

Гибридный накопитель энергии для транспорта

КОЛОБОВ М.Г., КЛИМОВ В.И., ДУБИНИН А.В., МОСКАЛЕВ М.В.

Рассматривается эффективность применения литий-ионных батарей и суперконденсаторов в качестве накопителей электрической энергии на электротранспорте. Расчетным путем показана нецелесообразность установки одного накопителя, приводящая к повышенному расходу энергии. Наиболее перспективным вариантом является применение аккумуляторной батареи совместно с суперконденсатором.

Ключевые слова: электротранспорт, гибридная схема, суперконденсатор, аккумуляторная батарея, расход энергии

На протяжении последних лет активно ведутся разработки автомобилей с гибридной силовой установкой. В качестве электрического источника энергии используются аккумуляторы (металл-гибридные и литий-ионные), суперконденсаторы (или ионисторы – конденсаторы с двойным электрическим слоем в качестве «обкладок»), а также топливные элементы. Наибольшей популярностью сейчас пользуются именно литий-ионные аккумуляторы.

Основными причинами внедрения накопителей энергии в автомобильную промышленность являются минимизация использования нефти, главного энергетического ресурса, и экологичность данного вида источника энергии. Кроме того, применение накопителей повышает общий КПД транспортного средства за счет использования рекуперативного торможения.

Однако совместное использование аккумуляторов и теплового двигателя является не самым эффективным решением. По техническим требованиям эксплуатации аккумуляторы обладают определенными ограничениями на заряд и разряд, превышение которых ведет к резкому уменьшению ресурса использования накопителя. В отличие от аккумуляторных батарей суперконденсатор способен как принять, так и отдать большое количество энергии за короткий промежуток времени. В то же время использование суперконденсатора как единственного накопителя невыгодно, поскольку параметр удельной плотности энергии (количество запасаемой энергии на единицу массы) у него меньше, чем у самого скромного аккумулятора.

Исходя из вышесказанного появилась идея использования так называемого гибридного накопителя энергии, состоящего из аккумуляторной батареи и суперконденсатора. Суперконденсатор рабо-

The efficiency of the application of lithium-ionic batteries and super capacitors as the electric energy store for hybrid electro transport is considered. The inexpediency of the installation of only one store is shown by calculation, it leads to the increased power consumption. The most perspective variant is the application of the storage battery together with the super capacitor.

Key words: electric transport, the super capacitor, the storage battery, power consumption

тует в режимах пуска и рекуперативного торможения, когда потребляемый или отдаваемый ток превышает номинальный. Назовем эти режимы динамическими. В номинальных режимах (при номинальном токе), назовем их статическими, используется аккумуляторная батарея.

Расчет расхода энергии. Оценим расход энергии транспортного средства при отдельном и совместном использовании различных накопителей энергии [1, 2]. Для этого рассмотрим новый европейский цикл движения NEDC, представленный на рис. 1. В качестве прототипа гибридного автомобиля используем автомобиль Нива-Шевроле.

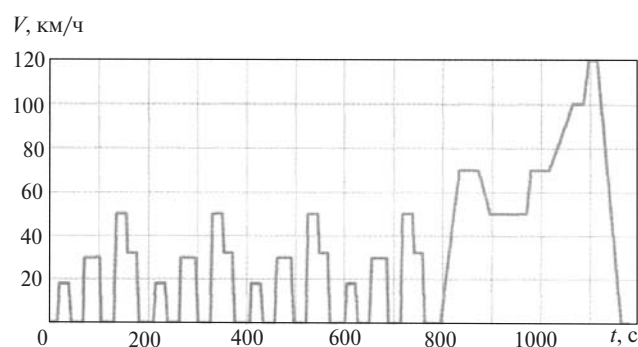


Рис. 1. Новый европейский цикл движения

Расход энергии на интервалах разгона. Расход энергии

$$A = Fs, \quad (1)$$

где F – сила; s – путь.

