

А. В. СЕМИКОВ, асп. НТУ «ХПИ»

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С СУПЕРКОНДЕНСАТОРНОЙ БАТАРЕЕЙ

**Вступление.** В последние десятилетия большинство мировых автопроизводителей начали выпуск электромобилей и разрабатывают новые модели. По ряду оценок в ближайшие десятилетия ожидается значительный рост числа электромобилей [1]. В связи с этим на кафедре «Автоматизированные электромеханические системы» НТУ «ХПИ» открыта новая специализация «Компьютеризированные системы электромобилей» и создан лабораторный образец электропривода (ЭП), который установлен в автомобиль «Ланос».

Одним из достоинств ЭП по сравнению с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) является возможность рекуперативного торможения, которое сокращает расход электроэнергии и увеличивает дальность проезда на одном заряде в городских условиях движения, сопряжённых с частыми разгонами и торможениями. Но многие типы аккумуляторов либо не способны принимать мощность возможную в режимах рекуперативного торможения либо могут быстро изнашиваться при частых торможениях электромобиля. Решением является использование дополнительного накопителя электроэнергии – суперконденсаторной батареи (СКБ), обладающей большим ресурсом и удельной мощностью, по сравнению с аккумуляторной батареей (АБ). [2]

**Целью работы** является оценка расхода электроэнергии в различных стандартных городских циклах движения на примере автомобиля «Ланос» и сравнение энергетического эффекта от рекуперации при использовании ЭП по двум ниже описываемым структурам.

**Материалы и результаты исследований.** В процессе заряда и разряда напряжение на АБ не должно меняться более чем на 20...30 %, в отличие от СКБ, у которых оно может меняться в несколько раз, во избежание существенного сокращения срока службы АБ, поэтому параллельное соединение АБ с СКБ не целесообразно. В литературе [2] представлены различные структуры ЭП с СКБ и АБ с широтно-импульсными преобразователями (ШИП) между АБ и СКБ. В данной работе рассматривается 2 варианта структуры ЭП с СКБ и АБ без использования ШИП между ними. В запатентованном [3] кафедрой «АЭМС» варианте, показанном на рис. 1, СКБ всегда подключена к ШИП, питающему двигатель, а АБ подключена к ней через диод, предотвращающий её заряд. В данной схеме отбор энергии от аккумулятора начинается, когда напряжение на СКБ опускается ниже АБ, а в тормозном режиме энергия накапливается в СКБ, повышая её напряжение выше АБ. Во втором варианте, показанном на рис. 2, АБ и СКБ подключаются к преобразователю через силовую коммутацию К по очереди в зависимости от режима работы ЭП: в двигательном режиме подключается АБ, если напряжение СКБ ниже максимального возможного ЭДС якоря, а в генераторном режиме подключается СКБ. Переключение производится в бестоковые паузы. Основным недостатком обоих схем является двукратное изменение питания ШИП, что требует расчёта его и электрической машины на работу с повышенным напряжением питания относительно номинального.

В соответствии с расчётом ранее опубликованной работе [4] выбраны основные силовые компоненты: машина постоянного тока с постоянными магнитами (МПТ с ПМ) 2×LEM200-D135-RAGS [5] максимальной мощностью 72 кВт, номинальным током 200 А и массой 30 кг; АБ из  $N_{\text{Посл}} = 60$  последовательно соединённых параллельных сборок по  $N_{\text{Пар}} = 40$  литий-ионных элементов NCR18650 [6] ёмкостью по  $Ah = 2,9$  А·ч с максимальным напряжением  $U_{\text{MAX}} = 4$  В и минимальным  $U_{\text{MIN}} = 3,2$  В и общей массой 110 кг; 150 ионисторов ВСАР1200 [7] последовательно соединённых в СКБ общей массой 40 кг.

