

**Д. А. ПШЕНИЧНИКОВ, Б. В. ВОРОБЬЁВ**

## **МОДЕЛЬ СИЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ**

Построена компьютерная модель асинхронного электропривода электромобиля с суперконденсаторной батареей в качестве промежуточного звена накопления электрической энергии торможения и развёрнутой моделью преобразователя частоты. Проведено компьютерное моделирование переходных процессов в преобразователе частоты при движении электромобиля по прямой и со склона. Получены переходные характеристики в ключах преобразователя, а также общие переходные процессы электропривода в режимах городского цикла движения транспорта и рекуперативного торможения.

**Ключевые слова:** электропривод, суперконденсатор, рекуперативное торможение, энергосбережение.

**Д. О. ПШЕНИЧНИКОВ, Б. В. ВОРОБЬЁВ**

## **МОДЕЛЬ СИЛОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ У РЕЖИМІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ**

Побудована комп'ютерна модель асинхронного електроприводу електромобіля з суперконденсаторною батареєю як проміжною ланкою накопичення електричної енергії гальмування і розгорнутою моделлю перетворювача частоти. Проведено комп'ютерне моделювання переходних процесів в перетворювачі частоти при русі електромобіля по прямій та зі схилу. Отримано переходні характеристики в ключах перетворювача, а також загальні переходні процеси електроприводу в режимах міського циклу руху транспорту і рекуперативного гальмування.

**Ключові слова:** електропривод, суперконденсатор, рекуперативне гальмування, енергозбереження.

**D. PSHENICHNYKOV, B. VOROBIOV**

## **ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE POWER CONVERTER MODEL OF AN ELECTRIC VEHICLE IN REGENERATIVE BRAKING MODE**

A computer model of an asynchronous electric drive of an electric vehicle with a supercapacitor battery as an intermediate link of accumulation of electric braking energy and a expanded model of a frequency converter is constructed. An electric vehicle electric drive function block diagram is designed according to energy transformation character during movement of an according. Optimum on power parameters and regulating and mechanical characteristics the structure of the modern frequency-adjustable electric drive with the asynchronous motor includes autonomous voltage inverter with power IGBT transistors and control system. Pulse width modulation principle is used for formation of output current. By development of mathematical model of the frequency converter includes mathematical description of processes only in a power unit as nonlinear pulse system. A computer simulation of transients in the frequency converter during the movement of an electric vehicle in a straight line and from a slope was conducted. Transient characteristics were obtained in converter switches, as well as general transients of the electric drive in the modes of the urban cycle of traffic with regenerative braking.

**Keywords:** electric drive, supercapacitor, regenerative braking, saving energy.

**Введение.** Потребление значительного количества нефтяных ресурсов, а также ухудшающаяся экологическая обстановка в больших городах, связанная с увеличением концентрации выхлопных газов автомобилей (один литр сжиженного бензина приводит к образованию примерно 16 м<sup>3</sup> смеси различных газов), требуют перехода к альтернативным источникам энергии. Особенно актуальной данная проблема является для Украины, обеспеченной собственными ресурсами лишь на 48 %. При этом сильная зависимость от импорта нефтепродуктов приводит к тому, что цены на бензин быстро растут. По данным статистики [1], Украина в январе-августе 2017 года импортировала нефтепродуктов на 2,466 млрд. долларов, что на 30% больше, чем за аналогичный период прошлого года.

В итоге импорт занял более половины отечественного нефтерынка. Кроме того, исследования показывают, что запасы нефтяных ресурсов неумолимо сокращаются. Эти проблемы привели к существенному росту разработок электромобилей (EV), гибридных электромобилей (HEV) и подключаемых гибридных электромобилей (PHEV), которые в значительной мере могут решить экологическую проблему, а также снизить потребление нефтяных ресурсов [2-5].

На данном этапе развития электромобили уступают по ряду показателей бензиновым или дизельным автомобилям, однако их преимущества неоспоримы: высокая энергоэффективность, экологичность, простота конструкции и техобслуживания, применение более дешёвой (по сравнению с бензином) энергии, снижение уровня шума. Уже сейчас в мире эксплуатируется более 2 млн. электромобилей, а ежемесячный прирост продаж (2018 г.) составляет около 17 %. Согласно расчётам, полная энергоэффективность электромобиля (0,97 км/МДж для Tesla Roadster) значительно (практически в 3 раза) превышает энергоэффективность бензиновых автомобилей (0,38 км/МДж для Honda Civic VX). [6].

