

УДК 621.314.5:629.423

ЯГУП В. Г., д. т. н., профессор (ХНУГХ имени А. Н. Бекетова),
КРАСНОВ А. А. (ПІИЖТ ПАО «Укрзалізниця»),
БОЖКО В. В., к. т. н., с. н. с. (ПІИЖТ ПАО «Укрзалізниця»)

Энергетические характеристики однофазного активного выпрямителя тока при синусоидальной и трапецеидальной широтно-импульсной модуляции

Повышение коэффициента мощности электровоза переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями может быть достигнуто применением тяговых преобразователей на полностью управляемых полупроводниковых приборах. В статье разработана силовая схема и исследована работа активного выпрямителя тока при синусоидальной и трапецеидальной широтно-импульсной модуляции. Результаты компьютерного моделирования показали, что коэффициент мощности активного выпрямителя составляет до 0,99 при низком коэффициенте искажения синусоидальности кривой питающего напряжения (до 1,7 %).

Ключевые слова: электровоз переменного тока, активный выпрямитель тока, коэффициент мощности, широтно-импульсная модуляция.

Введение

В настоящее время на электрическом транспорте с питанием от контактной сети переменного тока основным типом тягового электродвигателя (ТЭД) остается коллекторный двигатель постоянного тока. Питание ТЭД осуществляется от диодных или тиристорных тяговых преобразователей со ступенчатым или зонно-фазовым регулированием выпрямленного напряжения. Большое реактивное сопротивление системы электроснабжения и процессы коммутации в преобразователях обуславливают низкий коэффициент мощности электровоза, например: для электровозов ВЛ80С в режиме тяги его величина составляет 0,866, а для электровозов 2ЭС5К, 2ЕЛ5 — 0,84 [1].

При зонно-фазовом регулировании сдвиг первой гармоники тока электровоза относительно напряжения на токоприемнике зависит от реактивного сопротивления тяговой сети и электровоза и пропорционален углу регулирования тиристоров. Кроме того, тиристорные тяговые преобразователи генерируют гармоники частотой 150...1000 Гц, а в результате переходных процессов в системе «контактная сеть — электровоз» возникают высокочастотные колебания напряжения на токоприемнике электровоза, которые имеют частоту 750...1950 Гц [2]. На уменьшение коэффициента мощности значительное влияние оказывают также искажения кривой потребляемого тока электровоза [3]. Все эти факторы способствуют снижению качества электроэнергетики в тяговой сети.

Анализ последних исследований и публикаций

Для электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К разработан четырехзонный выпрямительно-инверторный преобразователь на IGBT-транзисторах с зонно-фазовым регулированием напряжения [4]. Результаты моделирования показали, что коэффициент мощности электровоза в режиме тяги для такого преобразователя составляет не менее 0,95. Однако, как видно из осциллограмм, представленных в работе [4], форма тока электровоза по-прежнему приближается к прямоугольной и имеет высокочастотные гармонические составляющие, что, несомненно, снижает общий коэффициент мощности преобразователя.

Известно, что для питания потребителей, имеющих свойства источника тока (автономные инверторы тока, двигатели постоянного тока и др.) используют активные выпрямители тока (АВТ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [5]. Система управления АВТ может быть построена на принципах контроля фазового сдвига между входным напряжением и током выпрямителя, а также коррекции формы тока, потребляемого электровозом [6]. Входными сигналами системы управления являются напряжение источника питания, выпрямленное напряжение, заданное и фактическое значение выпрямленного тока [7]. Для подавления низкочастотных гармоник тока в работе [8] предложено использовать блок компенсации высших гармоник и два ПИ-регулятора: тока нагрузки и фазового сдвига. Эти элементы формируют сигнал задания для блока ШИМ. Частота переключения IGBT-транзисторов выбрана 2000 Гц. В источнике [9] исследована работа АВТ при скачкообразном

изменении нагрузки. В работе [10] получены регулировочные характеристики для однофазной нулевой и мостовой схем АВТ. Отметим, что в этих работах АВТ рассматривался в основном как активный фильтр, а особенности его работы как регулятора выпрямленного напряжения и показатели качества электроэнергии при нагрузках, отличающихся от номинальной, остались неисследованными.

Цели и задачи исследования

Целью данной статьи является разработка силовой схемы однофазного активного выпрямителя тока для регулирования напряжения тягового двигателя при синусоидальной (СинШИМ) и трапецеидальной (ТрШИМ) широтно-импульсной модуляции, а также оценка энергетических характеристик предложенного выпрямителя при изменении коэффициента модуляции.

Основная часть исследования

Схема замещения однофазного активного выпрямителя тока представлена на рис. 1. Ключи АВТ *K1-K4* полностью управляемые, с односторонней проводимостью тока. Каждый ключ состоит из

последовательно соединенных IGBT-транзистора и диода. В отличие от известных решений в работах [4-10], схему предлагается дополнить нулевым диодом *VD0*, что позволит повысить выпрямленное напряжение АВТ и несколько увеличить коэффициент мощности. Такой преобразователь может работать как в выпрямительном, так и в инверторном режиме, а фазовый сдвиг тока АВТ относительно питающего напряжения может быть как отстающим, так и опережающим. В данной работе выполнено моделирование АВТ в выпрямительном режиме.