Компьютерная модель сделана в программе Matlab в пакете Simulink. Работа АБ предполагается на линейном участке зарядно-разрядной характеристики с неизменным внутренним сопротивлением и достаточно малым током, чтобы считать её ёмкость неизменной, поэтому она представлена в виде последовательных конденсатора ёмкостью  $C_{\text{АБ}} = 3600 N_{\text{Пар}} \cdot Ah / (U_{\text{MAX}} - U_{\text{MIN}}) / N_{\text{Посл}} = 8700$  Ф и резистора с сопротивлением  $R_{\text{АБ}} = N_{\text{Пар}} \cdot R_{\text{Эл}} / N_{\text{Посл}} = 0,1$  Ом. Ёмкость и внутреннее сопротивление СКБ, также как и аккумуляторов, в данной модели принято независимым от напряжения и тока, поэтому они тоже представлены в виде конденсатора ёмкостью  $C_{\text{СКБ}} = C_{\text{Ион}} / N_{\text{Ион}} = 8$  Ф с последовательным резистором сопротивлением  $R_{\text{СКБ}} = R_{\text{Ион}} \cdot N_{\text{СКБ}} = 0,05$  Ом. В качестве МПТ с ПМ используется блок DC Machine из библиотеки SimPowerSystems, соответствующий уравнению якорной цепи  $U_{\text{я}} = K \cdot \Phi \cdot \omega + R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} + L_{\text{я}} \cdot dI_{\text{я}}/dt$  с неизменными параметрами, которые состав-

© А. В. Семиков, 2015

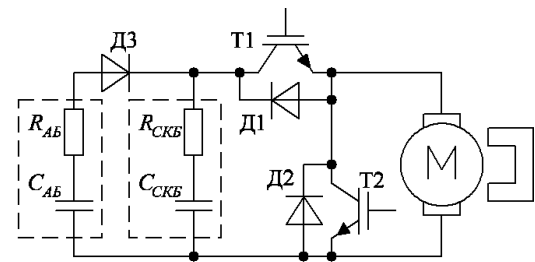


Рис. 1 — схема с диодом между АБ и СКБ

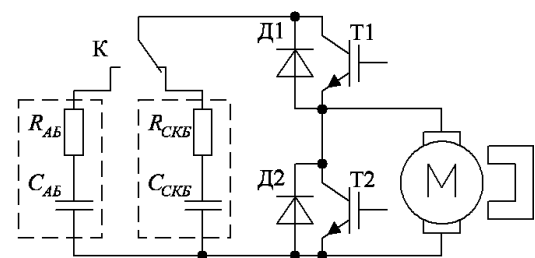


Рис. 2 — схема с переключением между АБ и СКБ

ляют  $R_{я} = 0,025 \text{ Ом}$ ,  $L_{я} = 0,000125 \text{ Гн}$  и  $K \cdot \Phi = 0,42$ . Силовые ключи в открытом состоянии моделируются, как резисторы сопротивлением  $0,004 \text{ Ом}$ , а в закрытом  $100000 \text{ Ом}$ , переключение предполагается мгновенным. Переходные процессы токов и напряжений в цепях ЭП после каждого изменения состояния ключей моделировались, так как они влияют на устойчивость системы управления и на потери электроэнергии. Трансмиссия предполагается с неизменяемым радиусом приведения  $\rho = 0,0674 \text{ м}$ , состоящая из дифференциала и кардана, её КПД принят  $\eta = 95\%$ . При движении на электромобиль действует сила сопротивления воздуха (зависящая от аэродинамического коэффициента  $c_a$  и площади лобового сопротивления  $S$ ) и трение качения (зависящее от коэффициента трения  $\mu$  и массы  $m$ ), поэтому момент сопротивления в модели для каждого шага вычисления рассчитывается по зависимости:

$$M_C = \rho (c_a \cdot S \cdot v^2 \cdot \omega^2 / 2 + \mu \cdot m \cdot g) / \eta.$$

Моделирование произведено для нескольких стандартных городских циклов движения: ECE-15, New European Driving Cycle (NEDC), Common Artemis Driving Cycles (CADC), Japan 10 Mode Cycle (J10m), Japan 10-15 Mode Cycle (J10-15m), JC08, US FTP 72 [8], отличающихся скоростями и ускорениями, что позволяет более точно определить энергоэффективность. Временные зависимости скорости ( $V$ ), тока якоря ( $I_{я}$ ), тока АБ ( $I_{АБ}$ ) и СКБ ( $I_{СКБ}$ ), напряжения АБ ( $U_{АБ}$ ) и СКБ ( $U_{СКБ}$ ) при движении в цикле J10m представлены на рис. 3—7.