По второму закону Ньютона сила может быть рассчитана как произведение ускорения a на массу m транспортного средства, а путь – как произведение средней скорости на участке $V_{\text{ср}}$ на время движения t по участку:

$$F = ma; \quad (2)$$

$$s = Vt. \tag{3}$$

При расчете расхода энергии необходимо учесть влияние инерции вращающихся частей транспортного средства и сопротивление движению. Поскольку расход энергии и ускорение являются функциями времени, то итоговая формула может быть записана в виде

$$A(t) = m(1 + \gamma)a(t)V_{cp}t + W_{пуск}V_{cp}t, \tag{4}$$

где $(1 + \gamma)$ – коэффициент инерции вращающихся частей; $W_{пуск}$ – сопротивление движению на участках разгона, предварительно определенное в тяговом расчете, не приведенном здесь из-за его громоздкости.

Для расчета расхода энергии используем метод приращений, разбив график кривой движения на интервалы. Для удобства разбиение проведем по скорости с равными интервалами 2,5 км/ч.

Ускорение, средняя скорость и время на расчетном интервале:

$$a = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1}; V_{cp} = \frac{V_2 + V_1}{2}; t = t_2 - t_1,$$

где V_1, V_2 – начальная и конечная скорость рассчитываемого интервала; t_1 и t_2 – начальное и конечное время рассчитываемого интервала.

Новый европейский цикл движения состоит из четырех циклов ECE 15 (цикл городской езды, характеризующийся низкой скоростью до 50 км/ч, низкой нагрузкой на двигатель и низкой темпера-

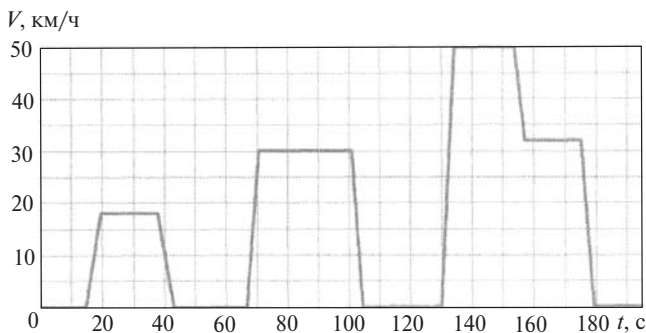


Рис. 2. Цикл городской езды ECE 15

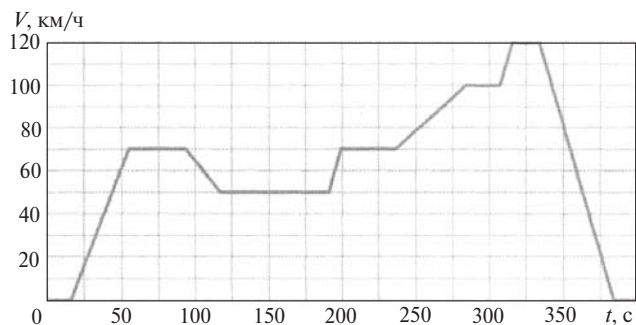


Рис. 3. Пригородный цикл EUDC

турой выхлопных газов) и одного цикла EUDC (пригородный цикл, в конце которого автомобиль разгоняется до максимально допустимой скорости на шоссе). Циклы ECE 15 и EUDC представлены на рис. 2 и 3.

Расчеты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Цикл	Результаты расчета						
	t, с	V, км/ч	V, м/с	V _{cp} , м/с	W _{v=const} , Н	a, м/с	A, кДж
ECE 15	14,6 19,5	0 18	0 5	2,5	222,54	1,02	28,8
	66,6 70,4	0 30	0 8,3	4,17	234,3	2,2	76,32
	130 134,3	0 50	0 13,9	6,95	283,3	3,2	210,8
ECE 15	209,6 214,5	0 18	0 5	2,5	222,54	1,02	28,8
	261,6 265,4	0 30	0 8,3	4,17	234,3	2,2	76,32
	325 329,3	0 50	0 13,9	6,95	283,3	3,2	210,8
ECE 15	404,6 409,5	0 18	0 5	2,5	222,54	1,02	28,8
	465,6 460,4	0 30	0 8,3	4,17	234,3	2,2	76,32
	520 524,3	0 50	0 13,9	6,95	283,3	3,2	210,8
ECE 15	599,6 604,5	0 18	0 5	2,5	222,54	1,02	28,8
	651,6 655,4	0 30	0 8,3	4,17	234,3	2,2	76,32
	715 719,3	0 50	0 13,9	6,95	283,3	3,2	210,8
EUDC	795,9 834,5	0 70	0 19,4	9,7	361,4	0,5	549,2
	971,9 978,9	50 70	13,9 19,4	16,7	556,8	0,7	267,2
	1016,4 1064,1	70 100	19,4 27,8	23,6	923,75	0,17	1452,2
	1086,8 1095,9	100 120	27,8 33,3	30,6	1407	0,61	745,4