**Целью** данной работы является создание компьютерной модели асинхронного электропривода электромобиля с использованием суперконденсаторной батареи в качестве буферного источника электроэнергии и развёрнутой модели силового полупроводникового преобразователя, компьютерное моделирование и получение переходных процессов в преобразователе в рекуперативных режимах торможения.

**Содержание и результаты исследований.** Функциональная схема электропривода электромобиля

© Д. А. Пшеничников, Б. В. Воробьев, 2019

строится в соответствии с характером преобразования энергии в процессе движения электромобиля. Источником энергии является аккумуляторная батарея (БА), обеспечивающая на выходе постоянное напряжение  $U_{ba}$ . Преобразование постоянного напряжения в переменное, необходимое для питания асинхронного двигателя (АД), обеспечивается трёхфазным автономным инвертором напряжения (АИН), который выполняет функции регулирования частоты и напряжения по закону Костенко [7]:

$$U/f = U_{hom}/f_{hom} = \text{const.} \quad (1)$$

Управление инвертором осуществляется микропроцессорным блоком (МПБУ), осуществляющим коммутацию ключей автономного инвертора по алгоритму широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется АД, на валу которого формируется движущий момент. Повышение момента на валах колес с соответствующим снижением скорости достигается с помощью механической коробки переключения передач (КПП). Функциональная схема электропривода (ЭП) электромобиля представлена на рис. 1.



Рисунок 1 – Функциональная схема ЭП электромобиля

Силовой канал электромеханической системы включает в себя МПБУ, силовой полупроводниковый преобразователь, электродвигатель, механическую трансмиссию, дифференциал и колёсную пару. Оптимальная по энергетическим показателям и по регулировочным и механическим характеристикам структура современного частотно-регулируемого электропривода с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором включает в себя АИН на силовых транзисторах IGBT с системой управления. IGBT представляет собой  $p-n-p$ -транзистор, управляемый через высоковольтный п-канальный полевой транзистор. Несущая частота IGBT составляет 10-15 кГц. Его достоинства: высокая допустимая плотность тока; управление напряжением, как у МОП-транзисторов; практически прямогольная область безопасной работы, исключающая необходимость формирования траектории переключения, низкие потери в импульсном режиме. Для формирования выходного тока используется принцип ШИМ. Компьютерная модель АД строится, исходя из уравнений электрической и механической части машины и имеет вид [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dr} \Psi_{qs} + \omega \Psi_{ds}; \quad u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dr} \Psi_{ds} + \omega \Psi_{qs}; \\ u'_{qr} = R_r i'_{qr} + \frac{d}{dr} \Psi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \Psi'_{dr}; \\ u'_{dr} = R_r i'_{dr} + \frac{d}{dr} \Psi'_{dr} + (\omega - \omega_r) \Psi'_{qr}; \\ M = 1.5(\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}); \quad M = M_c + J \frac{d\omega}{dt}, \end{array} \right.$$

где  $\Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$ ,  $\Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}$ ,  
 $\Psi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{ss}$ ,  $\Psi'_{dr} = L'_r i_{dr} + L_m i_{ds}$ ,  
 $L_s = L_{ls} + L_m$ ,  $L'_r = L'_{lr} + L_m$ ;

активное сопротивление и индуктивность рассеяния  
 $R_s$ ,  $L_{ls}$  – статора,  $R'_r$ ,  $L'_{lr}$  – ротора;  
индуктивности:

$L_m$  – цепи намагничивания,  
 $L_s$ ,  $L'_r$  – полные статора и ротора;  
проекции напряжения и тока статора:  
 $u_{qs}$ ,  $i_{qs}$  – на ось  $q$ ,  $u_{ds}$ ,  $i_{ds}$  – на ось  $d$ ;

проекции напряжения и тока ротора:  
 $u'_{qr}$ ,  $i'_{qr}$  – на ось  $q$ ,  $u'_{dr}$ ,  $i'_{dr}$  – на ось  $d$ ;  
проекции потокосцепления на оси  $d$  и  $q$   
 $\Psi_{ds}$ ,  $\Psi_{qs}$  – статора,  $\Psi'_{dr}$ ,  $\Psi'_{qr}$  – ротора;

моменты:  
 $M$  – электромагнитный,  $M_c$  – сопротивления.

