

УДК 621.313.333

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЯГОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

С.А. Сериков, доцент, к.т.н., ХНАДУ

*Аннотация.* Получена математическая модель тяговой NiMH аккумуляторной батареи гибридного автомобиля. Данная модель позволяет исследовать взаимодействие тягового электропривода и тяговой аккумуляторной батареи при движении автомобиля с использованием электротяги и в процессе рекуперации энергии торможения.

*Ключевые слова:* идентификация, математическая модель, тяговая аккумуляторная батарея, электродвижущая сила, внутреннее сопротивление, степень заряженности, номинальная емкость.

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЯГОВОЇ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

С.А. Серіков, доцент, к.т.н., ХНАДУ

*Анотація.* Одержано математичну модель тягової NiMH акумуляторної батареї гібридного автомобіля. Ця модель дозволяє досліджувати взаємодію тягового електропривода і тягової акумуляторної батареї під час руху автомобіля з використанням електротяги і в процесі рекуперації енергії гальмування.

*Ключові слова:* ідентифікація, математична модель, тягова акумуляторна батарея, електродвижущая сила, внутрішній опір, ступінь зарядженості, номінальна ємкість.

## MATHEMATICAL MODEL OF HYBRID ELECTRIC VEHICLE HIGH-VOLTAGE BATTERY IDENTIFICATION

S. Serikov, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, KhNAHU

*Abstract.* The mathematical model of hybrid electric vehicle NiMH high-voltage battery is obtained. This model allows to explore the interaction of vehicle tractive electric drive and high-voltage battery at the electric motive power motion and in the process of recuperation of braking kinetic energy.

*Key words:* identification, mathematical model, high-voltage battery, electromotive force, internal resistance, state of charge, rated battery capacity.

### Введение

Наиболее перспективным направлением решения задачи повышения экологической чистоты и экономичности автомобилей считается использование тягового электропривода. Это направление связано как с дальнейшим совершенствованием электромобилей, так и с разработками транспортных

средств (ТС), оснащенных гибридными силовыми установками.

В роли накопителя энергии ТС с тяговым электроприводом чаще всего выступают электрохимические источники тока – тяговые аккумуляторные батареи (ТАБ). Имеется большое количество типов аккумуляторов, пригодных для использования в ТАБ. Однако

ни один из этих типов в полной мере не отвечает всем требованиям, предъявляемым к ТАБ, и не существует однозначного критерия выбора оптимального аккумулятора. Аккумуляторная батарея гибридного автомобиля должна обладать высокими удельными значениями энергии и мощности, высоким КПД, большим числом циклов «заряд-разряд», низкой стоимостью, безопасностью в эксплуатации, надежностью, низкой стоимостью технического обслуживания, малым временем заряда.

При проектировании новых силовых установок электромобилей и гибридных ТС возникает сложная проблема научного обоснования их базовых параметров и характеристик. Для решения данной проблемы используются методики, основанные на проведении вычислительных экспериментов с соответствующими математическими моделями. Результаты таких экспериментов служат основанием для сравнительного анализа различных конструктивных решений. Данная работа посвящена идентификации математической модели тяговой аккумуляторной батареи гибридного автомобиля, пригодной для исследования влияния конструктивных особенностей на энергетический баланс силовой установки с учетом рекуперации кинетической энергии торможения.

### Анализ публикаций

В последние годы появилось достаточно большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных идентификации математических моделей тягового электропривода, накопителя энергии и системы рекуперации энергии различных ТС. Это говорит об актуальности рассматриваемой проблемы. Вопросы идентификации математической модели ТАБ, в частности, рассматриваются в работах [1–10].

Однако задача сравнительного анализа различных конструктивных решений автомобильных силовых установок, включающих ВД и ТАБ, на основании вычислительного эксперимента порождает ряд особенностей при синтезе моделей. Так, вопросы, связанные с точностью описания многих физико-химических процессов, сопровождающих процессы разряда и заряда, оказываются несущественными. В то же время приобретает особое значение моделирование изменения эксплуатационных характеристик ТАБ на различных тягово-скоростных режимах.

Характеристики основных типов аккумуляторных батарей, применяющихся в тяговом электроприводе, приведены в табл. 1 [11].

