоков. Таким образом, на выходах *A+, A-, B+, B-, C+, C-* комплексного пятифазно-трехфазного НПЧ (см. рис. 6) формируется трехфазное синусоидальное напряжение. Выходы такого пятифазно-трехфазного НПЧ подключаются к роторной трехфазной цепи МДП.

Исследование системы управления ШИМ-ТВМП-НПЧ осуществлялось на активно-индуктивную нагрузку непосредственным образом без применения емкостных фильтров. Это позволяет качественно провести гармонический анализ выходных напряжений трансформатора и НПЧ.

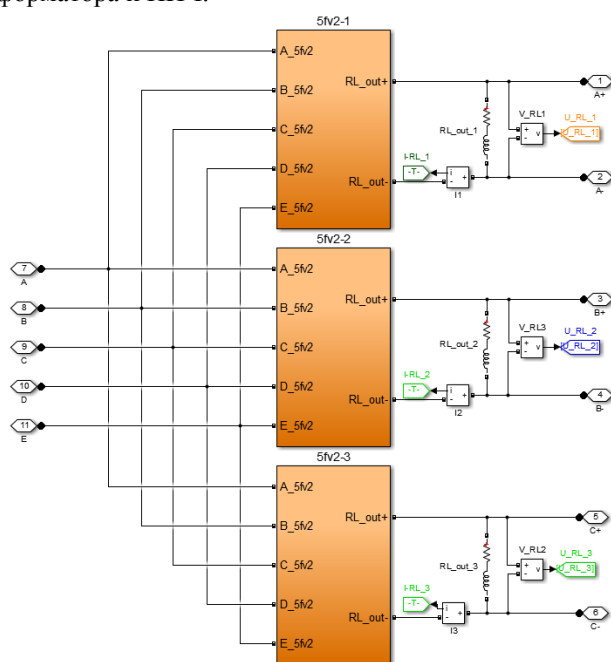


Рис. 6. Имитационная общая модель НПЧ

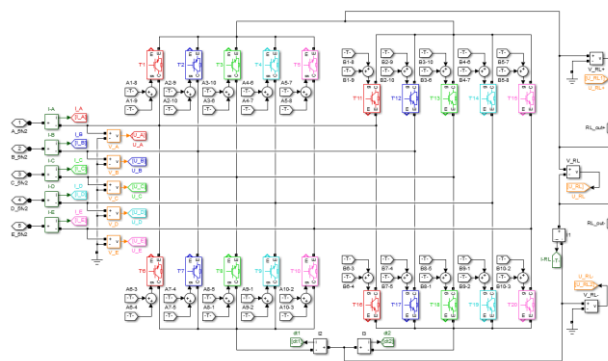


Рис. 7. Имитационная модель пятифазного НПЧ

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сравнительный гармонический анализ выходного напряжения осуществлялся между двумя системами. Первая система включает в себя пятифазно-трехфазный НПЧ, вход которого подключен к выходам двухфазно-трехфазного ТВМП, подключенного к сети постоянного напряжения через ШИМ-преобразователь (ШИМ-ТВМП-НПЧ). Вторая система – классическая, с использованием трехфазного НПЧ при питании от классического трехфазного трансформатора по системе (Т-НПЧ).

Следует отметить, что частота выходного напряжения НПЧ ограничивается на уровне 40% от частоты входного напряжения. При моделировании был взят уровень 50%, чтобы оценить стабильность работы исследуемой системы. На рис. 8 и 9 представлены осциллограммы токов и напряжений для первой и второй систем.

На рис. 8 и 9 обозначены u_A, u_B, u_C и i_A, i_B, i_C – выходные напряжения с блоков 5fv2-1, 5fv2-2, 5fv2-3 соответственно. Имитационная модель трехфазного НПЧ составлена аналогичным образом в виде трех блоков и классического трехфазного трансформатора. Гармонический анализ полученных результатов представлен в табл. 1 и 2.

За базовую гармонику взята гармоника питающего напряжения с частотой 2,5 Гц. Под уровнем гармоник подразумевается отношение амплитуды текущей гармоники к амплитуде базовой гармоники, выраженное в процентах. Фазовый сдвиг показывает сдвиг между текущей гармоникой и базовой.