При разработке математической модели преобразователя частоты ограничиваются математическим описанием процессов только в силовой части, по своей сути нелинейной импульсной системы. При этом ключевые элементы представляют периодически коммутируемыми активными сопротивлениями, коммутация которых происходит между двумя крайними пределами – 0 и  $\infty$ . Фазы обмоток статора АД, который является нагрузкой для ПЧ, соединены между собой по схеме «треугольник», либо «звезда». В каждый момент времени постоянный ток протекает через две фазы нагрузки и включённые вентили. Таким образом, ток нагрузки в инверторе тока и выходное напряжение инвертора напряжения однозначно определяются, соответственно, током  $i_d$  или напряжением батареи  $U_{ba}$ . Линейные и фазные напряжения и токи выходных фаз инвертора однозначно определяются с помощью коммутационных функций [9]:

$$F_k = C_i(t - t_i), \quad (2)$$

где  $F_k$  – коммутационная функция, определяемая состоянием  $k$ -го ключа в силовой цепи инвертора;  $t$  – текущее время открытого состояния ключа;  $t_i$  – моменты коммутации  $k$ -го ключа в процессе функционирования инвертора;  $C_i$  – значения коммутационной функции, соответствующие состоянию ключа в момент  $t_i$ . В моменты коммутации коммутационная функция принимает значения +1 или -1 [10].

Линейные напряжения на выходе идеализированного инвертора, которые при соединении фаз обмоток статора треугольником одновременно являются и фазными напряжениями двигателя, можно при базовом законе коммутации представить в виде графиков (рис. 2) [10], где  $U_n$  – напряжение на входе инвертора, а  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  – линейные напряжения на выходе инвертора. Тогда можно записать следующие соотношения между напряжениями на выходе и входе инвертора:

$$U_{ab} = F_{ab} \cdot U_n; \quad U_{bc} = F_{bc} \cdot U_n; \quad U_{ca} = F_{ca} \cdot U_n, \quad (3)$$

где  $F_{ab, bc, ca}$  – коммутационные функции линейных напряжений, представляющие собой прямоугольники единичной амплитуды в моменты, когда проводят противоположные ключи соответствующих фаз, и нулевые участки, когда проводят однополярные ключи.

График же линейного напряжения, например  $U_a(\vartheta)$ , описывается выражением:

$$U_a(\vartheta) = U_{ab}(\vartheta) = \begin{cases} +U_n & \text{при } -0 < \vartheta < 2\pi/3; \\ 0 & \text{при } 2\pi/3 < \vartheta < \pi; \\ -U_n & \text{при } \pi < \vartheta < 5\pi/3; \\ 0 & \text{при } 5\pi/3 < \vartheta < 2\pi, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\vartheta = \Omega t$  – время в угловых единицах, определяемых частотой выходного напряжения инвертора.

В случае соединения обмотки трёхфазного двигателя в звезду, к фазе нагрузки прикладывается половина напряжения звена постоянного тока, так как для каждого состояния инвертора две фазы двигателя с помощью ключей соединены параллельно и подключены к источнику питания последовательно с третьей фазой. Поэтому соотношения между выходными фазовыми напряжениями инвертора и напряжением на его входе можно записать в виде [11]:

$$U_a = F_a \cdot U_n / 2; \quad U_b = F_b \cdot U_n / 2; \quad U_c = F_c \cdot U_n / 2, \quad (5)$$

где  $F_a, F_b, F_c$  – коммутационные функции фазных напряжений инвертора.

Графики напряжений на фазах нагрузки в этом случае имеют вид, представленный на рис. 3.

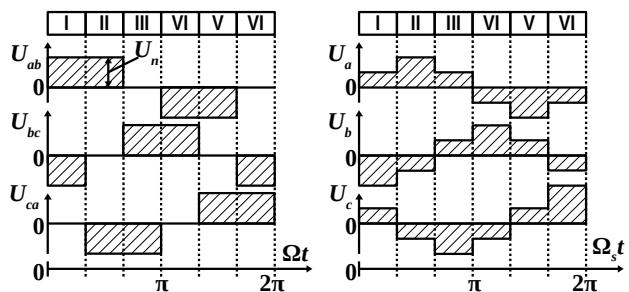


Рисунок 2 – Графики линейных напряжений

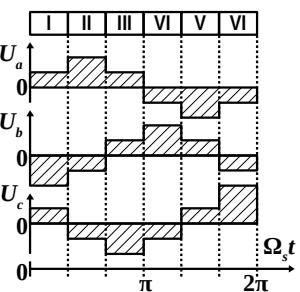


Рисунок 3 – Графики фазных напряжений

Они представляют собой знакопеременные импульсные функции, где одна треть величины напряжения приходится на каждую из параллельно включённых фаз, две трети – на последовательно включённую фазу. Происходит это потому, что токи в параллельно включённых фазах в два раза меньше, чем в последовательно включённой с ними фазе. Т. е. значение напряжения нагрузки, например фазы А, определено:

$$U_\phi(\vartheta) = U_a(\vartheta) = \begin{cases} +1/3 U_n & \text{при } -0 < \vartheta < 2\pi/3; \\ +2/3 U_n & \text{при } 2\pi/3 < \vartheta < 2\pi; \\ +1/3 U_n & \text{при } 2\pi < \vartheta < \pi; \end{cases} \quad (6)$$

$$U_\phi(\vartheta+\pi) = -U_a(\vartheta)$$

Анализ графиков линейных и фазных напряжений на нагрузке (рис. 2, 3) показывает, что коммутационные функции этих напряжений представляют:

$F_{ab}, F_{bc}, F_{ca}$  – прямоугольники единичной амплитуды в моменты, когда проводят противоположные ключи соответствующих фаз, и нулевые участки, когда проводят однополярные ключи;

$F_a, F_b, F_c$  – единичные ступенчатые функции, которые в моменты переключения фаз нагрузки изме-

няют свои значения от  $-1/2$  до  $1/2$ , а при переключении противоположных ключей изменяют амплитуду импульса до  $\sqrt{3}/2$  единицы.

При моделировании автономных инверторов коммутационные функции фазных напряжений при  $180^\circ$ -ом управлении можно представить в виде [10]:

$$\begin{aligned} F_a(\varphi) &= \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \sin(k\varphi); \\ F_b(\varphi) &= \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \sin\left(k\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)\right); \\ F_c(\varphi) &= \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \sin\left(k\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right)\right), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $k = 2p + 1$  – коэффициент гармоники;  
 $p = 0, 1, 2, 3, \dots$  – ряд натуральных чисел.

Тогда коммутационные функции линейных напряжений можно определить, как:

$$\begin{aligned} F_{AB}(\varphi) &= F_A(\varphi) - F_B(\varphi); \\ F_{BC}(\varphi) &= F_B(\varphi) - F_C(\varphi); \\ F_{CA}(\varphi) &= F_C(\varphi) - F_A(\varphi). \end{aligned} \quad (8)$$

Графики линейных и фазных напряжений автономного инвертора несинусоидальные, поэтому их можно представить в виде суммы гармонических составляющих, не содержащих гармоник, кратных двум и трём.

Из вышеперечисленных соотношений получаем выражение для линейных напряжений инвертора:

$$U_a(\vartheta) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_n \left( \sin \vartheta + \frac{\sin 5\vartheta}{5} + \frac{\sin 7\vartheta}{7} + \frac{\sin 11\vartheta}{11} \dots \right) \quad (9)$$

где  $\vartheta = \vartheta + \pi/6$ .

Из (9) получаем амплитуду основной гармоники линейного напряжения  $U_{a1} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_n \approx 1.1 \cdot U_n$  при этом действующее (эффективное) значение выходного линейного напряжения:  $U_{a\text{эфф}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_n \approx 0.816 \cdot U_n$ .

Выражение для фазных напряжений:

$$U_\phi(\vartheta) = \frac{2}{\pi} U_n \left( \sin \vartheta + \frac{\sin 5\vartheta}{5} + \frac{\sin 7\vartheta}{7} + \frac{\sin 11\vartheta}{11} \dots \right). \quad (10)$$

Из (10) получаем амплитуду основной гармоники линейного напряжения,  $U_{\phi1} = (2/\pi) U_n \approx 0.637 U_n$  при этом действующее (эффективное) значение выходного линейного напряжения

$$U_{\phi\text{эфф}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_n \approx 0.45 \cdot U_n.$$

Следуя функциональной схеме и полученным соотношениям, построим компьютерную модель средствами пакета MATLAB Simulink и simPowerSystem. Нагрузка состоит из сил трения качения колес, сопротивления подъёму, сопротивления воздуха, сопротивления разгону (инерции).

Построенная компьютерная модель показана на рис. 4, на рис. 5 – модель силового полупроводникового преобразователя.