На схеме (рис. 1) обозначены: e_s, L_s, r_s — соответственно, эквивалентные э. д. с., индуктивность и активное сопротивление сети переменного тока; L_1, r_1, L_2, r_2 , — индуктивность и активное сопротивление первичной и вторичной обмотки трансформатора; M_{12} — взаимоиנדуктивность между первичной и вторичной обмоткой трансформатора; i_1, i_2 — токи обмоток трансформатора; i_v — входной ток АВТ; C — емкость входного фильтра; u_c, i_c — напряжение и ток входного фильтра; E_d, L_d, r_d — эквивалентные э. д. с., индуктивность и активное сопротивление цепи выпрямленного тока; i_d — выпрямленный ток.

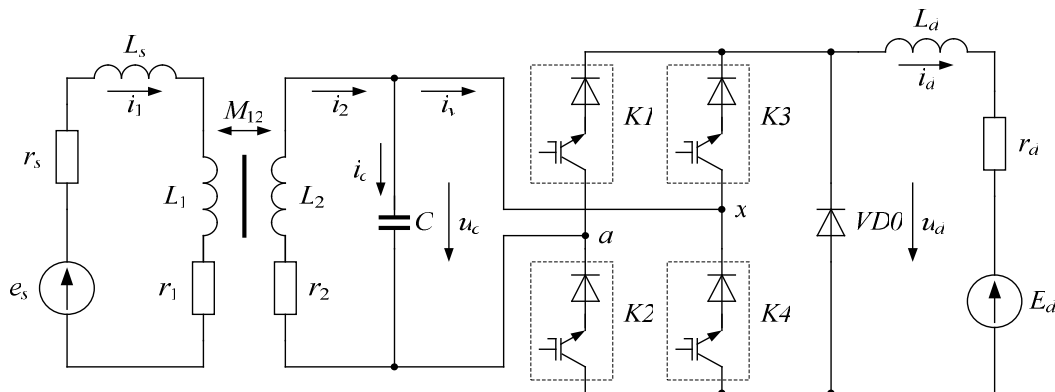


Рис. 1. Схема замещения однофазного активного выпрямителя тока

В режиме выпрямления для расчетной схемы АВТ справедлива следующая система уравнений:

$$\begin{aligned}
 e_s &= \sqrt{2}E_s \cdot \sin\omega t; \\
 (L_s + L_1) \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + (r_s + r_1)i_1 - e_s &= 0; \\
 L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} + r_2i_2 + u_c &= 0; \\
 -S^* u_c + L_d \frac{di_d}{dt} + r_d i_d + E_d &= 0; \\
 \frac{du_c}{dt} &= \frac{1}{C} i_c; \\
 i_v &= S^* i_d; \\
 i_2 - i_c - i_v &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Состояние ключей АВТ определяется коммутационной функцией единичной амплитуды:

$$S^* = \begin{cases} (s_1^* = 1) \wedge (s_4^* = 1) \rightarrow 1 \\ (s_2^* = 1) \wedge (s_3^* = 1) \rightarrow -1 \\ (s_1^* = 0) \wedge (s_2^* = 0) \wedge (s_3^* = 0) \wedge (s_4^* = 0) \rightarrow 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где $s_1^* - s_4^*$ — коммутационные функции ключей АВТ.

Мгновенное значение выпрямленного напряжения также зависит от состояния ключей АВТ

$$u_d = S^* u_c. \quad (3)$$

Функциональная схема системы управления АВТ представлена на рис. 2, а диаграммы формирования импульсов ШИМ — на рис. 3. Импульсы управления IGBT-транзисторами формируются в моменты равенства модулирующего сигнала $\mu \times u_m$ (μ — коэффициент модуляции) синусоидальной или трапецеидальной формы и опорного пилообразного сигнала $u_{оп}$ с тактовой частотой модуляции f_m . В модели принята однополярная форма модулирующего и опорного сигналов (рис. 3). Для распределения импульсов в системе управления используется контроль знака напряжения u_2 .

