

УДК 629.114.4

М.С. ВЫСОЦКИЙ, академик, С.В. ХАРИТОНЧИК, канд. техн. наук,  
Н.А. ПОЗДНЯКОВ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

**УПРАВЛЕНИЕ ТОРМОЖЕНИЕМ МНОГОЗВЕННОГО АВТОПОЕЗДА  
С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТОРМОЗНОЙ ЭНЕРГИИ**

*Рассматриваются особенности торможения многозвенных автопоездов. Установлено, что с целью повышения их эффективности целесообразно обеспечить распределение тормозных сил колес, обеспечивающих как безопасное торможение, так и максимальную рекуперацию накопителями тормозной энергии. Для повышения устойчивости и предотвращения складывания при торможении в многозвенном автопоезде предложено создать некоторый «растягивающий» эффект между звеньями. Предложен алгоритм управления тормозной системой многозвенного автопоезда в режиме служебного торможения. В соответствии с ним в начальный период торможения для создания «растягивающего» эффекта должно быть осуществлено заданное распределение тормозных усилий между звеньями.*

**Ключевые слова:** многозвенный автопоезд, управление торможением, энергия торможения, рекуперация, распределение тормозных сил, моделирование, виртуальные испытания

**Введение.** Создание многозвенных автопоездов (МАП) является эффективным средством повышения производительности магистральных автомобильных перевозок грузов. Вместе с тем широкое использование нового вида транспортных средств одновременно требует и обеспечения их высокой безопасности. Это можно сделать за счет внедрения на данных автопоездах тормозных систем с электронным управлением, в технической литературе называемых EBS (Electronic Brake Systems). Они улучшают тормозную эффективность благодаря повышению скорости управляющего сигнала, поскольку пневматический контур заменяется на электрический.

Известные в настоящее время тормозные системы с электронным управлением [1, 2] эффективно решают задачи безопасного торможения и сохранения устойчивости длиннобазных автопоездов. Однако для современных магистральных транспортных средств важно не только обеспечить безопасность торможения, но и найти способы накопления высвобождаемой при торможении энергии и последующем ее использовании.

Рекуперативное торможение является особенно актуальным для МАП в связи с тем, что они имеют высокую полную массу (100 и более тонн) и соответственно высокий запас кинетической энергии при движении на максимальной скорости.

В целом, процесс торможения транспортных средств исследован достаточно глубоко для классических грузовых транспортных средств [3, 4 и др.], а проблемы рекуперации тормозной энергии в значительной степени решены для легковых автомобилей [5 и др.]. Однако до настоящего времени не рассмотрены вопросы, учитывающие особенности магистральных многозвенных автопоездов.

**Распределение энергии при торможении многозвенного автопоезда.** При торможении многозвенных автопоездов с тяговыми модулями необходимо стремиться с одной стороны обеспечивать равенство удельных тормозных сил всех колес [3], чтобы обеспечивалась устойчивость транспортного средства и равномерный износ тор-

мозных накладок. С другой стороны следует через электромоторгенераторы ведущих колес тяговых тележек звеньев обеспечить максимально возможную рекуперацию энергии торможения  $E_{рек}$ . Эти условия можно выразить следующим образом:

$$E_{рек} \rightarrow \max; \left| \frac{j}{g} - P_{yij}^{(l/r)} \right| \rightarrow 0,$$

где  $j$  — замедление МАП,  $P_{yij}^{(l/r)}$  — удельная тормозная сила левого / (правого //) колес  $j$ -го моста  $i$ -го звена автопоезда.

Особенности ходовой системы МАП позволяют применять как традиционный способ создания искусственного сопротивления движению (торможение) с использованием силы трения между колодками и диском (барабаном), так и торможение путем создания момента сопротивления электромагнитных сил на валу электрической машины, связанной с тормозящим колесом. Выработанная при этом электрическая энергия направляется на зарядку накопителей. Рекуперация возможна только при так называемом «служебном торможении», когда замедление составляет 2,5 ... 3 м/с<sup>2</sup> [6] при заранее запланированном снижении скорости движения. В связи с этим задачей управления рабочей тормозной системой является создание оптимального тормозного усилия на колесном тормозном механизме и оптимальных параметров режима зарядки батареи в условиях рекуперации энергии торможения.

Для исследования процесса торможения составим расчетную схему сил, действующих на движущийся МАП при торможении (рисунок 1).