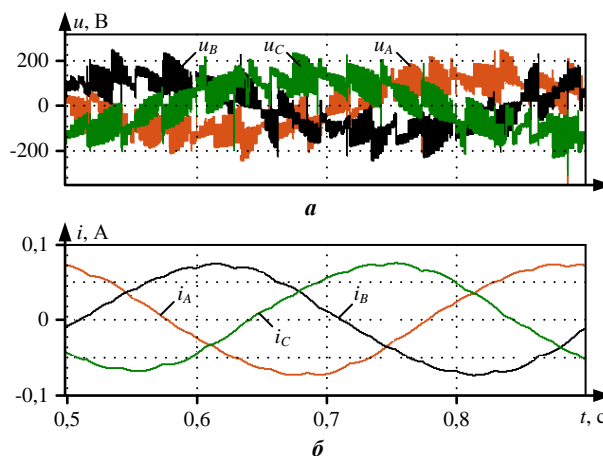


Рис. 8. Осциллограммы выходных токов и напряжений пятифазно-трехфазного НПЧ

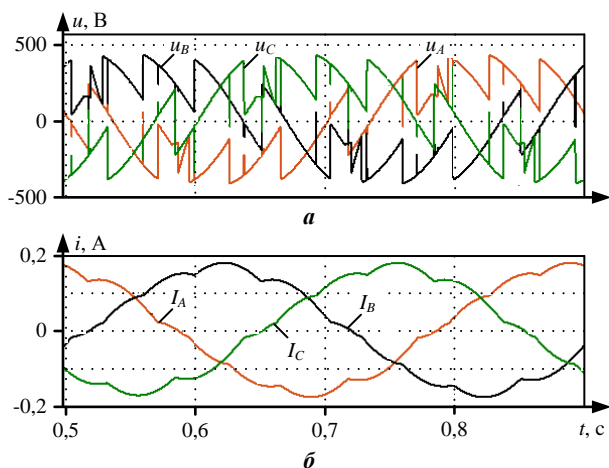


Рис. 9. Осциллограммы выходных токов и напряжений трехфазного НПЧ

Таблица 1

Результаты гармонического анализа кривой выходного напряжения u_A трехфазного НПЧ

Номер гармоники	Частота гармоники, Гц	Уровень гармоники по отношению к базовой, %	Фазовый сдвиг, град
0	0	0,01	270
1	2,5	100,00	69,7
2	5	0,01	-56,5
3	7,5	2,48	229,8
4	10	0,02	-66,1
5	12,5	4,52	208,7
6	15	0,02	-76,9
7	17,5	22,84	-27,4
8	20	0,01	259,5
9	22,5	27,74	113,4
10	25	0,00	76,7

Таблица 2

Результаты гармонического анализа кривой выходного напряжения u_A пятифазного НПЧ

Номер гармоники	Частота гармоники, Гц	Уровень гармоники по отношению к базовой, %	Фазовый сдвиг, град
0	0	0,01	270
1	2,5	100,00	69,7
2	5	0,13	-56,5
3	7,5	6,3	229,8
4	10	0,07	-66,1
5	12,5	1,52	208,7
6	15	0,04	-76,9
7	17,5	1,57	-27,4
8	20	0,04	259,5
9	22,5	2,14	113,4
10	25	0,05	76,7

Гармонический анализ результатов моделирования показывает, что для системы с пятифазным НПЧ уровень третьей гармоники кривой выходного напряжения в два с половиной раза выше, чем у системы с трехфазным НПЧ. Однако у трехфазного НПЧ наблюдается высокий уровень 5, 7, 9-й гармоник – 4,5, 23, 28% соответственно от базового уровня. В то время как уровень гармоник того же порядка у пятифазного НПЧ многократно ниже.

Коэффициент гармоник для системы с классическим трехфазным трансформатором и трехфазным НПЧ, рассчитанный на основании экспериментальных данных (см. табл. 1), равен $K_G = 0,36$. Коэффициент гармоник для системы с ТВМП и пятифазным НПЧ, рассчитанный на основании экспериментальных данных (см. табл. 2), равен $K_G = 0,07$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного можно утверждать, что использование НПЧ на базе ТВМП позволит:

- снизить массогабаритные показатели электропривода;
- расширить диапазон частот выходного напряжения НПЧ;
- обеспечить двусторонний свободный обмен энергии между источником питания и роторной цепью;
- снизить коэффициент гармоник выходного напряжения НПЧ, что скажется на улучшении энергетических показателей электропривода;
- путем выбора конкретной фазности вторичной цепи ТВМП воздействовать на уровень соответствующей гармоники кривой выходного напряжения НПЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов О.И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод. М.: Издательство МЭИ, 2004. 80 с.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 272 с.
3. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе / Бернштейн А.Я., Гусяцкий Ю.М., Кудрявцев А.В., Сарбатов Р.С. М.: Энергия, 1980. 328 с.
4. Хватов О.С., Тарпанов И.А., Кобяков Д.С. Дизель-генераторная электростанция с вентильным генератором по схеме машины двойного питания // Вестник Астраханского государственного технического университета. Морская техника и технология. 2020. № 3. С. 82-90. doi: 10.24143/2073-1574-2020-3-82-90
5. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: Энергоатомиздат, 1984. 192 с.
6. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемая машина переменного тока. М.: Наука, 1969. 140 с.
7. Фираго Б.И., Готовский Б.С., Лисс З.А. Тиристорные циклоконвертеры. М.: Наука и техника, 1973. 296 с.
8. Pat. CN104103412A, IPC H01F27/08, H01F27/28. Polyphase transformer adopting rotating magnetic field principle / Yueliang Y., Zhou Y.; Shanghai wind new energy technology co ltd, applic. 01.04.13, public. 15.10.14, pp. 5.
9. Pat. CN108987080A, IPC H01F27/29; H01F38/18. Rotating magnetic field power transformer / Jiancheng B., Leitao S., Saixia W., Miao Z.; applic. 30.07.18, public. 11.12.18, pp. 7.
10. Цейтлин Л.А., Калатаров П.Л. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. 488 с.