В начальный момент времени при трогании расходуется остаточный заряд СКБ от предыдущего торможения, который может храниться несколько недель благодаря медленному саморазряду СКБ. При этом ток аккумулятора остаётся равным нулю в схеме с диодом (рис. 4), так как напряжение на СКБ выше, чем на АБ и диод ДЗ предотвращает заряд АБ, а в схеме с переключением (рис. 5), так как к ШИП подключена только СКБ.

В схеме с диодом по мере разряда при достижении напряжения СКБ напряжения АБ (рис. 6) начинает идти ток через диод ДЗ, плавно нарастая по мере увеличения разницы напряжений АБ и СКБ, которая прикладывается к внутреннему сопротивлению АБ. В схеме с переключением СКБ отключается при снижении напряжения (рис. 7) до максимально возможной ЭДС якоря, так как при дальнейшем разряде исчезает возможность контролировать ток якоря на максимальных скоростях. Преимуществом этой схемы является независимость минимального напряжения СКБ, следовательно, полное использования её ёмкости при любом напряжении АБ, в отличие от варианта с диодом, где оно ограничено текущим зарядом АБ.

С началом торможения в схеме с диодом начинает расти напряжение СКБ, повышаясь выше напряжения АБ и её ток становится равным нулю из-за последовательного диода ДЗ. В схеме с переключением между накопителями при задании генераторного тока якоря МПТ с ПМ отключается АБ и подключается СКБ в момент нулевого тока якоря и, соответственно,