Расчет показал, что на участках разгона при движении по циклу NEDC транспортное средство затратит

$$A_{разг} = 4,28 \text{ МДж} = 1,19 \text{ кВтч}. \tag{5}$$

Полученные данные позволяют рассчитать энергию, необходимую для транспортного средства только на участках разгона, однако исследуемый цикл также включает участки, где поддерживается постоянство скорости; для этого к транспортному средству необходимо прикладывать силу, равную силе сопротивления движению на этих участках.

Расход энергии на интервалах постоянства скорости. Рассмотрим движение транспортного средства на горизонтальной поверхности по асфальтобетонному покрытию. Примем, что при сохранении постоянства скорости сила сопротивления движению остается постоянной.

Расход энергии на преодоление сил сопротивления движению подсчитаем по формуле

$$A_{v=\text{const}} = W_{v=\text{const}} V_{\text{cp}} t, \quad (6)$$

где $W_{v=\text{const}}$ — сопротивление движению на участках поддержания постоянства скорости.

Расчеты приведены в табл. 2. Они показали, что на участках постоянства скорости при движении по циклу NEDC транспортное средство затратит

$$A_{v=\text{const}} = 4,47 \text{ МДж} = 1,24 \text{ кВтч}. \quad (7)$$

Если просуммировать энергию, которая необходима транспортному средству на участках разгона и участках поддержания постоянства скорости, то получится, что транспортное средство при движении по циклу NEDC затрачивает

$$\begin{aligned} A_{\text{сум}} &= A_{\text{разг}} + A_{v=\text{const}} = 4,28 + 4,47 = \\ &= 8,75 \text{ МДж} = 3,43 \text{ кВтч}. \end{aligned} \quad (8)$$

Проанализируем расход энергии в циклах ECE 15 и EUDC

На движение по циклу ECE 15, который соответствует городскому режиму движения, транспортное средство затрачивает

$$A_{\text{ECE 15}} = 0,58 \text{ МДж} = 0,16 \text{ кВтч}. \quad (9)$$

На движение по циклу EUDC, который соответствует загородному режиму движения, транспортное средство затрачивает

$$A_{\text{EUDC}} = 6,44 \text{ МДж} = 1,8 \text{ кВтч}. \quad (10)$$

Объяснение такой разницы достаточно простое: чем выше скорость и интенсивнее ее набор, тем большую мощность приходится забирать у источника, питающего двигатель (двигатели), тем больше расход энергии.

Режим рекуперативного торможения. Для определения энергии рекуперации проведем расчет по формуле, аналогичной (4):

$$A(t) = m(1 + \gamma)a_{\text{торм}}(t)V_{\text{cp}}t - W_{\text{торм}}V_{\text{cp}}t. \quad (11)$$

Результаты сведены в табл. 3.

Таблица 2

Цикл	Результаты расчета				
	$t, \text{ с}$	$V_{\text{cp}}, \text{ км/ч}$	$V_{\text{cp}}, \text{ м/с}$	$W_{v=\text{const}}, \text{ Н}$	$A, \text{ кДж}$
ECE 15	19,5 37,9	18	5	225,6	20,8
	70,4 100,75	30	8,3	283,3	71,6
	134,3 153,8	50	13,9	443,4	120
	157,1 175	32	8,9	295,7	47
ECE 15	214,5 232,9	18	5	225,6	20,8
	265,4 295,75	30	8,3	283,3	71,6
	329,3 348,8	50	13,9	443,4	120
	352,10 370	32	8,9	295,7	47
ECE 15	409,5 427,9	18	5	225,6	20,8
	460,4 490,75	30	8,3	283,3	71,6
	524,3 543,8	50	13,9	443,4	120
	547,1 565	32	8,9	295,7	47
ECE 15	604,5 622,9	18	5	225,6	20,8
	655,4 685,75	30	8,3	283,3	71,6
	719,3 738,8	50	13,9	443,4	120
	742,1 760	32	8,9	295,7	47
EUDC	834,5 873,2	70	19,4	683,6	513,7
	897 970,9	50	13,9	443,4	455,2
EUDC	978,9 1016,4	70	19,4	983,6	717,2
	1064,1 1086,8	100	27,8	1193,9	753,5
	1095,9 1114,1	120	33,4	1634,3	990,9