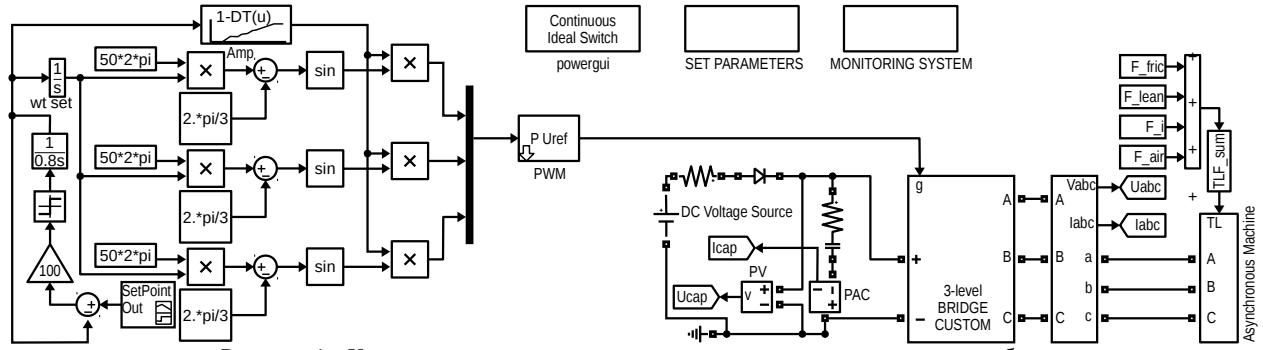


Рисунок 4 – Компьютерная модель асинхронного электропривода электромобиля

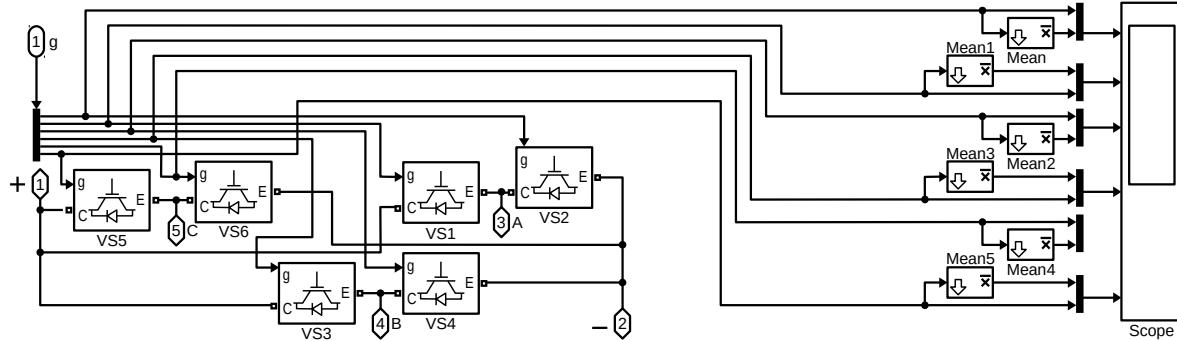


Рисунок 5 – Модель силового полупроводникового преобразователя

На рис. 6 показаны фазные напряжения на выходе АИН, на рис. 7 – временная диаграмма управляемых импульсов.

Колебания амплитуды на пиках импульсов связаны с перепадами напряжения в батарее аккумуляторов, вызванных ростом тока и внутренним сопротивлением батареи.

Далее на рисунках показаны переходные процессы: рис. 8 – скорости АД, рис. 9 – момента на валу двигателя, рис. 10 – фазных токов, рис. 11, 12 – в ключах инвертора, рис. 11 – линейные напряжения АИН.

Используя построенную компьютерную модель, было проведено моделирование процессов в ЭП и преобразователе. Характер кривой тока в ключе при пуске соответствует частотному пуску по закону Ко-стенко. Разгон длится около 1 с, после чего ЭП выходит на установившийся режим работы. На 1,5-й секунде происходит изменение задающего сигнала и ЭП переходит в режим рекуперативного торможения. Скорость снижается с  $\omega_{\text{ном}}$  до  $0,5\omega_{\text{ном}}$ , после чего ЭП снова выходит на установившийся режим.