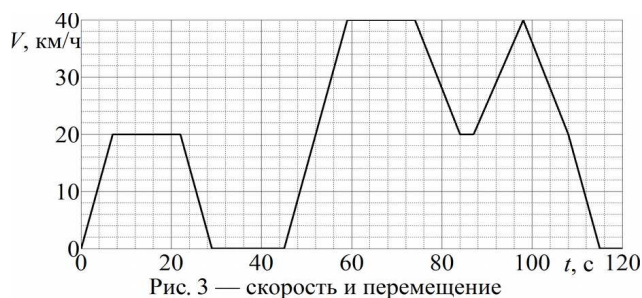


Рис. 3 — скорость и перемещение

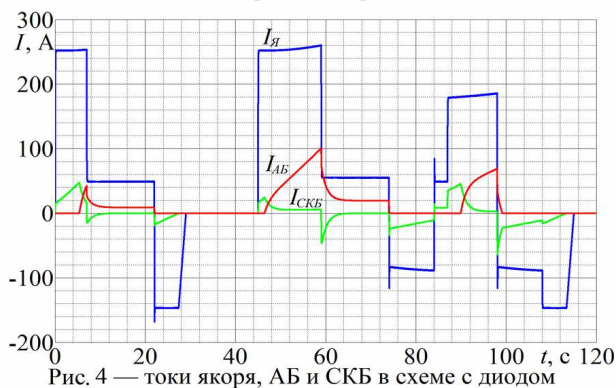


Рис. 4 — токи якоря, АБ и СКБ в схеме с диодом

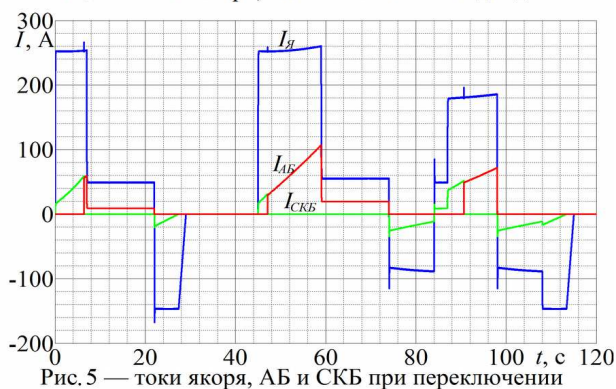


Рис. 5 — токи якоря, АБ и СКБ при переключении

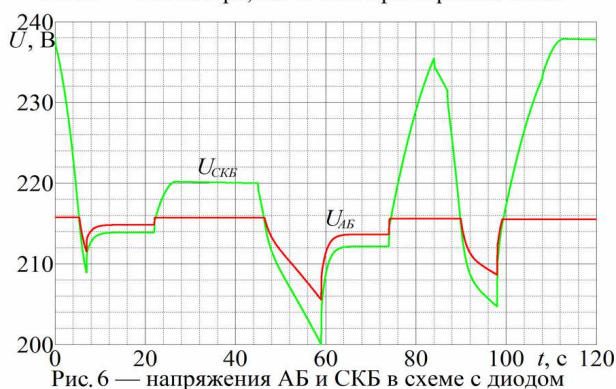


Рис. 6 — напряжения АБ и СКБ в схеме с диодом

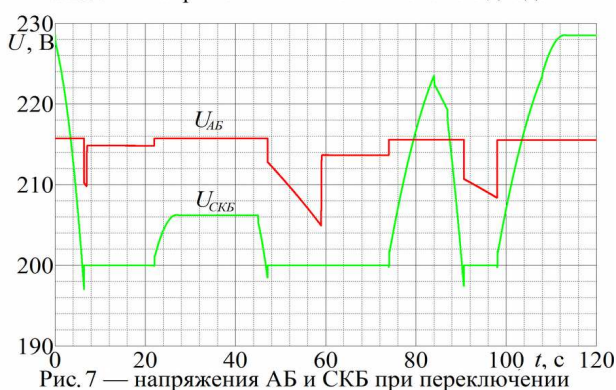


Рис. 7 — напряжения АБ и СКБ при переключении

накопителей.

На основе полученных временных зависимостей токов и напряжений для каждого цикла были рассчитаны значения расхода электроэнергии и среднеквадратичных токов якоря, АБ и СКБ и занесены в таблицу 1.

Таблица 1 – затраты электроэнергии и токи силовых компонентов при движении в различных циклах

Цикл движения		ECE15	NEDC	CADC	J10m	J10-15m	JC08	FTP72
Расход электроэнергии при движении, кВт·ч/100км	без рекуперации	17,97	17,18	28,74	19,57	18,51	19,05	19,79
	с диодом	14,79	14,98	22,50	15,40	14,72	15,06	16,67
	с переключением	14,77	14,97	22,71	15,44	15,59	15,1	16,73
Экономия энергии при использовании рекуперации	с диодом	17,8%	12,9%	21,7%	21,3%	20,5%	20,9%	15,8%
	с переключением	17,8%	12,9%	21,0%	21,1%	20,3%	20,7%	15,4%
Дальность проезда на одном заряде с рекуперацией, км		146	144	95	140	147	143	130
Среднеквадратичный ток АБ, А	без рекуперации	26,81	39,55	46,75	29,23	34,25	41,50	47,74
	с диодом	24,7	37,83	38,57	25,2	30,39	34,15	41,62
	с переключением	25,34	38,30	42,94	27,04	31,93	35,81	44,18
Уменьшение среднеквадратичного тока АБ при использовании рекуперации	с диодом	7,9%	4,4%	17,5%	12,2%	9,9%	17,7%	12,8%
	с переключением	5,5%	3,2%	8,2%	7,5%	6,8%	13,7%	7,5%
Среднеквадратичный ток СКБ, А	с диодом	11,81	13,60	24,41	13,87	15,47	16,77	22,21
	с переключением	12,23	14,90	23,49	14,09	15,80	16,92	21,61
Среднеквадратичный ток двигателя, А		122	119	189	131	122	139	163