На участках торможения при движении по циклу NEDC транспортное средство сможет рекуперировать:

$$A_{\text{рек}} = 1,67 \text{ МДж} = 0,46 \text{ кВтч}.$$

В табл. 3 ускорение и энергия показаны со знаком минус — это показывает, что происходит процесс уменьшения скорости и накопления

Таблица 3

Цикл	Результаты расчета						
	t , с	V , км/ч	V , м/с	$V_{\text{ср}}$, м/с	$W_{v=\text{const}}$, Н	$a_{\text{торм}}$, м/с	$A_{\text{рек}}$, кДж
ECE 15	37,9	18	5	2,5	222,54	-1,02	-23,4
	42,8	0	0				
ECE 15	100,75	30	8,3	4,17	234,3	-2,2	-68,8
	104,54	0	0				
	153,83	50	13,9	11,4	364,1	-1,53	-105,4
	157,1	32	8,9				
	174,96	32	8,9	4,45	237,8	-2,05	-77,9
	179,3	0	0				
ECE 15	232,9	18	5	2,5	222,54	-1,02	-23,4
	237,8	0	0				
	295,75	30	8,3	4,17	234,3	-2,2	-68,8
	299,54	0	0				
	348,83	50	13,9	11,4	364,1	-1,53	-105,4
	352,1	32	8,9				
	369,96	32	8,9	4,45	237,8	-2,05	-77,9
	374,3	0	0				
ECE 15	427,9	18	5	2,5	222,54	-1,02	-23,4
	432,8	0	0				
	490,75	30	8,3	4,17	234,3	-2,2	-68,8
	494,54	0	0				
	543,83	50	13,9	11,4	364,1	-1,53	-105,4
	547,1	32	8,9				
	564,96	32	8,9	4,45	237,8	-2,05	-77,9
	569,3	0	0				
ECE 15	622,9	18	5	2,5	222,54	-1,02	-23,4
	627,8	0	0				
	685,75	30	8,3	4,17	234,3	-2,2	-68,8
	689,54	0	0				
	738,83	50	13,9	11,4	364,1	-1,53	-105,4
	742,1	32	8,9				
	759,96	32	8,9	4,45	237,8	-2,05	-77,9
	764,3	0	0				
EUDC	873,2	70	19,4	16,7	556,8	-0,23	27,5
	897	50	13,9				
	1114,1	120	33,3	16,7	676,34	-0,67	-596,8
	1164,1	0	0				

энергии. На временном интервале 873,2—897 с количество рекуперированной энергии меньше энергии, необходимой для преодоления силы сопротивления движению, поэтому энергия не только не рекуперирована, часть ее затрачивается.

Расчет аккумуляторной батареи. При расчете энергии для нового европейского цикла получили, что транспортное средство проедет $L = 10,55$ км и затратит при этом $A_{\text{расх}} = A_{\text{сум}} - A_{\text{рек}} = 8,75 - 1,67 = 7,08$ МДж = 1,97 кВтч.

Рассмотрим в качестве накопителя литийжелезофосфатную аккумуляторную батарею LiFePO₄ TS-LFP100АНА. Рекомендуемый ток для LiFePO₄

соответствует половине значения емкости, т.е. для $Ah = 100$ Ач рабочий ток $I_{\text{раб}} = 50$ А.