Рисунок 6 – Фазные напряжения на выходе АИН

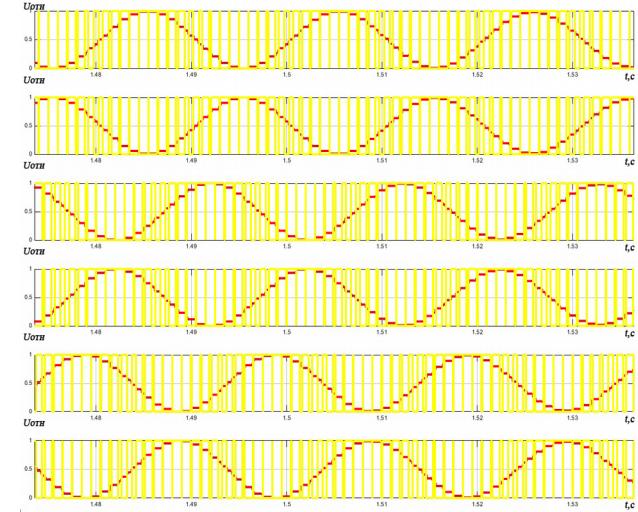


Рисунок 7 – Управляющие импульсы для АИН

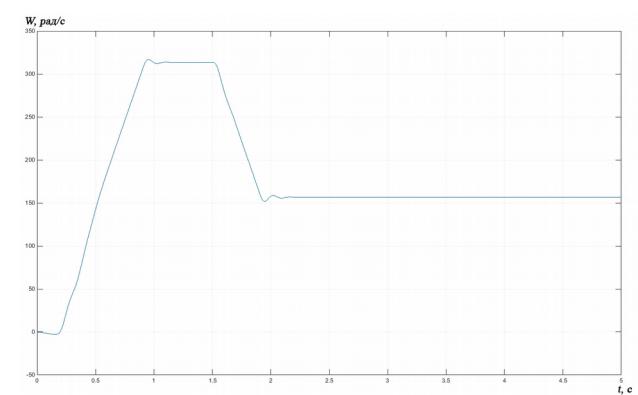


Рисунок 8 – Переходный процесс скорости АД

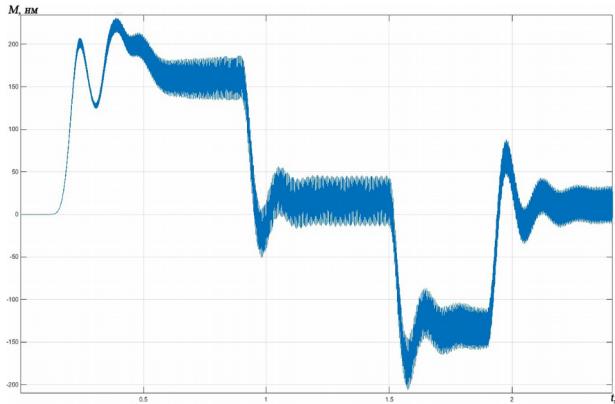


Рисунок 9 – Переходный процесс момента на валу двигателя.

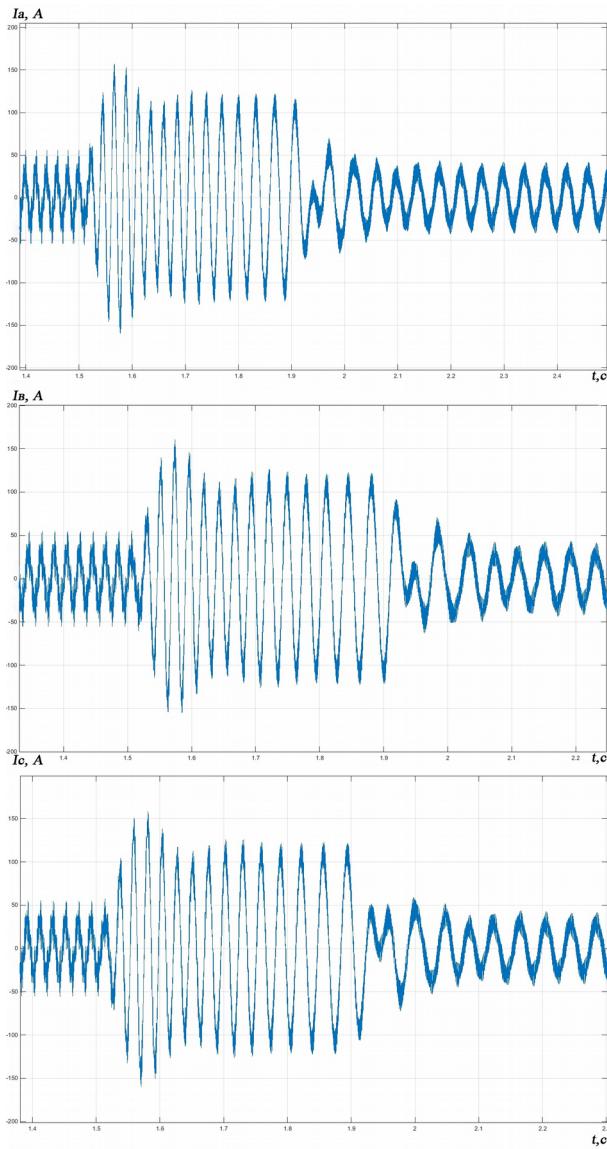


Рисунок 10 – Переходные процессы фазных токов

Этот процесс характеризуется изменением фазы на графике тока и увеличением амплитуды тока и напряжения во время торможения.