Рассмотрим случай прямолинейного движения  $n$ -звенного МАП при торможении на участке дороги с продольным уклоном. МАП рассматривается как система, состоящая из  $n$  звеньев, взаимодействующих с тормозящими колесами и между собой. В этом случае на систему действуют: реакции дороги на опорные колеса  $R_{z11} \dots R_{zn4}$ ; тормозные силы колес  $R_{x11} \dots R_{xn4}$ ; усилия в сцепках  $P_{cп12} \dots P_{cпn-1n}$ ; силы сопротивления воздушной среды звеньев  $P_{w1} \dots P_{wn}$ ; силы тяжести звеньев  $G_1 \dots G_n$ ; силы инерции звеньев  $P_{j1} \dots P_{jn}$ .

Тормозные усилия колес при условии отсутствия на них ведущего момента можно разложить на две составляющие:

$$R_x = R_x^m + (P_j \pm P_\alpha),$$

где  $R_x^m$  — тормозная сила, созданная за счет момента в механизмах, создающих сопротивление вращению колеса;  $(P_j \pm P_\alpha)$  — суммарная внешняя сила сопротивления движению.

В свою очередь сила  $R_x^m$  складывается из тормозных усилий, созданных за счет сил трения  $R_x^{mm}$  и за счет электромагнитных сил  $R_x^{mэ}$ .

Для повышения устойчивости и предотвращения складывания при торможении в многозвенном автопоезде необходимо создать некоторый «растягивающий» эффект между звеньями и обеспечить положительные значения сил в сцепных устройствах  $P_{cn12} \dots P_{cn(n-1)n}$ . При этом для обоснования величин этих усилий можно принять некоторую пороговую величину  $p_{jt}$ , зависящую от силы инерции звена, например, до 5 % ее значения. Таким образом:

$$P_{cni} = p_{jt} P_{ji} = p_{jt} m_i j,$$

где  $m_i$  — масса  $i$ -того звена МАП.

Пользуясь рисунком 1, можно записать уравнение движения МАП при торможении для случая прямолинейного движения:

$$(m_1 + m_2 + \dots + m_n) j = (R_{x11} + R_{x12} + \dots + R_{xn4}) + (P_{w1} + P_{w2} + \dots + P_{wn}) \pm \pm (m_1 + m_2 + \dots + m_n) g \cdot \sin \alpha + (P_{cn12} + P_{cn23} + P_{cn(n-1)n}). \quad (1)$$

В слагаемом, определяющем продольную составляющую силы тяжести знак «+» используется при торможении на подъеме, а знак «-» при торможении на спуске.

Максимально возможное замедление  $j_{max}$ , исключающее блокировку тормозящих колес можно определить по коэффициенту  $\varphi_x$  сцепления шины с дорогой [4]:

$$j_{max} = kg(\varphi_x \cos \alpha \pm \sin \alpha), \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент нагрузки ведущих колес.

Как показывают расчеты,  $j_{max}$  найденное по формуле (2), колеблется в пределах от 10...12 м/с<sup>2</sup> при изменении коэффициента сцепления от 0,1 до 0,9 и угле подъема от 0 до 18 %.

Желаемое замедление  $j$  должно находиться в прямой зависимости от положения педали тормоза, задаваемого водителем. При использовании в тормозной системе принципов электронного управления тормо-

жением (EBS) в блок управления должна быть внесена зависимость требуемого замедления от положения  $h$  педали тормоза.

Процесс торможения предполагает снижение накопленной МАП при разгоне кинетической энергии и описывается разностью:

$$\Delta E = \frac{mv_0^2}{2} - \frac{mv_k^2}{2}, \quad (3)$$

где  $v_0$  и  $v_k$  — соответственно начальная и конечная скорости движения МАП за время осуществления торможения.

Снижение кинетической энергии на пути торможения происходит вследствие осуществления работы сил сопротивления движению:

$$\Delta E = (R_x + P_w) s,$$

где  $s$  — пройденный МАП путь за время торможения.

Силы инерции  $P_j$  звеньев рассматриваются как следствие изменения кинетической энергии МАП, усилия в сцепках  $P_{cn}$  — как часть сил  $R_x + P_w$ .

Рассмотрим распределение энергии торможения на ведущих (оборудованных электромоторами) и ведомых (необорудованных электромоторами) колесах МАП.

Распределение энергии торможения можно записать в виде:

$$\Delta E = E_{R,m} + E_{R,pek} + E_w,$$

где  $E_{R,m}$  — энергия торможения, рассеянная во фрикционном тормозном механизме;  $E_{R,pek}$  — энергия торможения, поглощенная системой рекуперации;  $E_w$  — энергия сопротивления воздушной среды.