Таблица 1 Характеристики основных типов аккумуляторных батарей, применяющихся в тяговом электроприводе

Параметр	Тип аккумулятора						
	Свинцово-кислотные	Железо-никелевые	Никель-кадмиевые	Никель-металлогидридные	Натриево-серные	Никель-хлоридные	Литий-ионные
Удельная мощность, Вт/кг	35...300	70...130	100...200	140...200	90...120	150	100
Плотность энергии, Вт·ч/дм <sup>3</sup>	50...90	60...100	60...100	100...210	75...110	160	100
Удельная энергия, Вт·ч/кг	15...45	35...60	30...60	55...80	80...120	100	150
Число циклов «заряд-разряд»	300...600	400...1200	1000...1500	1000	250...500	500	300
Цена, у.е./кВт·ч	70...400	400...500	500	150...800	300	>1000	>1000

До недавнего времени в тяговом электроприводе преимущественно использовались свинцово-кислотные ТАБ. Для них характерна номинальная ЭДС аккумулятора  $E_{AK}=2,1$  В и чрезвычайно низкое внутреннее сопротивление.

Зависимость ЭДС от степени заряженности ТАБ близка к линейной. В первом приближении можно записать

$$E_{TAB} = n_{TAB} \cdot E_{AK} = n_{TAB} \cdot (0,15 \cdot \theta_{TAB} + 2,00), \quad [В],$$

где  $n_{TAB}$  – число последовательно включенных аккумуляторов, составляющих ТАБ;  $\theta_{TAB} = C_{TAB} / C_{TAB\,nom} = [0, 1]$  – степень заряженности ТАБ;  $C_{TAB}$  – количество Ач, которое может отдать ТАБ при номинальном режиме разряда;  $C_{TAB\,nom}$  – номинальная емкость ТАБ.

Хорошим приближением для внутреннего сопротивления свинцово-кислотных ТАБ является выражение

$$R_{TAB} = n_{TAB} \cdot \frac{0,022}{C_{TAB\,nom}}, \quad [Ом].$$

Саморазряд свинцово-кислотных ТАБ составляет около 2 % в день. Время полного заряда – 8 ч. При этом возможен заряд до 90 % за 1 ч. Сравнительно небольшие удельная мощность и удельная энергия свинцово-кислотных ТАБ компенсируется их относительно малой стоимостью [1].

В настоящее время большинство производителей гибридных автомобилей отдают предпочтение никель-металлогидридным аккумуляторным батареям (NiMH), которые имеют хорошие удельные показатели и срок службы, но на сегодняшний день достаточно дороги. Номинальная ЭДС аккумулятора у батарей данного типа составляет  $E_{AK} = 1,2$  В. Зависимость ЭДС ТАБ от степени заряженности может быть аппроксимирована выражением

$$E_{TAB} = n_{TAB} \cdot E_{AK}(\theta_{TAB}),$$

где

$$E_{AK} = -8,2816 \cdot (1 - \theta_{TAB})^7 + 23,575 \cdot (1 - \theta_{TAB})^6 - 30,0 \cdot (1 - \theta_{TAB})^5 + 23,7053 \cdot (1 - \theta_{TAB})^4 - 12,588 \cdot (1 - \theta_{TAB})^3 + 4,131 \cdot (1 - \theta_{TAB})^2 - 0,8658 \cdot (1 - \theta_{TAB}) + 1,37, \quad [В].$$

Внутреннее сопротивление NiMH ТАБ достаточно низкое и, в первом приближении, может быть получено из выражения

$$R_{TAB} = n_{TAB} \cdot \frac{0,06}{C_{TAB\,nom}}, \quad [Ом].$$

Саморазряд NiMH ТАБ составляет около 5 % в день. Время полного заряда – 1 ч. Возможен режим быстрого заряда до 60 % номинальной емкости за 20 мин [1, 7, 12].