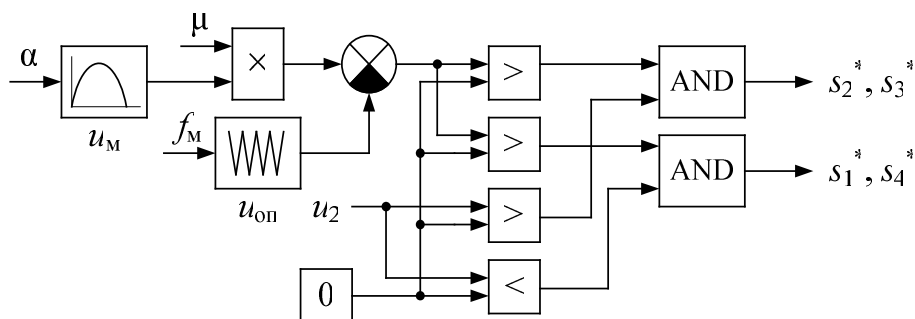


Рис. 2. Функциональная схема системы управления АВТ

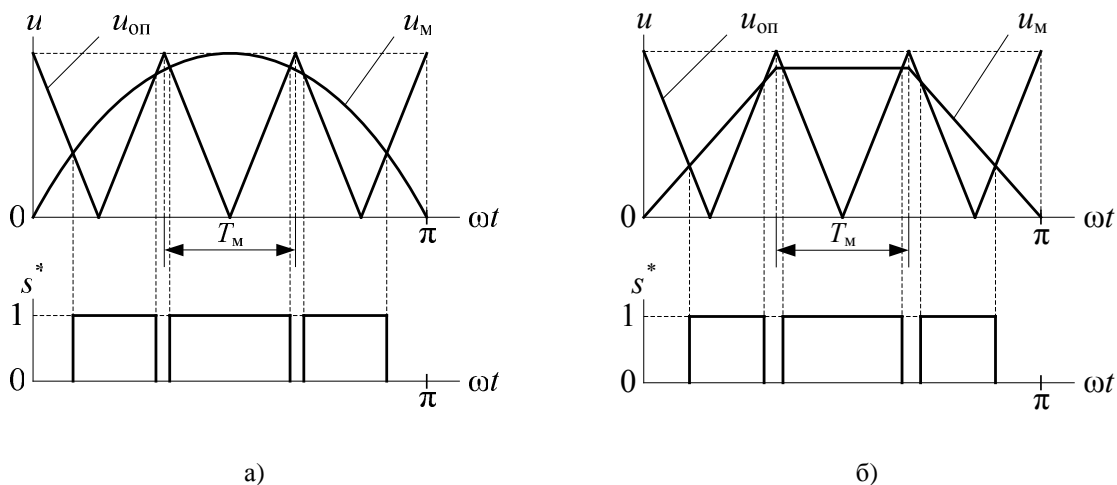


Рис. 3. Диаграммы формирования импульсов при синусоидальной (а) и трапецеидальной (б) ШИМ

Синусоидальный модулирующий и опорный пилообразный сигналы можно определить по формулам:

$$u_m(t) = \mu |U_m \sin(\omega t - \alpha)|; \quad (4)$$

$$u_{оп}(t) = \frac{U_{оп}}{\pi} \left| \arcsin \left[\sin \left(\frac{\omega_M}{2} t + \frac{\pi}{2} \right) \right] \right|, \quad (5)$$

где $U_m, U_{оп}$ — соответственно, амплитуда модулирующего и опорного сигналов, В; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота сети, рад/с ($f = 50$ Гц); $\omega_M = 2\pi f_m$ —

угловая частота модуляции, рад/с; α — фаза модулирующего сигнала; μ — коэффициент модуляции.

Трапецеидальный модулирующий сигнал:

$$u_M(t) = \begin{cases} 0; & (\omega t - \alpha) = 0 \\ \mu U_M; & \pi/3 \leq (\omega t - \alpha) \leq 2\pi/3 \\ 0; & (\omega t - \alpha) = \pi \end{cases} \quad (6)$$

Коммутационные функции $s_1^* - s_4^*$ ключей АВТ:

$$s_2^* = s_3^* = \begin{cases} (u_2 > 0) \wedge (u_M - u_{оп} > 0) \rightarrow 1; \\ (u_2 > 0) \wedge (u_M - u_{оп} \leq 0) \rightarrow 0 \end{cases}; \quad (7)$$

$$s_1^* = s_4^* = \begin{cases} (u_2 < 0) \wedge (u_M - u_{оп} < 0) \rightarrow 1; \\ (u_2 < 0) \wedge (u_M - u_{оп} \geq 0) \rightarrow 0 \end{cases}. \quad (8)$$

Регулирование выпрямленного напряжения АВТ осуществляется изменением коэффициента модуляции μ , а управление фазовым сдвигом тока i_1 относительно напряжения u_1 достигается изменением фазы модулирующего сигнала α .

Уравнения (1)-(8) являются математической моделью активного выпрямителя тока. Для решения этих уравнений разработана MATLAB-модель, представленная на рис. 4. Основными элементами модели являются блоки тягового трансформатора *ТТ*, входного фильтра *Сf*, активного выпрямителя тока *ACSR* и э. д. с. тягового двигателя *Ed*. Модель системы управления состоит из блоков формирования модулирующего напряжения *U_mod*, опорного напряжения *U_op*, синусоидального сигнала *U_sinhr*, синхронизированного с напряжением сети, операторов сравнения «>», «<» и логических элементов *AND*. Входными сигналами системы управления являются частота ШИМ *F_mod*, коэффициент модуляции *M*, фазовый сдвиг модулирующего напряжения *a*, а выходными — импульсные сигналы управления IGBT-транзисторами *S01*, *S02*.