Количество полезной рекуперированной за процесс торможения энергии  $E'_{R,pek}$  меньше  $E_{R,pek}$  на величину потерь  $E_{R,синх}$  по созданию синхронной частоты и потерь  $E_{R,пр}$  в преобразовательных устройствах. Таким образом:

$$E'_{R,pek} = E_{R,pek} - E_{R,синх} - E_{R,пр}.$$

Как было сказано выше, оптимальным распределением энергии торможения в режиме рекуперации электромоторколесами будем считать такое, при котором обеспечивается максимальная рекуперация энергии торможения и минимальный износ тормозных механизмов.

Степень удовлетворения первого требования оценивается соотношением  $E_{R,pek} / (E_{R,m} + E_{R,pek})$ , а второго —  $E'_{R,pek} / (E_{R,m} + E_{R,pek})$ .

Количество рекуперированной энергии торможения ограничивается некоторыми факторами, обусловленными внутренними свойствами электромашин и на-

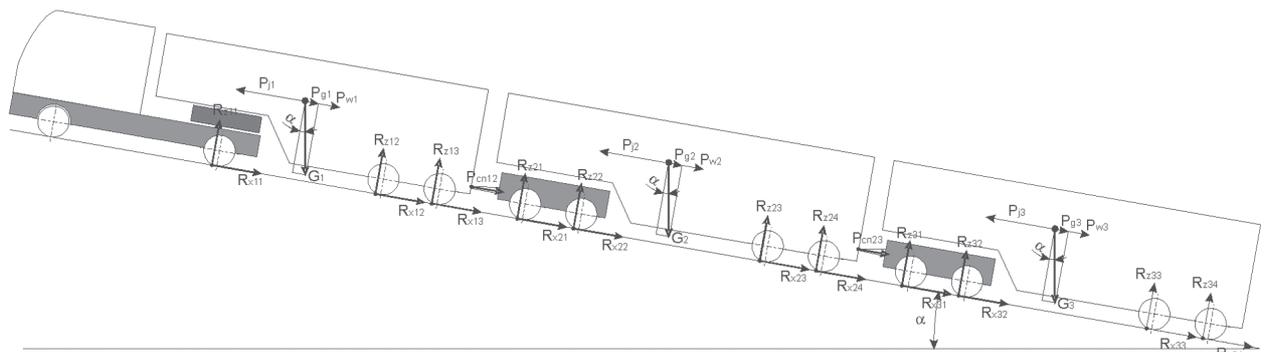


Рисунок 1 — Схема сил, действующих на n-звенный автопоезд при торможении в общем случае прямолинейного движения

копителей. Уровень заряда батареи  $\rho$  влияет на эффективность ее заряда. Это влияние можно представить в виде зависимости КПД заряда  $\eta_z$  от уровня заряда (рисунок 2).

Режим заряда батареи характеризуется конкретными значениями силы тока  $I$  и напряжения  $U$ , создаваемыми в зарядном устройстве. Таким образом, мощность заряда равна  $N_z = U \cdot I$ . Эта мощность, согласно рисунку 2, возрастает с увеличением уровня заряда батареи, так как:

$$\eta_z = N_z^n / N_z,$$

где  $N_z^n$  — мощность поглощенной энергии в батарее.

Соответственно возрастает разность  $E_{R.рек} - E'_{R.рек}$ , рассеиваемая в виде теплоты в электромашине и преобразовательных устройствах.

Вторым фактором является особенность электромашины, заключающаяся в том, что при низких частотах вращения на возбуждение ее обмотки тратится больше энергии, чем возвращается в батарею.

При использовании асинхронной электромашины в генераторном режиме необходимо создавать синхронную частоту переменного тока в обмотках статора, зависящую от частоты вращения ротора для достижения максимального КПД генератора. Современные тяговые асинхронные электромашины, работающие в генераторном режиме, требуют потребления реактивной мощности от постороннего источника. Минимальная потребляемая реактивная мощность составляет 25...30 % от мощности генератора. Снижение частоты вращения ротора генератора, напрямую связанного с тормозящим колесом звена МАП, снижает его КПД (рисунок 3), который стремится к нулю при достижении определенной частоты. Таким образом, рекуперация энергии торможения становится невозможной при частотах вращения ведущего колеса ниже предельной по условиям рекуперации и соответствующей ей скорости движения МАП  $v_{min}^g$ .