Перспективными для использования в тяговом электроприводе считаются аккумуляторы на основе лития (литий-ионные, литий-полимерные и т.д.). Номинальная ЭДС аккумулятора литий-ионных батарей составляет  $E_{AK} = 3,5$  В при очень низком внутреннем сопротивлении. Саморазряд таких ТАБ составляет около 10 % в месяц. Время полного заряда – 2–3 ч. Широкое внедрение литий-ионных ТАБ в настоящее время сдерживают ряд нерешенных технологических проблем и высокая стоимость. [1, 2, 7].

В ГСУ автомобиля Toyota Prius III (производство 2003 г. и позже) применяются NiMH тяговые АБ, состоящие из 168 аккумуляторов, собранных в 28 модулей, что обеспечивает номинальное напряжение  $U_{TAB\,nom} = 201,6$  В. Автомобиль Toyota Prius II (производство 2000–2003 гг.) оснащен NiMH ТАБ, состоящей из 228 аккумуляторов, собранных в 38 модулей. При этом обеспечивается номинальное напряжение  $U_{TAB\,nom} = 273,6$  В. Номинальная емкость данных ТАБ составляет  $C_{TAB\,nom} = 6,5$  А · ч, максимальный разрядный ток  $I_{TAB\,dis\,max} = 80$  А, а максимальный ток заряда  $I_{TAB\,chg\,max} = -50$  А [3].

### Цель и постановка задачи

Целью данной работы является синтез математической модели тяговой аккумуляторной батареи гибридного автомобиля, пригодной

для исследования взаимодействия тягового электропривода и ТАБ при движении автомобиля с использованием электротяги и в процессе рекуперации энергии торможения. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи структурной и параметрической идентификации модели ТАБ. Уровень сложности модели должен обеспечивать возможность исследования работы силовой установки в стандартном ездовом цикле движения автомобиля.

### Структурная идентификация модели тяговой аккумуляторной батареи

При моделировании работы ГСУ степень заряженности ТАБ можно оценить согласно выражению [4, 8]

$$\theta_{TAB} = \theta_{TAB0} - \frac{1}{3600 \cdot C_{TAB\ nom}} \cdot \int_0^t I_{TAB} dt,$$

где  $\theta_{TAB0}$  – степень заряженности ТАБ в момент времени  $t = 0$ .

Если представить эквивалентную схему замещения ТАБ [1, 5, 6, 10, 12] в виде последовательного соединения эквивалентной ЭДС ( $E_{TAB}$ ) и эквивалентного внутреннего сопротивления ( $R_{TAB}$ ), напряжение ТАБ можно определить из выражения

$$U_{TAB} = E_{TAB} - I_{TAB} \cdot R_{TAB}.$$

Данное выражение не учитывает динамические свойства ТАБ, которыми при исследовании свойств ГСУ можно пренебречь. В общем случае  $E_{TAB}$  и  $R_{TAB}$  являются функциями степени заряженности ТАБ, температуры электролита ( $t_{TAB}^0$ ), величины и направления тока ( $I_{TAB}$ )

$$E_{TAB} = f(\theta_{TAB}, I_{TAB}, t_{TAB}^0);$$

$$R_{TAB} = f(\theta_{TAB}, I_{TAB}, t_{TAB}^0).$$

Мощность, отдаваемая или потребляемая аккумуляторной батареей, определяется выражением

$$P_{TAB} = U_{TAB} \cdot I_{TAB} = (E_{TAB} - I_{TAB} \cdot R_{TAB}) \cdot I_{TAB}.$$

Следовательно

$$I_{TAB} = \frac{1}{2 \cdot R_{TAB}} \left( E_{TAB} - \sqrt{E_{TAB}^2 - 4 \cdot R_{TAB} \cdot P_{TAB}} \right).$$

Отрицательное значение подкоренного выражения в последней формуле соответствует случаю  $P_{TAB} > P_{TAB\ max}$ , где  $P_{TAB\ max}$  – максимальная отдаваемая мощность ТАБ. Следовательно

$$P_{TAB\ max} = \frac{E_{TAB}^2}{4 \cdot R_{TAB}}.$$

Если питание тягового электропривода гибридного автомобиля осуществляется только от ТАБ, а мощность, производимая им при работе в генераторном режиме, расходуется на подзарядку ТАБ и питание дополнительных потребителей, то можно записать [2]:

$$\begin{cases} P_{TAB} = \frac{P_{VD}}{\eta_{inv}} + P_{dop}, & \text{при } P_{VD} \geq 0 \\ P_{TAB} = P_{VD} \cdot \eta_{inv} + P_{dop}, & \text{при } P_{VD} < 0 \end{cases},$$