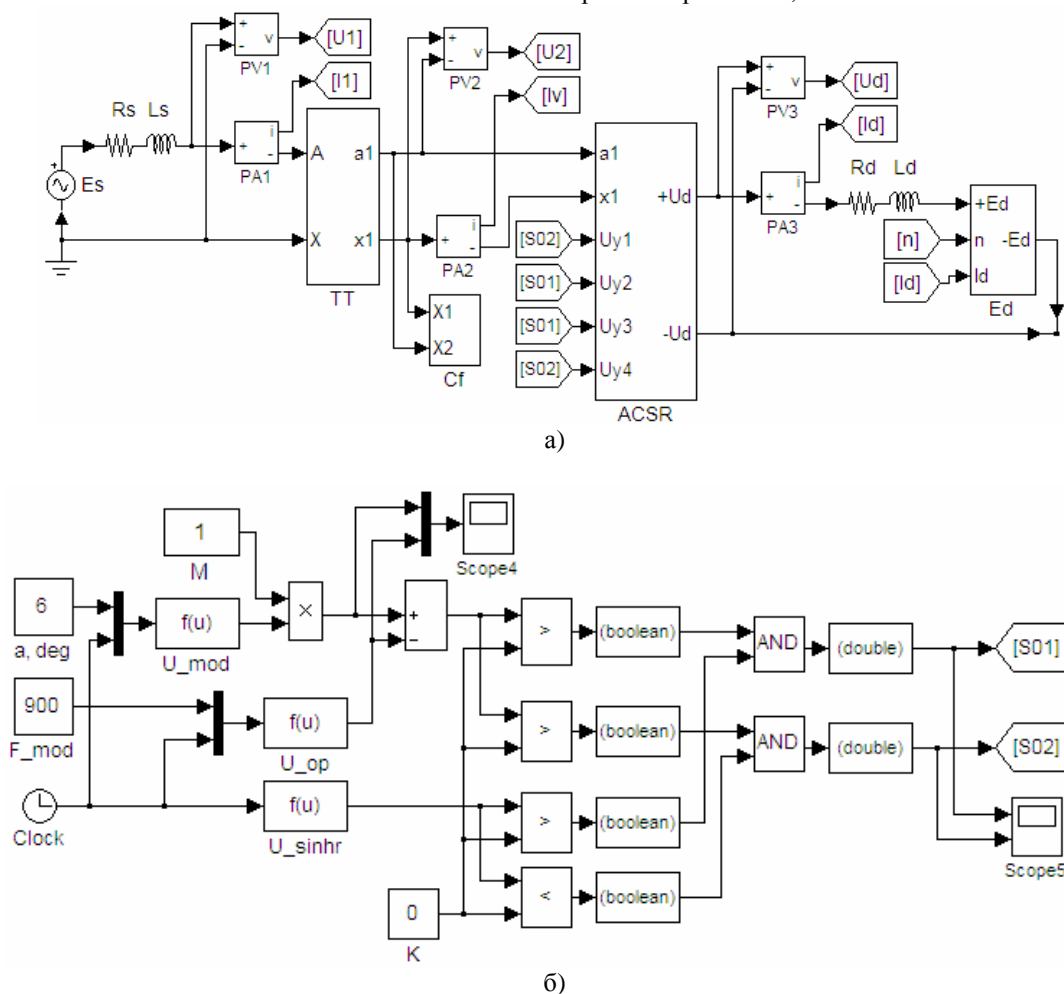


Рис. 4. Модель силовой части активного выпрямителя тока в MATLAB (а) и его системы управления (б)

Параметры модели выбраны для следующих условий: тяговая подстанция с трансформатором мощностью 40 МВ·А, длина участка контактной сети 10 км, мощность тягового трансформатора 4,35 МВ·А, при питании от АВТ одного тягового двигателя ДТК-820 электропоездов 2ЭЛ5. Параметры питающей сети: $E_s = 25000$ В; $L_s = 0,022922$ Гн; $r_s = 1,7597$ Ом. Параметры трансформатора и фильтра: $L_1 = 57,278573$ Гн; $r_1 = 0,314$ Ом; $U_2 = 1260$ В; $L_2 = 0,145497$ Гн; $r_2 = 0,00351$ Ом; $M_{12} = 2,882512$ Гн; $C = 360 \cdot 10^{-6}$ Ф. Параметры цепи выпрямленного тока: $L_d = 0,00957$ Гн; $r_d = 0,084174$ Ом. Э. д. с. двигателя E_d рассчитывалась в зависимости от магнитного потока и скорости движения электропоезда [11]. Электромагнитные процессы в АВТ исследованы при двух значениях частоты модуляции — 900 Гц и 1200 Гц; пределы изменения коэффициента модуляции — $\mu = 0,2 \dots 1$.

В качестве критериев эффективности АВТ, которые определялись при виртуальных экспериментах, выбраны следующие показатели: величина выпрямленного напряжения (U_d , В), коэффициент мощности (K_M), измеряемый на зажимах первичной обмотки трансформатора, коэффициент

искажения синусоидальности кривой напряжения u_1 (K_U , %) и коэффициент искажения синусоидальности кривой тока i_1 (K_I , %).

Расчет коэффициента мощности K_M производился по формуле

$$K_M = \left(\int_0^T u_1 i_1 dt \right) / \sqrt{\left(\int_0^T u_1^2 dt \right) \left(\int_0^T i_1^2 dt \right)}. \quad (9)$$

На рис. 5 представлены осциллограммы электромагнитных процессов в АВТ при синусоидальной ШИМ, а на рис. 6 — при трапецидальной ШИМ. В обоих случаях кривые выпрямленного напряжения имеют форму последовательности импульсов положительной полярности, что объясняется наличием в схеме АВТ нулевого диода V_{D0} . Напряжение u_1 на зажимах первичной обмотки трансформатора практически синусоидально, а ток i_1 является несинусоидальным и имеет близкий к нулю фазовый сдвиг относительно напряжения u_1 .

