**ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ТРОЛЛЕЙБУСА С ТЯГОВЫМ
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ
И СУПЕРКОНДЕНСАТОРНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ГЕНЕРИРУЕМОЙ ЭНЕРГИИ****В. А. Волков**

Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»

просп. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, 49600, Украина. E-mail: green_stone@ukr.net

Работа посвящена минимизации при пуско-тормозных режимах (посредством энергосберегающих траекторий изменения скорости и оптимальных длительностей времени разгона и торможения) электропотребления троллейбуса, снабженного частотно-регулируемым асинхронным двигателем и суперконденсаторным накопителем генерируемой энергии. При проведении исследований использовались методы энергетического баланса, математического анализа и имитационного компьютерного моделирования. Определен вид траекторий скорости при разгоне и торможении троллейбуса, соответствующих минимизации общего и удельного потребления энергии троллейбусом. Выявлено наличие оптимальных длительностей времени разгона и торможения, обеспечивающих минимизацию общего потребления энергии троллейбусом в пуско-тормозных режимах. Предложены аналитические зависимости для расчета общего и удельного потребления и генерации энергии троллейбусом, содержащим суперконденсаторный накопитель генерируемой энергии. Применительно к исследуемым различным (линейной, параболической и квазиоптимальной) траекториям изменения скорости троллейбуса, получены расчетные соотношения для минимально возможных значений времени его разгона и торможения, исходя из допустимых для троллейбуса максимальных ускорения и замедления в указанных режимах. Исследованы электромеханические и энергетические процессы в троллейбусе, тяговом двигателе и суперконденсаторе при пуско-тормозных режимах. Выполнены расчеты общего и удельного электропотребления троллейбусом при движении между соседними остановками с упомянутыми разными видами траекторий скорости в пуско-тормозных режимах. Практическое использование результатов исследований позволяет уменьшить до минимально возможных значений общее или удельное потребление энергии троллейбусом при его движении.

Ключевые слова: троллейбус, тяговый асинхронный двигатель, частотное регулирование, электропотребление, оптимизация.

**ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ТРОЛЕЙБУСА З ТЯГОВИМ
ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ І СУПЕРКОНДЕНСАТОРНИМ
НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ, ЩО ГЕНЕРУЄТЬСЯ****В. О. Волков**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49600, Україна. E-mail: green_stone@ukr.net

Роботу присвячено мінімізації при пуско-гальмівних режимах (за допомогою енергозберігаючих траєкторій зміни швидкості та оптимальних тривалостей часу розгону й гальмування) електроспоживання тролейбуса, забезпеченого частотно-регульованим асинхронним двигуном та суперконденсаторним накопичувачем енергії, що генерується. При проведенні досліджень використовувалися методи енергетичного балансу, математичного аналізу та імітаційного комп'ютерного моделювання. Визначено вид траєкторій швидкості при розгоні та гальмуванні тролейбуса, відповідних мінімізації загального й питомого споживання енергії тролейбусом. Виявлено наявність оптимальних тривалостей часу розгону й гальмування, що забезпечують мінімізацію загального споживання енергії тролейбусом в пуско-гальмівних режимах. Запропоновані аналітичні залежності для розрахунку загального та питомого споживання й генерації енергії тролейбусом, що містить суперконденсаторний накопичувач енергії, що генерується. Стосовно до досліджуваних різних (лінійної, параболическої й квазіоптимальної) траєкторій зміни швидкості тролейбуса, отримано розрахункові співвідношення для мінімально можливих значень часу його розгону й гальмування, виходячи з допустимих для тролейбуса максимальних прискорення та уповільнення в зазначених режимах. Досліджено електромеханічні та енергетичні процеси в тролейбусі, тяговому двигуні та суперконденсаторі при пуско-гальмівних режимах. Виконано розрахунки загального та питомого електроспоживання тролейбусом при русі між сусідніми зупинками зі згаданими різними видами траєкторій швидкості в пуско-гальмівних режимах. Практичне використання результатів досліджень дозволяє зменшити до мінімально можливих значень загальне або питоме споживання енергії тролейбусом при його русі.

Ключові слова: тролейбус, тяговий асинхронний двигун, частотне регулювання, електроспоживання, оптимізація.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Главной мировой тенденцией развития городского общественного электротранспорта (трамвая, троллейбуса) является создание его на основе тягового частотно-регулируемого асинхронного двигателя (ЧРАД), что

обусловлено повышенной надежностью и уменьшенными расходами при обслуживании, увеличенными межремонтными сроками эксплуатации и общими сроками службы этого двигателя. Такие трамваи и троллейбусы в настоящее время выпускаются

более, чем в двадцати странах мира (в том числе – в Германии, США, Италии, России, Белоруссии, Польше, Китае, Японии и др.) [1, 2]. Принимая же одновременно во внимание существующую ныне относительно высокую стоимость электроэнергии и продолжающуюся тенденцию к ее удорожанию в Украине и в мире, становится очень актуальной и востребованной практикой минимизация потребляемой электроэнергии городским общественным электротранспортом и максимизация генерируемой им электроэнергии как при движении с установившимися скоростями, так и – в пуско-тормозных режимах (которые, как известно, составляют для него относительно большую часть во временном цикле движения между соседними остановками).