где  $P_{VD}$  – мощность, потребляемая тяговым электроприводом. Если в качестве тягового электропривода выступает вентильный двигатель

$$P_{VD} = \frac{3}{2} \cdot (u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q);$$

$u_d, u_q, i_d, i_q$  – проекции векторов напряжения и тока статора на оси, связанной с ротором вращающейся системы координат. В двигательном режиме  $P_{VD} = P_{pr} > 0$ , в генераторном режиме  $P_{VD} = P_{gr} < 0$ ;  $P_{dop}$  – мощность, потребляемая от бортовой сети дополнительным электрооборудованием;  $\eta_{inv}$  – КПД трехфазного инвертора с ШИМ.

Часто наряду с ТАБ и параллельно ей в качестве накопителя энергии в силовых установках гибридных транспортных средств используются суперконденсаторы. Такое техническое решение позволяет преодолеть некоторые ограничения, свойственные использованию аккумуляторных батарей (неспособность отдавать и принимать большие мощности в кратковременном пике при раз-

гоне и рекуперативном торможении, малый диапазон рабочих температур) [14, 15].

Использование суперконденсаторов эквивалентно включению в математическую модель накопителя энергии апериодического звена первого порядка с постоянной времени  $T_{SC} = 0,1 \dots 10$  с.

**Параметрическая идентификация модели тяговой аккумуляторной батареи**

При проведении параметрической идентификации математической модели ТАБ конкретного типа может быть использована методика, предложенная в [4] для никельсодержащих батарей. Данная методика основана на исследовании зарядно-разрядных характеристик АБ при токах заряда и разряда в виде прямоугольных импульсов заданной амплитуды при различных значениях температуры электролита. По результатам данного исследования можно сделать вывод о характере зависимостей эквивалентных ЭДС и внутреннего сопротивления ТАБ от её степени заряженности, величины и направления тока, а также температуры электролита.

Результаты исследования для ЭДС аккумулятора тяговой аккумуляторной батареи приведены на рис. 1. Приведенные зависимости позволяют сделать вывод о том, что влияние температуры и величины тока на ЭДС аккумулятора оказывается несущественным и им можно пренебречь.

В то же время направление тока и степень заряженности ТАБ существенно влияют на ЭДС.

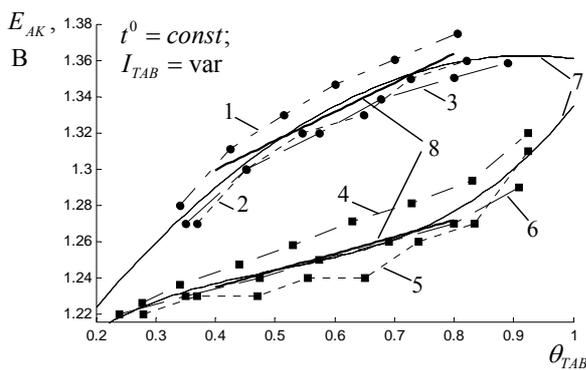
Зависимость величины ЭДС ТАБ от её степени заряженности может быть аппроксимирована полиномом третьей степени

$$E_{TAB} = n_{TAB} \cdot E_{AK}(\theta_{TAB})$$

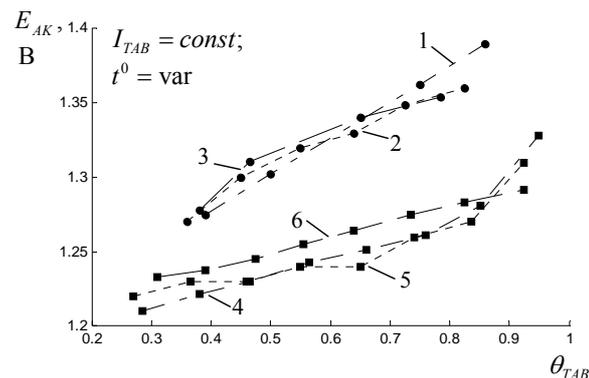
$$\begin{cases} E_{AK} = 0,46263 \cdot \theta_{TAB}^3 - 0,69708 \cdot \theta_{TAB}^2 + 0,41778 \cdot \theta_{TAB} + 1,1516, \text{ [В]}, \\ \text{при } I_{TAB} \geq 0; \\ E_{AK} = -0,00352 \cdot \theta_{TAB}^3 - 0,2592 \cdot \theta_{TAB}^2 + 0,48776 \cdot \theta_{TAB} + 1,1364, \text{ [В]}, \\ \text{при } I_{TAB} < 0. \end{cases}$$