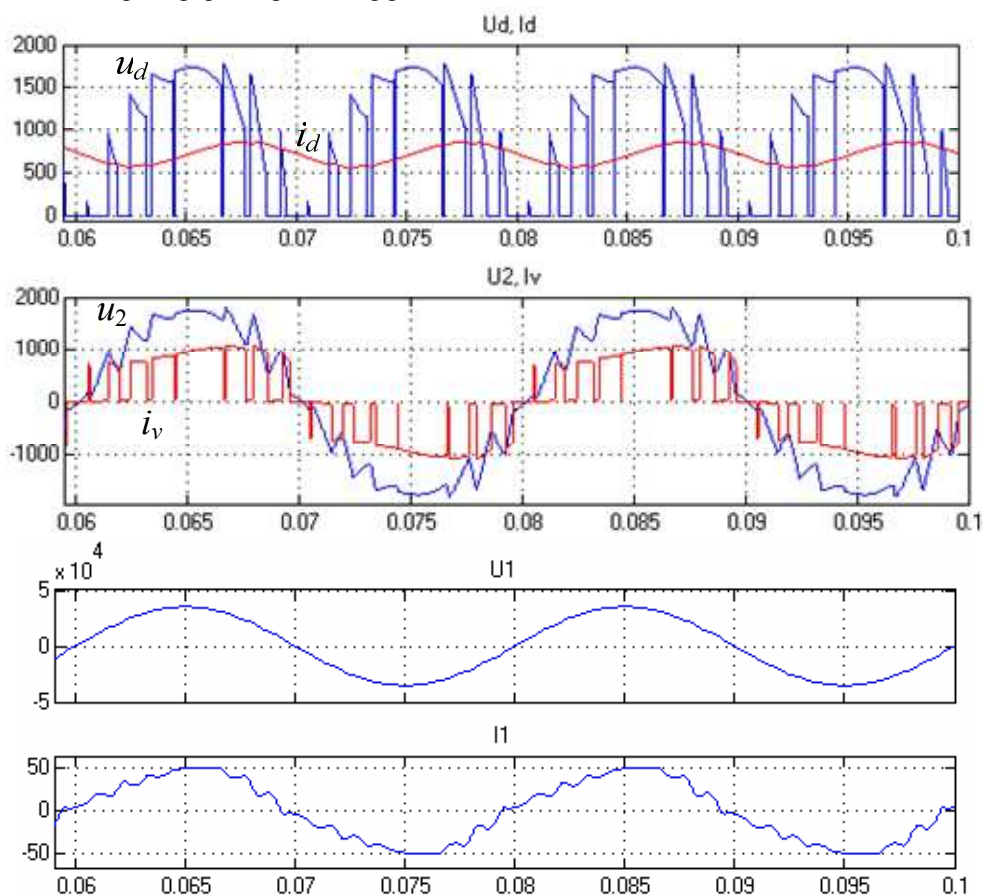


Рис. 5. Электромагнитные процессы в АВТ: СинШИМ; $f_m = 900$ Гц; $\mu = 1$

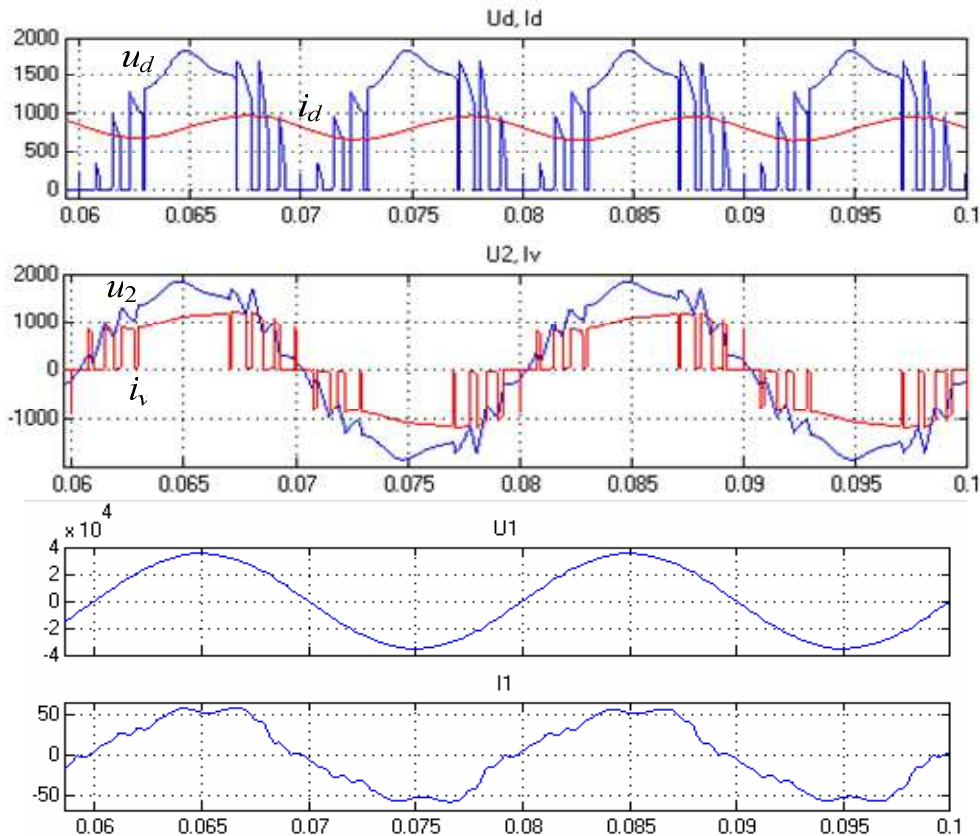


Рис. 6. Електромагнітні процеси в АВТ: ТрШІМ; $f_m = 900$ Гц; $\mu = 1$

В табл. 1-4 представлені результати комп'ютерного моделювання АВТ. Для початку порівняємо вибрані алгоритми ШІМ за залежності відносного значення випрямленого напруги U_d/U_{d0} ($U_{d0} = 1134$ В — номінальне значення середнього випрямленого напруги неуправляемого випрямителя) від коефіцієнта модуляції. Нетрудно побачити, що ця залежність є лінійною, а вибрані алгоритми ШІМ за цим критерієм практично не відрізняються. Разом з тим, максимальне значення U_d/U_{d0} для АВТ не перевищує 0,78 (СинШІМ) і 0,82 (ТрШІМ), що означає недо використання тягового трансформатора за напругою. Таке недо використання є об'єктивною платою за більш високим коефіцієнтом потужності і покращеним гармонічним складом напруги, за порівнянням з тиристорним випрямлячем. Для отримання більш високих значень U_d необхідно переводити АВТ в режим супермодуляції ($\mu > 1$), однак це є темою окремого дослідження.

Таблиця 1

Результати моделювання АВТ (синусоїдальна ШІМ, 900 Гц)

ν , км/ч	μ	α , град	U_d , В	K_M	K_U , %	K_I , %	U_d/U_{d0}
30	0,2	15	174	0,613	0,38	12,19	0,15
35	0,4	10	351	0,864	0,85	19,42	0,31
40	0,6	9	527	0,960	1,26	19,09	0,46
45	0,8	8	704	0,986	1,44	15,77	0,62
50	1,0	6	879	0,991	1,46	13,27	0,78

Таблиця 2

Результати моделювання АВТ (синусоїдальна ШІМ, 1200 Гц)

ν , км/ч	μ	α , град	U_d , В	K_M	K_U , %	K_I , %	U_d/U_{d0}
30	0,2	15	174	0,615	0,27	9,12	0,15
35	0,4	10	353	0,871	0,59	13,21	0,31
40	0,6	9	529	0,967	0,88	13,56	0,47