В этом случае, количество запасенной рекуперированной энергии в батарее за время торможения равно  $E'_{R.рек} = U \cdot I \cdot t$ , а энергия, поглощенная системой рекуперации, —  $E_{R.рек} = \frac{U \cdot I \cdot t}{\eta_z \eta_e}$ . Здесь  $t$  — время торможения.

Распределение относительной энергии торможения в зависимости от скорости движения можно представить на диаграмме (рисунок 4). На этой диаграмме показаны

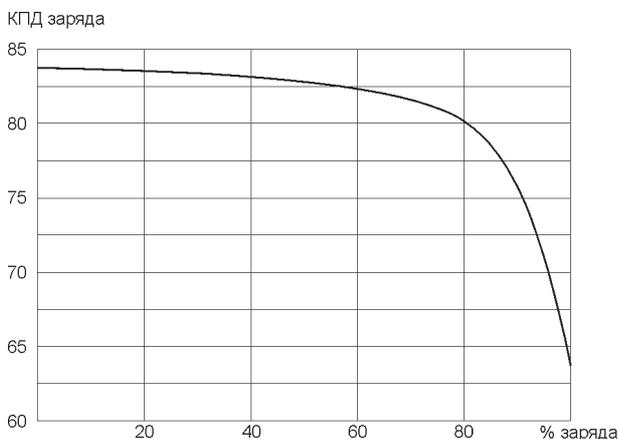


Рисунок 2 — Зависимость КПД заряда Ni—Cd батарей от уровня заряда [6]

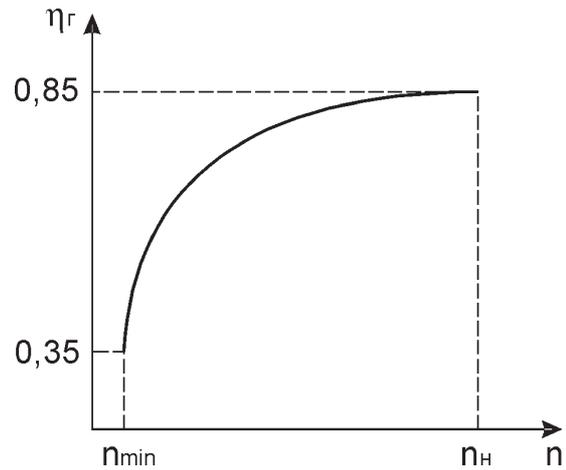


Рисунок 3 — Зависимость КПД асинхронного генератора от частоты вращения ротора [7]

предельно возможные относительные значения энергии, поглощенной системой рекуперации при минимально возможных потерях  $E_{R.синх} + E_{R.лр}$ .

При торможении МАП с использованием рекуперации на ведущих колесах должны осуществляться два регулирующих воздействия: давление в тормозных камерах  $p$  и синхронная частота  $n_{синх}$  вращения электромагнитного поля электромашины.

При рассмотрении процесса торможения МАП в целом оптимальным будем считать такое управление процессом торможения каждого звена, при котором будет обеспечена равномерная тормозная нагрузка  $P_{удл}$  на все тормозные механизмы и реализована максимально возможная рекуперация тормозной энергии.

Условие равномерной тормозной нагрузки на тормозные механизмы запишем в виде:

$$P_{y\partial 11} = \frac{R_{x11}}{R_{z11}} = P_{y\partial 12} = \frac{R_{x12}}{R_{z12}} = \dots = P_{y\partial n4} = \frac{R_{xn4}}{R_{zn4}}.$$

Умножив все слагаемые уравнения (1) на скорость движения  $V$  при торможении можно записать уравнение мощностного баланса при торможении:

$$N = N_t + N_w + N_\alpha + N_{ca},$$

где  $N_t$  — мощность торможения, приложенная к тормозящим колесам. Эта мощность является активной в процессе торможения, т.е. ею можно управлять.

Мощность  $N_t$  можно разложить на следующие составляющие:

$$N_t = N_t^m + N_t^g + N_t^f,$$

где  $N_t^m$  — мощность, созданная во фрикционных тормозных механизмах;  $N_t^g$  — мощность электромагнитных сил, затраченных на рекуперацию энергии торможения;  $N_t^f$  — мощность, созданная силами сопротивления качению.

**Алгоритм управления торможением.** Алгоритм управления тормозной системой в режиме служебного торможения можно описать следующим образом.