В этом случае среднеквадратическая ошибка аппроксимации для режима разряда ТАБ ( $I_{TAB} \geq 0$ ) составляет  $\sigma_{Edis} = 0,0095363$  В, а для режима заряда ( $I_{TAB} < 0$ ) –  $\sigma_{Echg} = 0,0095332$  В.

В процессе функционирования гибридной силовой установки электронный блок управления обеспечивает поддержание степени заряженности ТАБ в диапазоне  $\theta_{TAB} = 0,4 \dots 0,8$  [13].



а



б

Рис. 1. Зависимость ЭДС аккумулятора ТАБ от степени заряженности: а –  $t^0 = 20^\circ\text{C}$ , 1 –  $I_{TAB} = -30\text{A}$ , 2 –  $I_{TAB} = -60\text{A}$ , 3 –  $I_{TAB} = -120\text{A}$ , 4 –  $I_{TAB} = 30\text{A}$ , 5 –  $I_{TAB} = 60\text{A}$ , 6 –  $I_{TAB} = 120\text{A}$ , 7 – результат полиномиальной аппроксимации, 8 – результат линейной аппроксимации; б –  $I_{TAB} = -60\text{A}$ , 1 –  $t^0 = -15^\circ\text{C}$ , 2 –  $t^0 = 20^\circ\text{C}$ , 3 –  $t^0 = 45^\circ\text{C}$ ,  $I_{TAB} = 60\text{A}$ , 4 –  $t^0 = -15^\circ\text{C}$ , 5 –  $t^0 = 20^\circ\text{C}$ , 6 –  $t^0 = 45^\circ\text{C}$

Если принять во внимание ограниченный рабочий диапазон изменения  $\theta_{TAB}$ , можно ограничиться линейной аппроксимацией зависимости

$$E_{TAB} = f(\theta_{TAB}, \text{sign}(I_{TAB})):$$

$$\begin{cases} E_{TAB} = n_{TAB} \cdot (0,093727 \cdot \theta_{TAB} + 1,197), & [\text{В}], \\ \text{при } I_{TAB} \geq 0; \\ E_{TAB} = n_{TAB} \cdot (0,16112 \cdot \theta_{TAB} + 1,2352), & [\text{В}], \\ \text{при } I_{TAB} < 0. \end{cases}$$

Среднеквадратическая ошибка линейной аппроксимации в заданном диапазоне изменения  $\theta_{TAB}$  для режима разряда ТАБ ( $I_{TAB} \geq 0$ ) составляет  $\sigma_{Edis} = 0,010644$  В, а для режима заряда ( $I_{TAB} < 0$ ) –  $\sigma_{Echg} = 0,0099754$  В.

Результаты экспериментальных исследований NiMH ТАБ гибридного автомобиля Toyota Prius, отражающие характер изменения внутреннего сопротивления при изменении  $\theta_{TAB}$  в режимах заряда и разряда, приведены в [9]. На рис. 2 представлены полученные экспериментальные данные после внесения коррекции на количество аккумуляторов в батарее  $n_{TAB} = 228$ .