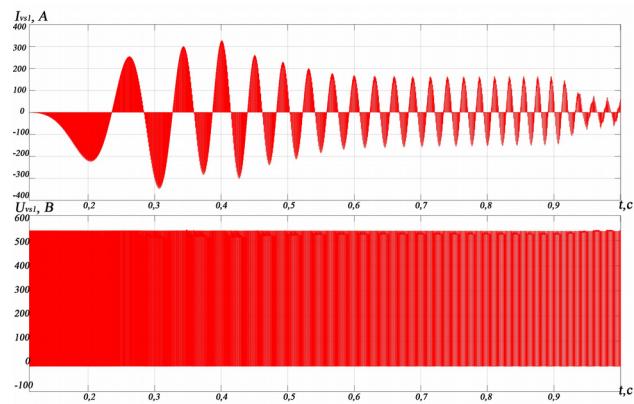


Рисунок 11 – Переходные процессы в ключе VS1 инвертора при разгоне электромобиля

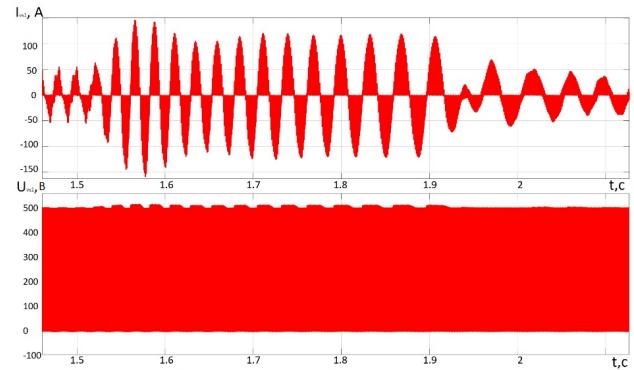
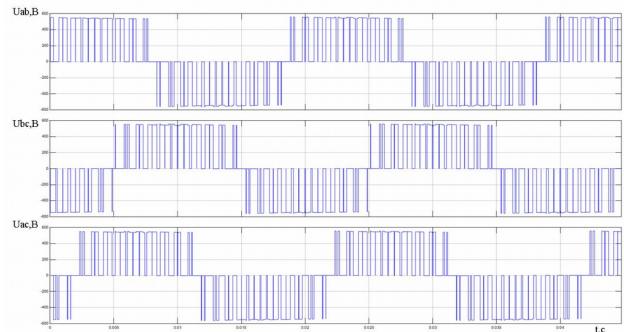
Рисунок 12 – Переходные процессы в ключе VS1 инвертора при рекуперативном торможении электромобиля с  $\omega_{\text{ном}}$  до  $0,5\omega_{\text{ном}}$ 

Рисунок 13 – Линейные напряжения АИН

**Выводы.** Построена компьютерная модель асинхронного электропривода электромобиля с суперконденсаторной батареей и развёрнутой моделью преобразователя частоты. Получены переходные процессы электропривода электромобиля в режиме городского цикла с рекуперативным торможением, а также переходные характеристики в ключах преобразователя. Результаты моделирования подтвердили адекватность математической модели физическим процессам на различных этапах движения и эффект рекуперации энергии в тормозных режимах.