Поступила в редакцию 24 января 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTRIC DRIVE BASED ON DUAL-POWER MACHINES WITH IMPROVED ENERGY CHARACTERISTICS

Vyacheslav A. Solovyev

D.Sc. (Engineering), Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, epapu@knastu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7930-0601>

Mikhail E. Dubovik

Postgraduate student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, mihail.dubovik@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7092-1409>

One of the priority directions in the development of power engineering is to increase energy efficiency in electrical systems, in particular, in AC electric drives. An increase in the efficiency coefficient as well as a decrease in the weight and size indicators of high-power electric drive systems lead to a significant reduction in capital costs. To date, a lot of research and development of energy-efficient electric drive systems is underway. The article suggests an alternative method of implementing an alternating current electric drive based on a dual-power machine (DPM) with a direct frequency converter (DFC). The article describes the main elements of the electric drive under consideration, justifies the decision to use an alternative implementation of a frequency converter based on an DFC and a PWM converter with an intermediate link. The authors proposed and considered the possibility of using a transformer with a rotating magnetic field (RMF) The article describes the main elements of the electric drive under consideration, justifies the decision to use an alternative implementation of a frequency converter based on an DFC and a PS converter with an intermediate link. The authors proposed and considered the possibility of using a transformer with a rotating magnetic field (RMF) as such an intermediate. A functional diagram of such an electric drive is presented, on the basis of which a simulation model is built in Simulink. For a comparative analysis, a control system simulation with a three-phase DFC and a system with a DFC based on RMF was performed. Based on the simulation results, a harmonic analysis of the output voltage of the frequency converter was carried out. In conclusion, the main advantages of such an electric drive over the classical variants are presented.

Keywords: dual power machine, amplitude of the rotor voltage vector, dynamic mode, dual power machine stability.

REFERENCES

1. Osipov O.I. *Chastotno-reguliruemiy asinkhronnyy elektro-*

privod [Frequency-controlled asynchronous electric drive]. Moscow, Publishing house of MPEI, 2004. 80 p. (In Russian)

2. Sokolovsky G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [Alternating current electric drives with frequency control]. Moscow, Academy Publ., 2006. 272 p. (In Russian)

3. Bernstein A.Ya., Gusyatsky Yu.M., Kudryavtsev A.V., Sarbatov R.S. *Tiristornyye preobrazovateli chastoty v elektroprivode* [Thyristor frequency converters in an electric drive]. Moscow, Energiya Pbl., 1980. 328 p. (In Russian)

4. Khvatov O.S., Tarpanov I.A., Kobayakov D.S. Diesel generator power plant with a valve generator according to the scheme of a dual-power machine. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Marine engineering and technology], 2020, no. 3, pp. 82-90. doi: 10.24143/2073-1574-2020-3-82-90 (In Russian)

5. Shakaryan Yu. G. *Asynkhronizirovannyye sinkhronnyye mashiny* [Asynchronous synchronous machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 192 p. (In Russian)

6. Botvinnik M.M., Shakaryan Yu.G. *Upravlyayemaya mashina peremennogo toka* [Controlled alternating current machine]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 140 p. (In Russian)

7. Firago B.I., Gotovsky B.S., Liss Z.A. *Tiristornyye tsiklokonvertory* [Thyristor cycloconverters]. Moscow, Science and Technology Publ., 1973. 296 p. (In Russian)

8. Yueliang Y., Zhou Y.; Polyphase transforme radopting rotating magnetic field principle. Pat. CN104103412A, IPCH01F27/08, H01F27/28.

9. Jiancheng B., Leitao S., Caixia W., Miao Z. Rotating magnetic field power transformer. Pat. CN108987080A, IPC H01F27/29; H01F38/18.

10. Tseitlin L.A., Kalantarov P.L. *Raschet induktivnostey* [Calculation of inductances]. Leningrad, Energoatomizdat. Leningrad Publishing House, 1986. 488 p. (In Russian)

Соловьев В.А., Дубовик М.Е. Электропривод на базе машины двойного питания с улучшенными энергетическими характеристиками // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 4-9. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-4-9](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-4-9)

Solovyev V.A., Dubovik M.E. Electric Drive Based on Dual-Power Machines with Improved Energy Characteristics. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekxy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 4-9. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-4-9](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-4-9)