Полученные зависимости с высокой точностью могут быть аппроксимированы полиномами четвертой степени

при  $I_{TAB} \geq 0$

$$R_{TAB} = 0,74738 \cdot \theta_{TAB}^4 - 2,2938 \cdot \theta_{TAB}^3 + 3,3208 \cdot \theta_{TAB}^2 - 2,0245 \cdot \theta_{TAB} + 1,4392, \quad [\text{Ом}];$$

при  $I_{TAB} < 0$

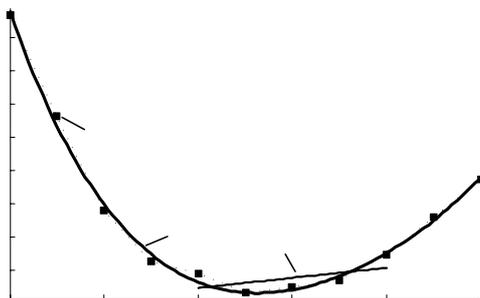
$$R_{TAB} = 0,11349 \cdot \theta_{TAB}^4 - 0,78078 \cdot \theta_{TAB}^3 + 1,3397 \cdot \theta_{TAB}^2 - 0,7914 \cdot \theta_{TAB} + 0,8952, \quad [\text{Ом}].$$

В этом случае среднеквадратическая ошибка аппроксимации для режима разряда ТАБ ( $I_{TAB} \geq 0$ ) составляет  $\sigma_{Rdis} = 0,0083849$  Ом, а для режима заряда ( $I_{TAB} < 0$ ) –  $\sigma_{Rchg} = 0,0053148$  Ом.

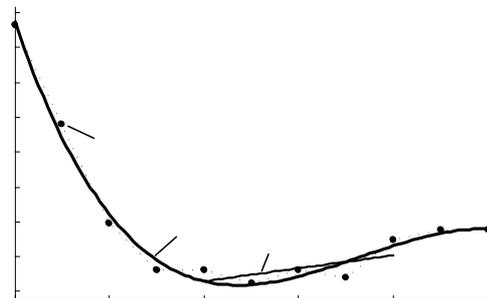
Учитывая, что в процессе функционирования ГСУ в штатных режимах степень заряженности ТАБ не выходит из диапазона  $\theta_{TAB} = 0,4 \dots 0,8$ , приемлемой точности можно достичь применив также линейную аппроксимацию зависимости

$$R_{TAB} = f(\theta_{TAB}, \text{sign}(I_{TAB})):$$

$$\begin{cases} R_{TAB} = 0,076 \cdot \theta_{TAB} + 0,9937, & [\text{Ом}], \\ \text{при } I_{TAB} \geq 0; \\ R_{TAB} = 0,03705 \cdot \theta_{TAB} + 0,73112, & [\text{Ом}], \\ \text{при } I_{TAB} < 0. \end{cases}$$



а



б

Рис. 2. Зависимость внутреннего сопротивления ТАБ от степени заряженности: а – режим разрядки; б – режим зарядки; 1 – экспериментальные данные; 2 – результат полиномиальной аппроксимации; 3 – результат линейной аппроксимации

Среднеквадратическая ошибка линейной аппроксимации в заданном диапазоне изменения  $\theta_{TAB}$  для режима разряда ТАБ ( $I_{TAB} \geq 0$ ) составляет  $\sigma_{Rdis} = 0,018274$  Ом, а для режима заряда ( $I_{TAB} < 0$ ) –  $\sigma_{Rchg} = 0,0075985$  Ом.

Зарядно-разрядные характеристики ТАБ гибридного автомобиля при  $n_{TAB} = 228$ , полученные на основании рассматриваемой математической модели, приведены на рис. 3.

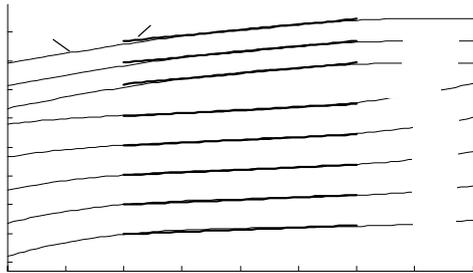


Рис. 3. Зарядно-разрядные характеристики ТАБ гибридного автомобиля: 1 – при полиномиальной аппроксимации; 2 – при линейной аппроксимации

Рис. 4 иллюстрирует зависимость тока ТАБ от степени заряженности при различной отдаваемой либо потребляемой мощности.