Запуск программы торможения происходит сразу после нажатия водителем на педаль тормоза. При этом фиксируется положение педали, осуществляется разобщение двигателя и трансмиссии головного звена и вычисляется требуемое замедление  $j$ , давление в тормозных камерах колес и синхронная частота перемен-

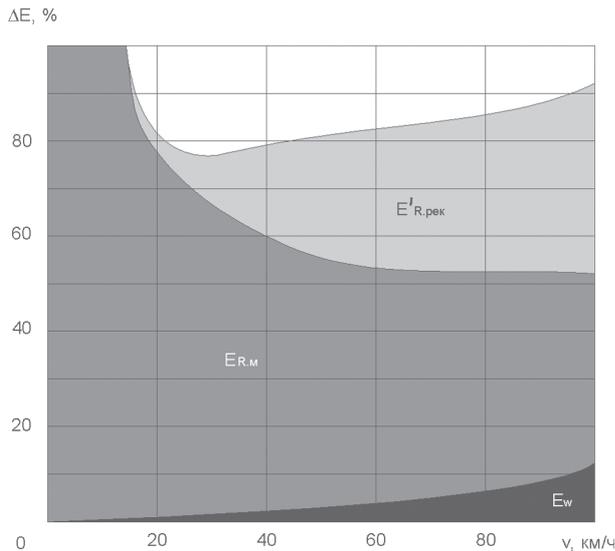


Рисунок 4 — Распределение энергии торможения по видам в зависимости от скорости движения при торможении

ного тока в электромашине. В начальный период торможения для создания «растягивающего» эффекта должно быть осуществлено неравномерное распределение тормозных усилий между звеньями: в последнем звене должно быть создано тормозное усилие на каждом из колес  $R^T = R_x^{TM} + R_x^{TP} = jgR_x/P_{уд}$ . В  $n-1$  звене должно быть создано тормозное усилие  $(1-P_{удj})jgR_x/P_{уд}$ , в звене  $(n-2)$  тормозное усилие должно быть  $(1-P_{удj})^2jgR_x/P_{уд}$ , и т.д. Такое распределение должно сохраняться до достижения усилия в сцепке  $P_{сп(n-1)n}$ .

Фиксация факта  $P_{сп(n-1)n} \geq p_{fT} P_{jn}$  является сигналом для установления усилия в тормозных механизмах звена  $(n-1)$ , соответствующего заданному замедлению. При этом по величине уровня заряда накопителей и частоте вращения ротора электродвигателя блоком управления должны подаваться команды на установление синхронной частоты переменного тока статоров тормозящих колес.

Рекуперация энергии возможна только на ведущих колесах, с которыми связаны электромашин. Таким образом, в общем случае тормозная мощность ведущего колеса звена МАП равна:

$$N_T = R_x^{TM} \cdot v + \frac{UI}{n_s \eta_e} + P_f \cdot v.$$

Выполненные расчеты рекуперированной энергии (рисунок 5) при движении МАП в режиме торможения позволяют сформулировать требования к настройке системы управления рекуперацией энергии торможения.

Анализируя расчетные данные, можно сделать вывод, что скорость движения МАП оказывает большее влияние на эффективность процесса рекуперации. Так, при снижении скорости с  $V_{max}$  до  $0,5V_{max}$  мощность заряда снижается в 2,6 раза, а при изменении уровня заряда батареи от 10 до 80 % (что составляет основной рабочий диапазон батареи) мощность заряда снижается всего лишь на 5...6 %.

Алгоритм управления торможением с использованием электромашин ведущего колеса показан на рисунке 6.

Торможение начинается по факту нажатия водителем на педаль тормоза. При этом по сигналам от датчиков в подвеске вычисляются  $P_{удj}$ , необходимые для расчета блоком управления давлений  $p$  в тормозных камерах. Одновременно вычисляется требуемое

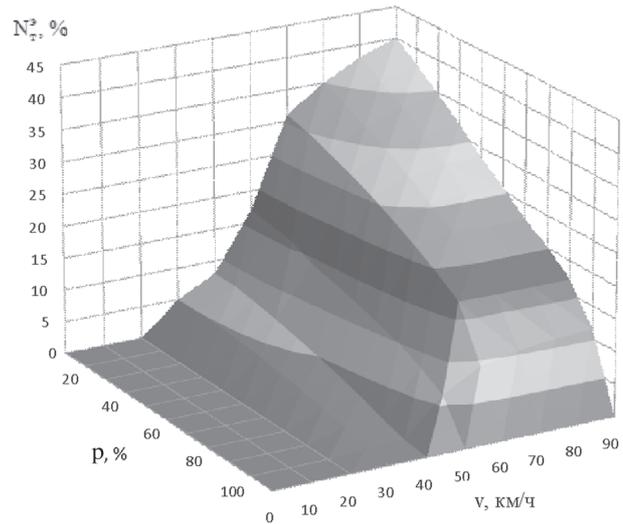


Рисунок 5 — Зависимость рекуперированной мощности торможения от скорости движения МАП и уровня заряда батареи