Средняя мощность, потребляемая транспортным средством при движении по циклу NEDC,

$$P_{\text{ср}} = A_{\text{расх}} / t_{\text{NEDC}}$$

где t_{NEDC} — время движения по циклу NEDC;

$$P_{\text{ср}} = \frac{1,97 \cdot 10^3}{1180 \cdot \frac{1}{3600}} = 66 \text{ кВт.}$$

Рабочее напряжение

$$U_{\text{раб}} = P_{\text{ср}} / I_{\text{раб}} = 120 \text{ В.}$$

Рассчитаем число ячеек, необходимых для батареи в 120 В, учитывая, что напряжение одной ячейки $U_{\text{яч}} = 3,2$ В:

$$N = 120 / 3,2 \approx 38 \text{ ячеек.}$$

Для расчета максимального пробега от одной зарядки определим затраты энергии, приходящиеся на каждый километр пути:

$$z = \frac{A_{\text{сум}}}{L} = \frac{1,97 \cdot 10^3}{10,55} = 186,7 \text{ Втч/км.}$$

Энергозапас аккумуляторной батареи

$$\mathcal{E} = NahU_{\text{яч}} = 38 \cdot 1003,2 = 12160 \text{ Втч.}$$

Максимальный пробег от одной зарядки

$$L_{\text{max}} = \frac{\mathcal{E}}{z} = \frac{12160}{186,7} = 65,1 \text{ км.}$$

Рекомендуется не разряжать аккумуляторную батарею полностью, а лишь на 70—80%, поэтому пробег тоже будет составлять 70—80% полученного значения.

Однако, если проанализировать полученные результаты, то становится очевидным, что выбранный накопитель не позволит реализовать движение по новому европейскому циклу (с данными временными интервалами). Расход энергии может быть также рассчитан как произведение силы тока на напряжение и на время. Если принять рабочее напряжение равным рассчитанному, т.е. 120 В, то на некоторых временных интервалах цикла NEDC ток превышает рабочий в 6—7 раз. Максимальный отдаваемый ток для выбранной аккумуляторной батареи соответствует 3С, что составляет 300 А, но и этого значения недостаточно на некоторых участках разгона. При рекуперации аккумуляторная батарея способна забрать отдаваемую ей энергию при движении по циклу ECE 15, однако при движении по загородному циклу (более высоких ско-

ростях) она может забрать лишь треть отдаваемой ей энергии.

Расчет суперконденсатора. Рассмотрим используемый в качестве накопителя конденсаторный блок фирмы ЭСМА. Производитель рекомендует ряд батарей для гибридного транспорта. Используем блок с наибольшим показателем запасаемой энергии – 30ЭК405U. Диапазон рабочих напряжений этого блока составляет 12–45 В, поэтому для получения 110 В необходимы три блока, соединенных последовательно. Запасаемая энергия блоков составит 1110 кДж или 308,3 Втч. Максимальная мощность 102 кВт, что позволит двигателям при необходимости работать с полной мощностью без подключения теплового двигателя.

Определим пробег транспортного средства от одной зарядки.

Из сделанного ранее расчета известно, что затраты энергии при прохождении одного километра составляют 186,7 Втч/км, поэтому

$$L_{\max} = \mathcal{E} / z = 308,3 / 186,7 = 1,65 \text{ км.}$$

Производитель рекомендует не разряжать суперконденсаторы полностью, а лишь на 3/4, поэтому максимальный пробег соответственно составит 1,2 км.

Расчет показывает нецелесообразность использования суперконденсатора в качестве единственного накопителя.

Выводы. 1. Использование в качестве накопителя энергии только аккумуляторной батареи возможно лишь в случае ее очень большой мощности, что нецелесообразно, поскольку приводит к значительному удорожанию транспортного средства. Возможные варианты решения проблемы – использование дополнительного накопителя энергии либо совместная работа с тепловым двигателем; причем в последнем случае уменьшение мощности

теплового двигателя вряд ли будет значительным. Кроме того, процесс рекуперации будет происходить не в полной мере, и рекуперированная энергия составит не более 50% общего объема.

2. Использование в качестве накопителя энергии только суперконденсатора дает эффект лишь в динамических режимах, позволяя применять тепловой двигатель в более щадящих режимах.

3. Наиболее перспективный вариант накопителя энергии – совместное использование аккумуляторной батареи и суперконденсатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Байрыева Л.С., Прокопович А.В.** Теория электрической тяги: Методическое пос. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.

2. **Основы** электрического транспорта: Учебник для студентов О–75 высш. учеб. заведений/Под общ. ред. М.А. Слепцова. –М.: Изд. центр «Академия», 2006.