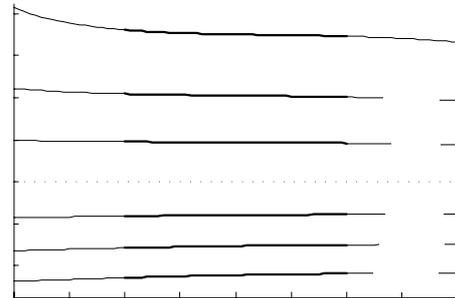


Рис. 4. Ток ТАБ гибридного автомобиля при различной отдаваемой либо потребляемой мощности ( $n_{TAB} = 228$ )

Полученные характеристики хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований NiMH ТАБ компании Panasonic автомобиля Toyota Prius, которые приведены в [16].

Структурную схему модели накопителя энергии автомобиля с гибридной силовой установкой можно представить в виде, приведенном на рис. 5.

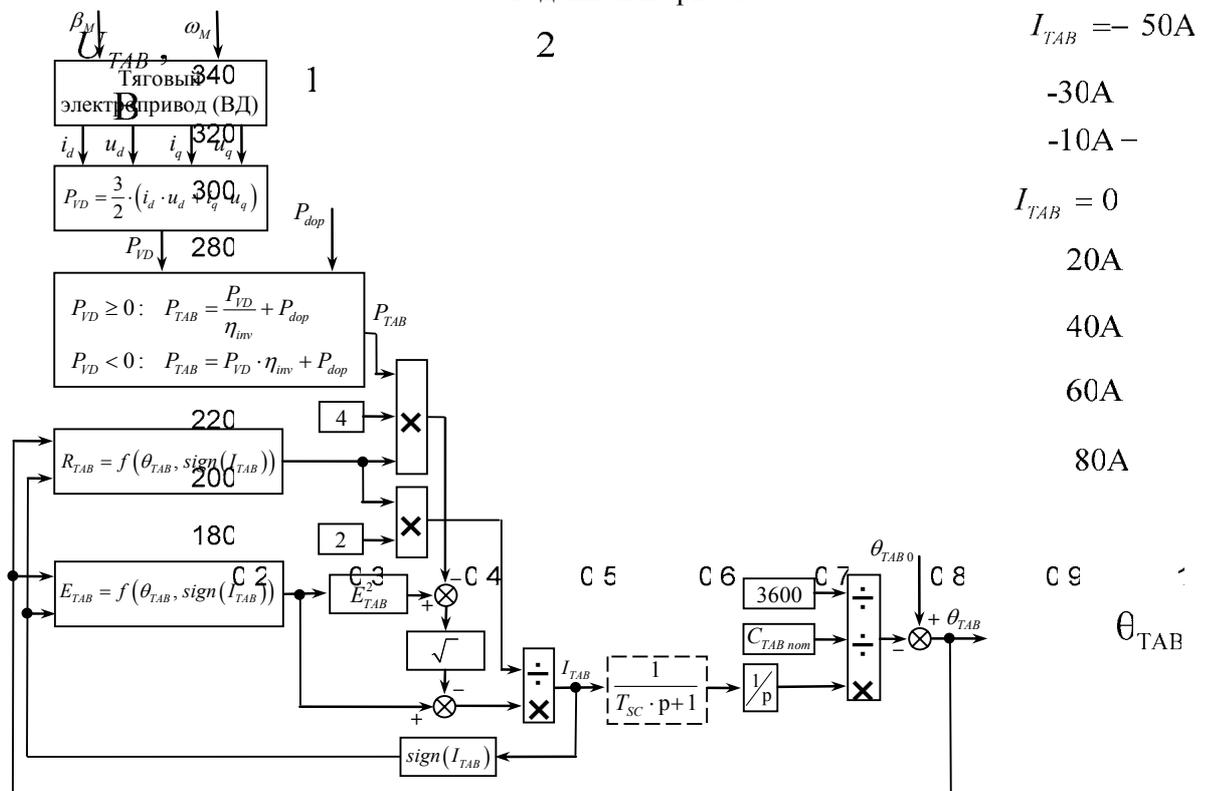


Рис. 5. Структурная схема модели накопителя энергии силовой установки гибридного автомобиля

Приведенная структурная схема поясняет также взаимодействие накопителя энергии с тяговым электроприводом. Блок, обведенный пунктирной линией, необходим для учета влияния на зарядно-разрядные характеристики ТАБ суперконденсаторов в составе накопителя энергии.