45	0,8	8	704	0,991	0,99	11,98	0,62
50	1,0	6	880	0,994	1,00	10,97	0,78

Таблиця 3
Результаты моделирования АВТ
(трапецидальная ШИМ, 900 Гц)

ν , км/ч	μ	α , град	U_d , В	K_M	K_U , %	K_I , %	U_d/U_{d0}
30	0,2	10	184	0,627	0,41	12,50	0,16
35	0,4	8	371	0,872	0,93	20,96	0,33
40	0,6	6	560	0,955	1,39	21,80	0,49
45	0,8	4	742	0,979	1,55	18,02	0,65
50	1,0	2	922	0,987	1,65	15,24	0,81

Таблиця 4
Результаты моделирования АВТ
(трапецидальная ШИМ, 1200 Гц)

ν , км/ч	μ	α , град	U_d , В	K_M	K_U , %	K_I , %	U_d/U_{d0}
30	0,2	10	185	0,631	0,29	8,82	0,16
35	0,4	8	372	0,882	0,65	14,98	0,33
40	0,6	6	559	0,963	0,98	16,80	0,49
45	0,8	4	744	0,983	1,15	16,01	0,66
50	1,0	2	925	0,989	1,26	14,27	0,82

Коэффициент мощности АВТ как при СинШИМ, так и при ТрШИМ изменяется в пределах 0,6...0,99 независимо от частоты модуляции, причем его значение более 0,9 обеспечивается при коэффициенте модуляции $\mu \geq 0,5$. Поэтому для обеспечения низкого уровня потребления реактивной мощности при любых нагрузках преобразователь реального электровоза можно выполнить многозонным, при этом регулирование выпрямленного напряжения с $\mu \leq 0,5$ использовать только в кратковременных режимах работы. По итогам экспериментов определим средний коэффициент мощности K_{MC} во всем диапазоне регулирования:

$$K_{MC} = \left(\sum_{j=1}^m K_{Mj} \right) / m, \quad (10)$$

где $j = 1...m$ — номер опыта; m — количество измерений.

По данным табл. 1 - 4 средний коэффициент мощности составил: $K_{MC} = 0,883$ (синусоидальная ШИМ, 900 Гц), $K_{MC} = 0,888$ (синусоидальная ШИМ,

1200 Гц), $K_{MC} = 0,884$ (трапецидальная ШИМ, 900 Гц), $K_{MC} = 0,890$ (трапецидальная ШИМ, 1200 Гц).