Авторы: Колобов Михаил Георгиевич окончил факультет электрооборудования и автоматизации промышленности и транспорта Московского энергетического института (МЭИ) в 1965 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Исследование тормозных режимов асинхронных двигателей с преобразователями частоты со звеном постоянного напряжения». Доцент кафедры электрического транспорта МЭИ.

Климов Владимир Иванович окончил физический факультет МГУ в 1979 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Резонанс в квантово-механической системе трех тел». Зам. генерального директора ФГУП ВЭИ по спецтехнике.

Дубинин Алексей Вячеславович окончил факультет электротехники МЭИ в 2008 г. Аспирант кафедры электрического транспорта МЭИ.

Москалев Максим Викторович окончил институт электротехники МЭИ в 2010 г. Ведущий инженер отделения специальных систем электроснабжения ФГУП ВЭИ, аспирант кафедры электрического транспорта МЭИ.

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;

место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4–5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.

ростях) она может забрать лишь треть отдаваемой ей энергии.

Расчет суперконденсатора. Рассмотрим используемый в качестве накопителя конденсаторный блок фирмы ЭСМА. Производитель рекомендует ряд батарей для гибридного транспорта. Используем блок с наибольшим показателем запасаемой энергии – 30ЭК405U. Диапазон рабочих напряжений этого блока составляет 12–45 В, поэтому для получения 110 В необходимы три блока, соединенных последовательно. Запасаемая энергия блоков составит 1110 кДж или 308,3 Втч. Максимальная мощность 102 кВт, что позволит двигателям при необходимости работать с полной мощностью без подключения теплового двигателя.

Определим пробег транспортного средства от одной зарядки.

Из сделанного ранее расчета известно, что затраты энергии при прохождении одного километра составляют 186,7 Втч/км, поэтому

$$L_{\max} = \mathcal{E} / z = 308,3 / 186,7 = 1,65 \text{ км.}$$

Производитель рекомендует не разряжать суперконденсаторы полностью, а лишь на 3/4, поэтому максимальный пробег соответственно составит 1,2 км.

Расчет показывает нецелесообразность использования суперконденсатора в качестве единственного накопителя.

Выводы. 1. Использование в качестве накопителя энергии только аккумуляторной батареи возможно лишь в случае ее очень большой мощности, что нецелесообразно, поскольку приводит к значительному удорожанию транспортного средства. Возможные варианты решения проблемы – использование дополнительного накопителя энергии либо совместная работа с тепловым двигателем; причем в последнем случае уменьшение мощности

теплового двигателя вряд ли будет значительным. Кроме того, процесс рекуперации будет происходить не в полной мере, и рекуперированная энергия составит не более 50% общего объема.

2. Использование в качестве накопителя энергии только суперконденсатора дает эффект лишь в динамических режимах, позволяя применять тепловой двигатель в более щадящих режимах.

3. Наиболее перспективный вариант накопителя энергии – совместное использование аккумуляторной батареи и суперконденсатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Байрыева Л.С., Прокопович А.В.** Теория электрической тяги: Методическое пос. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.

2. **Основы** электрического транспорта: Учебник для студентов О–75 высш. учеб. заведений/Под общ. ред. М.А. Слепцова. –М.: Изд. центр «Академия», 2006.

Авторы: Колобов Михаил Георгиевич окончил факультет электрооборудования и автоматизации промышленности и транспорта Московского энергетического института (МЭИ) в 1965 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Исследование тормозных режимов асинхронных двигателей с преобразователями частоты со звеном постоянного напряжения». Доцент кафедры электрического транспорта МЭИ.

Климов Владимир Иванович окончил физический факультет МГУ в 1979 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Резонанс в квантово-механической системе трех тел». Зам. генерального директора ФГУП ВЭИ по спецтехнике.

Дубинин Алексей Вячеславович окончил факультет электротехники МЭИ в 2008 г. Аспирант кафедры электрического транспорта МЭИ.

Москалев Максим Викторович окончил институт электротехники МЭИ в 2010 г. Ведущий инженер отделения специальных систем электроснабжения ФГУП ВЭИ, аспирант кафедры электрического транспорта МЭИ.

* * *

Уважаемые авторы!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

полные имена и отчества всех авторов;

какой факультет, какого вуза и когда закончил;

когда получил ученую степень, где и по какой тематике (теме) была защита;

место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4–5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.