### Выводы

Получена математическая модель тяговой NiMH аккумуляторной батареи гибридного автомобиля. Данная модель позволяет исследовать взаимодействие тягового электропривода и ТАБ при движении автомобиля с использованием электротяги и в процессе рекуперации энергии торможения, исследовать влияние конструктивных особенностей на энергетический баланс силовой установки с учетом рекуперации кинетической энергии торможения при движении по стандартному ездовому циклу. Данные исследования необходимы при проведении сравнительного анализа различных конструктивных решений автомобильных силовых установок на основании вычислительного эксперимента.

### Литература

1. James Larminie, John Lowry. Electric vehicle technology explained. – John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. – 2003. – 296 p.
2. Dhameja, Sandeep. Electric vehicle battery systems / Sandeep Dhameja. Sandeep Dhameja. Newnes, 2002, 230 p.
3. K.J. Kelli, M. Mihalic, M. Zolot. Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight for various chassis dynamometer test procedures. Preprint. NREL/CP-540-31306, November, 2001.
4. Loic Boulon, Daniel Hissel, Marie-Cecile Pera. Multi physics model of a nickel based battery suitable for hybrid electric vehicle simulation // Journal of Asian Electric Vehicle, Vol. 6, No. 2, December 2008. – P. 1175-1179.
5. A H2 PEM Fuel Cell and High Energy Dense Battery Hybrid Energy Source for an Urban Electric Vehicle. N. Schofield, H. T. Yap, C. M. Bingham.
6. Yuanjun Huang, Chengliang Yin, Jianwu Zhang. Modeling and Development of the Real-time Control Strategy For Parallel Hybrid Electric Urban Buses / WSEAS TRANSACTIONS on INFORMATION SCIENCE & APPLICATIONS. Issue 7, Volume 5, July 2008. – P. 1113–1126.
7. Carlos Martinez, Yossi Drori and Joe Ciancio. Smart Battery Primer. Intersil Application Note. AN126.0. July 11, 2005.
8. Osvaldo Barbarisi, Roberto Canaletti, Luigi Glielmo, Michele Gosso, Francesco Vasca. State of charge estimator for NiMH batteries // Proceedings of the 41-st IEEE conference on decision and control. – Las Vegas, Nevada USA, december, 2002. – P. 1739–1734.
9. Francesco Esposito. A sub-optimal energy management strategy for hybrid electric vehicles. [http://www.fedoa.unina.it/1944/1/Esposito\\_Francesco\\_Ingegneria\\_Elettrica.pdf](http://www.fedoa.unina.it/1944/1/Esposito_Francesco_Ingegneria_Elettrica.pdf)
10. Xi Wei. Modelling and control of a hybrid electric drivetrain for optimum fuel economy, performance and driveability. Dissertation. Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of The Ohio State University. – 2004. – 175 p.
11. Соснин Д.А. Новейшие автомобильные электронные системы / Д.А. Соснин, В.Ф. Яковлев. – М. : СОЛОН – Пресс, 2005. – 240 с.
12. Nickel-metal hydride. Application Manual. 2001.
13. Technical Articles. Toyota Series – Hybrid. High-Voltage battery [http://www.autoshop101.com/forms/Hybrid\\_03.pdf](http://www.autoshop101.com/forms/Hybrid_03.pdf).
14. Крутиков А.А. Ультраконденсаторы улучшают КПД электромобилей и гибридных автомобилей / А.А. Крутиков // Силовая электроника. – 2006. – № 1. – С. 18–19.
15. Беляков А. И. Электрохимические суперконденсаторы: текущее состояние и проблемы развития / А. И. Беляков // Электрохимическая энергетика. – 2006. – Т. 6. – № 3. – С. 146–149.
16. M. Zolot, A. Pesaran, M. Mihalic. (NREL). Thermal Evaluation of Toyota Prius Battery Pack // National Renewable Energy Laboratory. Presented at the Future Car Congress, June 2002.

Рецензент: А.В. Бажинов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 11 марта 2010 г.