По результатам экспериментов получены зависимости коэффициентов искажения синусоидальности напряжения (рис. 7) и тока (рис. 8) первичной обмотки трансформатора от коэффициента модуляции. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U при частоте 900 Гц не превышает 1,7 %, а при частоте 1200 Гц — не более 1,4 %; он возрастает при увеличении коэффициента модуляции и уменьшается при увеличении частоты ШИМ.

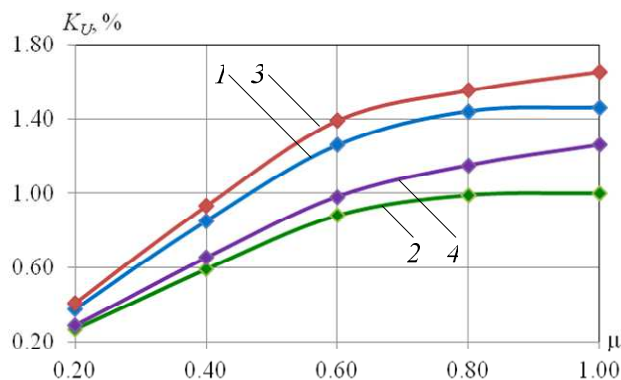


Рис. 7. Зависимость коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения первичной обмотки трансформатора от коэффициента модуляции: 1 — СинШИМ, 900 Гц; 2 — СинШИМ, 1200 Гц; 3 — ТрШИМ, 900 Гц; 4 — ТрШИМ, 1200 Гц

Результаты экспериментов показали, что коэффициент искажения синусоидальности кривой тока i_1 достигает максимального значения в режимах, когда длительность импульса и паузы приблизительно равны, т. е. при $\mu \approx 0,5...0,6$. Обеспечение приемлемого качества входного тока АВТ может быть достигнуто подключением на его входе активного фильтра или применением модифицированных алгоритмов ШИМ. Поскольку несинусоидальная форма потребляемого тока снижает коэффициент мощности преобразователя, задача поиска наиболее рационального решения этой проблемы остается актуальной.

Из данных табл. 1 - 4 также видно, что при синусоидальной ШИМ искажения синусоидальности кривых напряжения u_1 и тока i_1 несколько ниже, чем при трапецидальной. Отличия двух алгоритмов ШИМ по коэффициенту мощности и коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения не являются столь значительными. В то же время при трапецидальной ШИМ отмечено более высокое (на 5 %) значение выпрямленного напряжения, а значит, недоиспользование тягового трансформатора

электровоза по напряжению будет меньше, чем при синусоидальной ШИМ. С этой точки зрения трапецеидальную ШИМ можно считать более предпочтительным алгоритмом управления активным выпрямителем тока при работе на тяговую нагрузку.

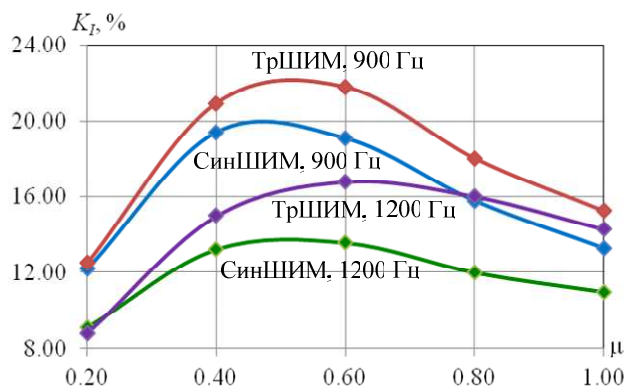


Рис. 8. Зависимость коэффициента искажения синусоидальности кривой тока первичной обмотки трансформатора от коэффициента модуляции

Выводы

Результаты компьютерного моделирования активного выпрямителя тока показали, что коэффициент мощности на его входе, как при синусоидальной, так и при трапецеидальной ШИМ, составляет до 0,99 и повышается при увеличении частоты модуляции. Коэффициент искажения синусоидальности кривой питающего напряжения при частоте модуляции 900 Гц не превышает 1,7 %, а при частоте 1200 Гц — 1,4 %. Отличия рассмотренных алгоритмов ШИМ по этим двум критериям являются незначительными. Однако с точки зрения величины выпрямленного напряжения более предпочтительным алгоритмом является трапецеидальная ШИМ. Направлением дальнейших исследований является анализ электромагнитных процессов и оценка энергоэффективности работы АВТ в режиме сверхмодуляции.

Список использованных источников

1. Фошкина, Н. В. Применение компенсатора реактивной мощности на электровозе ЗЭС5К [Текст] / Н. В. Фошкина, В. М. Малышев, И. Л. Козловский // Вестник ВЭЛНИИ. — 2010. — № 2 (60). — С. 37-42.
2. Власьевский, С. В. Улучшение формы напряжения контактной сети при работе электровозов с тиристорными преобразователями [Текст] / С. В. Власьевский, В. Г. Скорик, О. В. Мельниченко // Вестник ВНИИЖТ. — 2007. — № 5. — С. 42-47.