**Список літератури**

1. Сумарний обсяг імпорту та експорту у розрізі товарних позицій за кодами УКТЗЕД. URL: <http://sfs.gov.ua/ms/f11>. (дата обращення 15.04.2019).
2. Demirdoven N., Deutch J. Hybrid Car Now, Fuel Cell Cars Later, *Science*. 2004. Vol. 305. pp. 974 – 976.
3. Van Mierlo J., Maggetto G., Lataire Ph. Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles, *Energy Conversion Management*. 2006. Vol. 47. pp. 2748 – 2760.
4. Chan C. C. The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles, *Proc. of the IEEE*. 2007. Vol. 95, N4. pp. 704 – 718.
5. He X., Parten M., Maxwell T. Development of a hybrid electric vehicle with a hydrogen-fueled IC engine. *Transactions on Vehicular Technology*. 2006. Vol. 55 (6). pp. 1693 – 1703.
6. The 21st Century Electric Car. URL: [http://www.evworld.com/library/Tesla\\_21centuryEV.pdf](http://www.evworld.com/library/Tesla_21centuryEV.pdf). (дата обращения 15.04.2019).
7. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. Москва: Академия, 2006. 263 с.
8. Клепиков В. Б., Семиков А. В., Банев Е. Ф. и др. Из опыта создания электропривода электромобиля с суперконденсаторным накопителем энергии. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ», 2015, Вип. №112 (1121). С. 195 – 198.
9. Перфирьев Ю. С., Даничев А. М., Довгун В. П. Применение переменных состояния к анализу переходных процессов: учебное пособие. Красноярск: Красноярский политехнический институт, 1988. 82с.
10. Масальский Г. Б. Инвариантные системы в задачах управления. Автоматизированный анализ и синтез систем управления: учебное пособие. Красноярск: Красноярский политехнический институт, 1987. 144с.
11. Поздеев А. Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. Чебоксары: ЧВГУ, 1998. 172 с.

**References (transliterated)**

1. Sumarnij obsyag importu ta eksportu u rozrizi tovarnih pozicij za kodami UKTZED [Total volume of goods import and export according UKTZED codes]. URL: <http://sfs.gov.ua/ms/f11>. (accessed 15.04.2019).
2. Demirdoven N.; Deutch J. Hybrid Car Now, Fuel Cell Cars Later, *Science*. 2004, №305. pp. 974– 976.
3. Van Mierlo J.; Maggetto G.; Lataire Ph. Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles, *Energy Conversion Management*. 2006, №47. pp.2748 – 2760.
4. Chan, C.C. The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. Proc. *IEEE*. 2007, №95. pp. 704 – 718.
5. He X., Parten M., Maxwell T. Development of a hybrid electric vehicle with a hydrogen-fueled IC engine. *Transactions on Vehicular Technology*. 2006, vol. 55 (6). pp. 1693 – 1703.
6. The 21st Century Electric Car. URL: [http://www.evworld.com/library/Tesla\\_21centuryEV.pdf](http://www.evworld.com/library/Tesla_21centuryEV.pdf). (accessed 15.04.2019).
7. Sokolovskij G. G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym upravleniem* [Frequency adjustable alternating current electric drives]. Moskva: Akademiya, 2006. 263 p.
8. Klepikov V. B., Semikov A. V., Banev E. F. i dr. Iz opyita sodaniya elektroprivoda elektromobilya s superkondensatornym nakopitelem energii [Design experience of an electric vehicle electric drive with ultracapacitor storage]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University «KhPI»]. Kharkiv: NTU «KhPI» 2015, vyp. 112 (1121). pp. 195 – 198.
9. Perfir'ev YU. S., Danichev A. M., Dovgun V. P. *Primenenie peremennyh sostoyaniya k analizu perekhodnyh processov: uchebnoe posobie* [Application of state variables to the analysis of time responses: manual]. Krasnoyarsk: Krasnoyarskij politekhnicheskij institut, 1988. 82 p.
10. Masal'skij G. B. *Invariantnye sistemy v zadachah upravleniya. Avtomatizirovannyj analiz i sintez sistem upravleniya: uchebnoe posobie* [Invariante systems in tasks of control. The automated analysis and synthesis of control systems: manual]. Krasnoyarsk: Krasnoyarskij politekhnicheskij institut, 1987. 144 p.
11. Pozdeev A. D. *Elektromagnitnye i elektromekhanicheskie processy v chastotno-reguliruemyh asinhronnyh elektroprivodah* [Electromagnetic and electromechanical processes in frequency adjustable asynchronous electric drives]. Cherboksary: CHVGU, 1998. 172 p.

Поступила 29.05.2019

**Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors**

**Пшеничников Дмитро Олексійович (Пшеничников Дмитрий Алексеевич, Pshenychnykov Dmytro)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: pshenichdm@gmail.com

**Воробйов Богдан Віталійович (Воробъёв Богдан Витальевич, Vorobiov Bohdan)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автоматизованих електромеханічних систем; м. Харків, Україна; e-mail: pro100lolpro100lolpro100lol@gmail.com