значение частоты  $n$  вращения колеса (ротора электромашин). Это значение сравнивается с минимальным  $n_{min}$  по условиям возможности рекуперации. При положительной разности  $n-n_{min}$ , блоком управления подается команда на задание синхронной частоты  $n_{синх}$  вращения электромагнитного поля статора электромашин. При этом считываются показания  $j_d$  датчика ускорения, которые сравниваются с  $j$ . При положительной разнице  $j_d-j$  (недостаточное замедление) подается команда на создание давления в тормозных камерах. Давление увеличивается до тех пор, пока действительная частота  $n_d$  вращения колеса не сравняется (станет меньше) значения  $n$ .

**Моделирование процесса торможения.** Для оценки эффективности предложенного алгоритма составлена модель процесса торможения отдельного звена МАП (рисунок 7) в среде моделирования MATLAB/Simulink.

В процессе испытаний модели оценивались общие показатели тормозных свойств (замедление, тормозной путь) и режимные параметры процесса рекуперации энергии торможения. На рисунках 8—10 представлены результаты измерений параметров и показателей при торможении четырехосного звена полной массой 31,15 т от максимальной скорости  $V_0 = 90$  км/ч до полной остановки ( $V_k = 0$ ). При испытаниях начальный уровень заряда батареи был принят 50 %. При испытаниях обеспечивалось служебное торможение с замедлением  $j_{cp} = -3...-2,5$  м/с<sup>2</sup>.

Интегральная кривая запасенной в батарее электрической энергии представлена на рисунке 10.

Как следует из результатов виртуальных испытаний (см. рисунок 10) начальный период торможения характеризуется низкой интенсивностью нарастания мощности  $N^3_T$ . Это происходит из-за сравнительного длительного периода перехода асинхронной электромашин в генераторный режим. Результаты виртуальных испытаний для других значений начальных скоростей торможения представлены в таблице.

**Заключение.** Обоснованы принципы рационального распределения тормозных сил с учетом обеспечения максимальной рекуперации энергии торможения. Установлено, что на величину рекуперированной энергии за время торможения влияют частота враще-

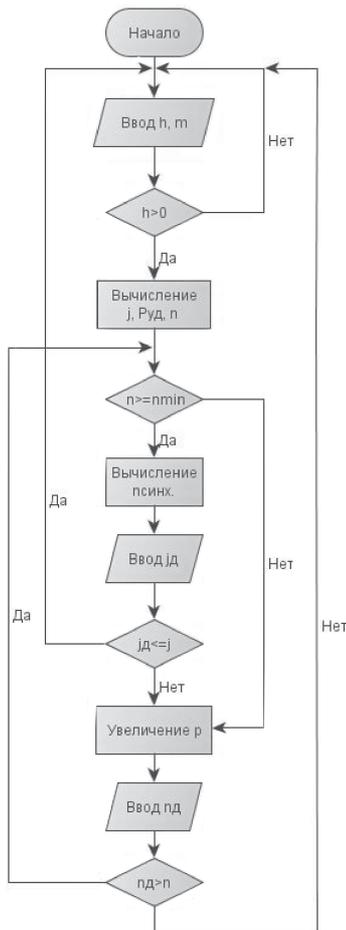


Рисунок 6 — Упрощенная блок-схема алгоритма управления торможением ведущего колеса