3. Кулинич, Ю. М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения [Текст]: монография / Ю. М. Кулинич. — Хабаровск: ДВГУПС, 2001. — 153 с.
4. Яговкин, Д. А. Разработка математической модели выпрямительно-инверторного преобразователя на IGBT-транзисторах для электровоза переменного тока и его блока управления в режиме тяги [Текст] / Д. А. Яговкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2015. — № 3 (47). — С. 197-202.
5. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты [Текст] / Р. Т. Шрейнер. — Екатеринбург: УРО РАН, 2000. — 654 с.
6. Michalik, J. Single Phase Current-Source Active Rectifier For Traction: Control System Design And Practical Problems [Text] / J. Michalik, J. Molnar, Z. Peroutka // Advances in Electrical and Electronic Engineering, North America, 5, jun. 2011. — P. 86-89.
7. Michalik, J. Active Suppression of Low-Frequency Disturbances on AC side of Traction Active Current-Source Rectifier [Text] / J. Michalik, J. Molnar, Z. Peroutka // IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Glendale, AZ, USA. 7-10 Nov. 2010. — P. 339-344.
8. Michalik, J. Active Elimination of Low-Frequency Harmonics of Traction Current-Source Active Rectifier [Text] / J. Michalik, J. Molnar, Z. Peroutka. // Transactions on Electrical Engineering, Vol. 1 (2012), No. 1. — P. 30-35.
9. Michalik, J. Behavior of Active Current Source Rectifier under Critical Transient Conditions in Traction [Text] / J. Michalik, J. Molnar, Z. Peroutka // 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, Novi Sad, Serbia, 2012.
10. Ефимов, А. А. Регулировочные характеристики активных однофазных преобразователей тока [Текст] / А. А. Ефимов, С. Ю. Мельников // Завалишинские чтения: сб. докл. — СПб.: ГУАП, 2016. — С. 114-119.
11. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст]: монография. В 2 т. / Г. К. Гетьман. — Днепропетровск: Изд-во Маковецький, 2011. — Т. 1. — 456 с.

Ягуп В. Г., Краснов О. О., Божко В. В. Енергетичні характеристики однофазного активного випрямляча струму при синусоїдальній і трапецеїдальній широтно-імпульсній модуляції. Підвищення коефіцієнта потужності електровоза змінного струму з колекторними тяговими двигунами

може бути досягнуто застосуванням тягових перетворювачів на повністю керованих напівпровідникових приладах. У статті розроблено силову схему та досліджено роботу активного випрямляча струму при синусоїдальній та трапецеїдальній широтно-імпульсній модуляції. Результати комп'ютерного моделювання показали, що коефіцієнт потужності такого випрямляча складає до 0,99 при низькому коефіцієнті спотворення синусоїдальності кривої напруги живлення (до 1,7 %).

Ключові слова: електровоз змінного струму, активний випрямляч струму, коефіцієнт потужності, широтно-імпульсна модуляція.

Yagup V. G., Krasnov A. A., Bozhko V. V. Energy characteristics of single-phase active current-source rectifier with sinusoidal and trapezoidal pulse-width modulation. A high power factor (more than 0.9) of AC electric locomotive with traction DC motors can be obtained using traction converters with full-controlled IGBT transistors. Now the actual task is the development of energy-efficient algorithms for controlling these converters. This article describes a single-phase active current-source rectifier for DC traction motors. Using the developed MATLAB model, the behavior of the active current-source rectifier with sinusoidal and trapezoidal pulse width modulation is investigated. Simulation results are obtained for two values of the modulation frequency of 900 Hz and 1200 Hz. The value of DC voltage, the power factor and the trolley-wire voltage and current waveform distortion are investigated. With a modulation index of 0.2...1, the power factor is 0.6...0.99 with a low distortion of the trolley-wire voltage waveform. A THD of trolley-wire voltage is up to 1.7%. A higher value of DC voltage with a modulation index of 1.0 is in case of trapezoidal pulse width modulation.

Key words: AC electric locomotive, active current-source rectifier, power factor, pulse-width modulation.

Ягуп Валерій Григорович, д. т. н., професор кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст. Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

E-mail: yagup.walery@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-7019-3499>.

Краснов Олексій Олександрович, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу «Інфраструктура залізниць та електрична тяга». Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» ПАТ «Укрзалізниця». E-mail: uzdlines@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7538-8965>.

Божко Володимир Вячеславович, к. т. н., с. н. с., начальник науково-дослідного відділу «Інфраструктура залізниць та електрична тяга». Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» ПАТ «Укрзалізниця». E-mail: bozhkovv81@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6068-2881>.

Yagup Valery Grygorovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Systems and Electric Power Supply of Cities. O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. E-mail: yagup.walery@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-7019-3499>.

Krasnov Olesiy Oleksandrovych, Leading Researcher. Kharkiv Department of Railway Transport Design and Survey Institute, JSC "UZ". E-mail: uzdlines@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7538-8965>.

Bozhko Volodymyr Vyacheslavovych, Candidate of Technical Sciences, Department Chief. Kharkiv Department of Railway Transport Design and Survey Institute, JSC "Ukrzaliznytsya". E-mail: bozhkovv81@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6068-2881>.

Надійшла 05.03.2018 р.