**Выводы.** Компьютерное моделирование продолжительных режимов движения показало:

- значения среднеквадратичных токов ниже допустимых продолжительных, следовательно, выбранные компоненты подходят по нагреву;
- рекуперативное торможение с использованием СКБ массой 40 кг позволяет сократить расход электроэнергии на 13...22%, при этом он одинаков для обоих рассмотренных вариантов схем;
- расход электроэнергии составляет 15...23 кВт·ч / 100 км, что обеспечивает на порядок меньшие денежные затраты, чем на приобретение углеводородных топлив для автомобилей с ДВС
- на одном заряде можно проехать 95...147 км при массе 110 кг выбранной литий-ионной АБ для электро-мобиля массой 1500 кг, что является достаточным для большинства, так как более 85% проезжают в день менее 120 км [9];
- применение СКБ позволяет снизить среднеквадратичный ток АБ на 3...18%, что уменьшает её износ;
- среднеквадратичные токи АБ и СКБ меньше в схеме с диодом, так как процесс перераспределения мощности между накопителями плавный, в результате АБ и СКБ меньше греются и медленнее стареют, поэтому эта схема предпочтительней, чем с переключением между накопителями, более полно использующая ёмкость СКБ.

**Список литературы:** 1. Fuhs Allen E. Hybrid vehicles and the future of personal transportation. — Taylor & Francis Group, 2009. — 471с. 2. J. Cao, A. Emadi, "A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on power electronics, vol. 27, no. 1, pp. 122-132, Jan. 2012. 3. Патент Украины №85585 «Электропривод электромобиля», НТУ «ХПИ». 4. Гончар А.С., Семиков А.В. К реализации рекуперативных режимов в электроприводе электромобиля с ионисторами // 36. матер. конф. «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». – Кременчук, 2012. – С. 342–343. 5. Характеристики MPT с ПМ 2×LEM200-D135-RAGS [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://www.toyota.com/esq/vehicles/electric-vehicle/2013-scion-iq-ev.html> 6. Характеристики аккумуляторов NCR18650 [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://na.industrial.panasonic.com/sites/default/pidsa/files/ncr18650.pdf> 7. Характеристики ионисторов BCAP1200 [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://www.toyota.com/esq/vehicles/electric-vehicle/2013-scion-iq-ev.html> 8. Параметры циклов [Электронный ресурс]. — режим доступа: <http://www.dieselnets.com/standards/> 9. Seth Leitman, Bob Brant. Build your own electric vehicle. — McGraw-Hill Companies, 2009. — 329с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Fuhs Allen E. Hybrid vehicles and the future of personal transportation. — Taylor & Francis Group, 2009. — 471s. 2. J. Cao, A. Emadi, "A New Battery/UltraCapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles", IEEE Transactions on power electronics, vol. 27, no. 1, pp. 122-132, Jan. 2012. 3. Patent Ukrainyi #85585 «Elektroprivod elektromobilya», NTU «HPI». 4. Gonchar A.S., Semikov A.V. K realizatsii rekuperativnyih rezhimov v elektroprivode elektromobilya s ionistorami // Zb. mater. konf. «Elektromehanichni ta energetichni sistemi, metodi modelyuvannya ta optimizatsiyyi». – Kremenchuk, 2012. – S. 342–343. 5. Harakteristiki MPT s PM 2×LEM200-D135-RAGS [Elektronnyiy resurs]. — rezhim dostupa: <http://www.toyota.com/esq/vehicles/electric-vehicle/2013-scion-iq-ev.html> 6. Harakteristiki akkumulyatorov NCR18650 [Elektronnyiy resurs]. — rezhim dostupa: <http://na.industrial.panasonic.com/sites/default/pidsa/files/ncr18650.pdf> 7. Harakteristiki ionistorov BCAP1200 [Elektronnyiy resurs]. — rezhim dostupa: <http://www.toyota.com/esq/vehicles/electric-vehicle/2013-scion-iq-ev.html> 8. Parametryi tsiklov [Elektronnyiy resurs]. — rezhim dostupa: <http://www.dieselnets.com/standards/> 9. Seth Leitman, Bob Brant. Build your own electric vehicle. — McGraw-Hill Companies, 2009. — 329s.

*Поступила (received) 20.07.2015*