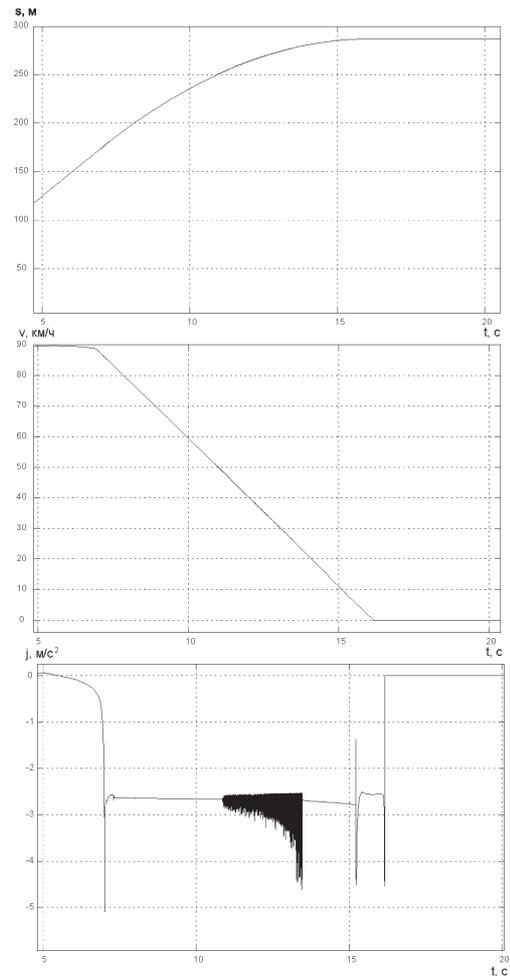


Рисунок 8 — Результаты виртуальных испытаний тормозных свойств звена МАП

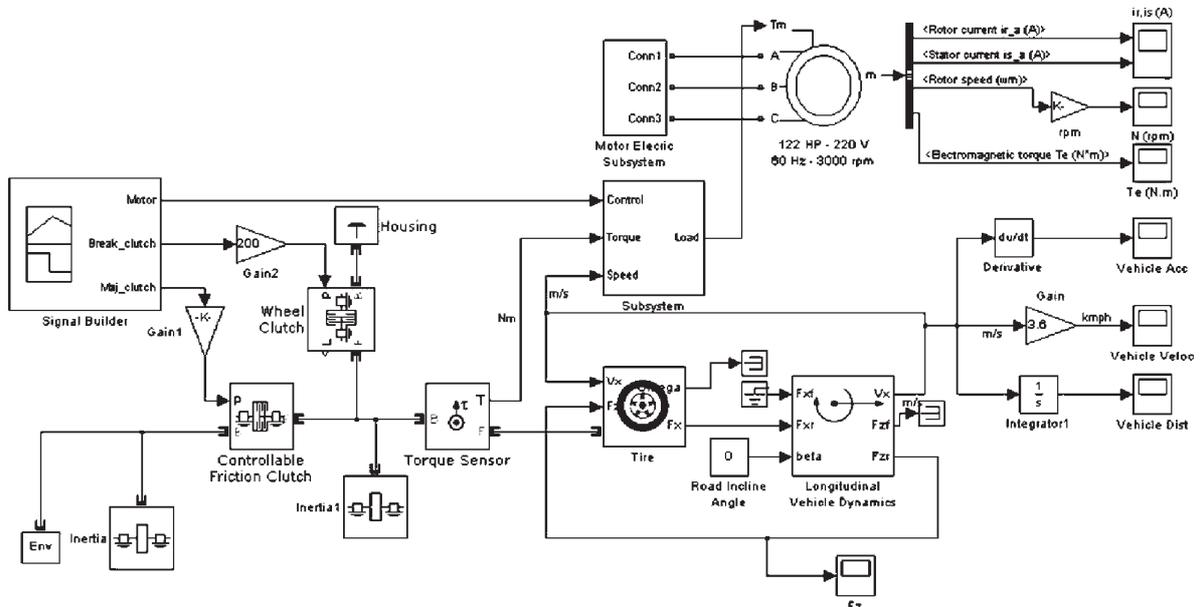


Рисунок 7 — Модель процесса торможения

ния колес и уровень заряда батареи. Выполнены расчеты зависимости рекуперированной мощности от этих параметров.

На основании анализа условий торможения с рекуперацией предложен алгоритм управления приводом

колесных тормозов и асинхронной электромашинной в процессе торможения.

Для оценки эффективности предложенного алгоритма составлена модель процесса торможения в среде моделирования MATLAB/Simulink.

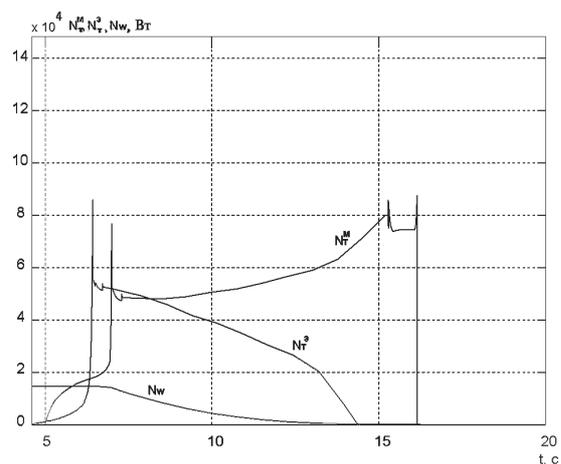


Рисунок 9 — Результаты виртуальных испытаний модели звена МАП по определению мощностного баланса процесса торможения

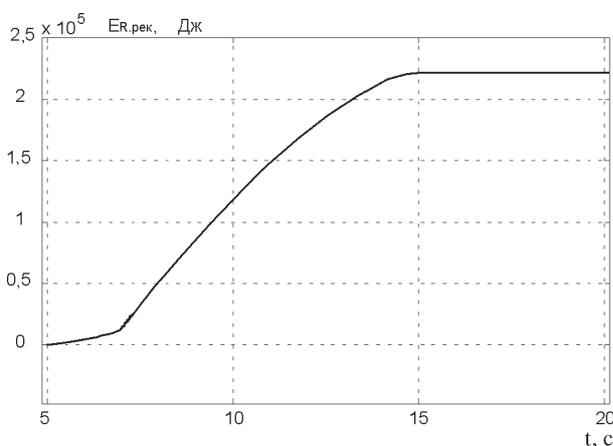


Рисунок 10 — Интегральная кривая запасенной в батарее электрической энергии

Выполненные исследования показывают, что наиболее эффективно рекуперировать энергию торможения на скорости около 70 км/ч. Эффективность рекуперации энергии резко снижается со снижением скорости тор-

Таблица — Результаты виртуальных испытаний тормозных свойств МАП

| Начальная скорость торможения, м/с (км/ч) | Конечная скорость торможения | Общие показатели тормозных свойств |                 | Параметры рекуперации |   |
|---|------------------------------|------------------------------------|-----------------|-----------------------|---|
|   |                              | $s_T, м$                           | $j_{cp}, м/с^2$ | $E, МДж$              | $E_{R_{рек}} / (E_{R_{м}} + E_{R_{рек}}), \%$ |
| 25,0 (90)                                 | 0                            | 160                                | 2,66            | 9,73                  | 34  |
| 19,4 (70)                                 |                              | 115                                | 2,64            | 5,86                  | 36  |
| 13,9 (50)                                 |                              | 74                                 | 2,62            | 3,01                  | 28  |
| 8,3 (30)                                  |                              | 67                                 | 2,59            | 1,07                  | 21  |
| 5,6 (20)                                  |                              | 56                                 | 2,40            | 0,49                  | 11  |

можения и при 12,5 км/ч рекуперация становится неэффективной из-за больших затрат мощности на создание синхронной частоты электромашин.

**Список литературы**

1. Продукция [Электронный ресурс]. — 2011. — Режим доступа: [http://www.knorr-bremsesfn.ru/ru/products\\_1/products\\_1.jsp](http://www.knorr-bremsesfn.ru/ru/products_1/products_1.jsp). — Дата доступа: 01.08.2011.
2. Electronic braking system (EBS) [Электронный ресурс]. — 2011. — Режим доступа: <http://www.wabco-auto.com/ru/produkty/brake-stablity-control/electronic-braking-system-ebs>. — Дата доступа: 11.09.2011.
3. Богдан, Н.В. Разработка теоретических основ и создание систем регулирования тормозных сил на осях тракторного поезда: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.05.03 / Н.В. Богдан. — Минск, 1983. — 357 с.
4. Automotive handbook. 6th Edition. — Plochingen: Robert Bosch GmbH, 2004. — 1231 p.
5. Fast electric car with double the motor power [Electronic recourse]. — 2005. — Mode of access: <http://www.siemens.com/innovation/en/index.php>. — Date of access: 15.09.2011.
6. Tremblay, O. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications / O. Tremblay, L.-A. Dessaint // World Electric Vehicle Journal. — 2009. — Vol. 3.
7. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. — Т. 1. — М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1988.

Vysotski M.S., Kharytonchyk S.V., Pozdnyakov N.A.  
**Multilink truck braking control with brake energy recuperation**

Features of braking of multilink trucks are considered. It is established that for increase of trucks efficiency it is expedient to provide the distribution of brake forces of the wheels providing both safe braking and maximum recuperation with stores of brake energy. To increase stability and folding prevention at braking it is offered to create in the multilink trucks some «stretching» effect between links. The algorithm of control brake system of the multilink trucks in a mode of operating braking is offered. According to it in an initial stage of braking for creation of «stretching» effect the given distribution of brake efforts between links should be carried out.

Поступила в редакцию 28.10.2011.