В существующей зарубежной и отечественной научно-технической литературе вопросам исследования потерь мощности, потребляемой или генерируемой энергии, энергосберегающего управления электротранспортом с тяговыми ЧРАД посвящен ряд публикаций. В частности, применительно к трамваю: в [3] разработана компьютерная модель для вычисления потребляемой мощности и энергии тяговыми двигателями и потребляемой энергии трамваем от питающей электрической подстанции в установившихся и пуско-тормозных режимах при заданной траектории изменения его скорости (но – без исследования влияния формы этой траектории на электропотребление и электрогенерацию трамваем); в [4, 5] выполнены исследования энергоэффективности тяговых ЧРАД трамвая при осуществлении их питания через трехфазный инвертор напряжения: из контактной электрической сети (КЭС) или от дополнительно установленного накопителя генерируемой энергии в виде аккумуляторной батареи (АБ) или суперконденсатора (СК), а также предложено энергосберегающее управление тяговым ЧРАД при электрическом (рекуперативном) торможении. Это управление заключается в формировании определенных длительностей параболического вида (выпуклой формы) энергосберегающих траекторий скорости трамвая при торможении, при которых обеспечивается наибольшая генерация энергии в АБ или СК. Причем последующее потребление энергии трамваем в режимах тяги происходит сначала от упомянутых АБ или СК, а только затем – от КЭС (за счет чего обеспечивается общее снижение потребления энергии тяговыми ЧРАД из КЭС и уменьшение потерь энергии в этой сети).

Применительно к троллейбусу (для которого осуществима также техническая возможность питания тягового ЧРАД по выбору: от КЭС или от накопителя генерируемой энергии в виде АБ либо СК) в [6] приводятся соответствующие ему основные технические характеристики и удельный расход электроэнергии при движении. В публикации [7] для троллейбуса (не содержащего накопителя генерируемой энергии) с тяговыми ЧРАД: выполнены расчеты сил сопротивления его движению и статического момента сопротивления для тягового двигателя;

осуществлены исследования общих потерь энергии тягового ЧРАД в пуско-тормозных режимах и энергосберегающих траекторий скорости, обеспечивающих минимизацию общих потерь энергии в тяговых ЧРАД при этих режимах; предложено нахождение оптимальной установившейся скорости, при которой минимизируется общее энергопотребление троллейбуса; оценено его электропотребление и электрогенерация в пуско-тормозных режимах.

Однако при этих исследованиях предполагалась техническая возможность при торможении троллейбуса реализации режима генерации энергии тяговым ЧРАД в контактную электрическую сеть, что на практике не всегда оказывается возможным. А именно, для реализации данного режима генерации (от троллейбуса, находящегося в режиме торможения) необходимо присутствие на тех же питающих троллеях в этот момент времени хотя бы одного другого (соседнего) троллейбуса, который в это время осуществляет (при режимах разгона или установившегося движения) потребление энергии из КЭС. На практике данная ситуация не всегда выполняется (особенно при малоинтенсивном движении троллейбусов). По этой причине (исходя из невозможности реализации экономичного электрического торможения тягового ЧРАД с генерацией энергии в сеть) для осуществления торможения в этом случае вынужденно на практике применяется совсем неэкономичный вид механического торможения троллейбуса (посредством тормозных колодок). Кроме этого, даже при возможной реализации режима генерации энергии (передаваемой от тормозящего троллейбуса к одному или нескольким соседним троллейбусам, потребляющим энергию в это время), возникающие потери энергии в троллеях увеличены и зависят от длины троллей между тормозящим и указанным потребляющим генерируемую энергию троллейбусами.

Упомянутые выше недостатки могут быть устранены применительно к троллейбусу с тяговым ЧРАД посредством использования схемы электропитания с суперконденсаторным накопителем генерируемой энергии [6]. Однако до настоящего времени в известной отечественной и зарубежной научно-технической литературе отсутствуют публикации, рассматривающие применительно к данной схеме электропитания троллейбуса вопросы исследования электромеханических и энергетических процессов троллейбуса и его тягового двигателя, энергосберегающих траекторий изменения скорости и оптимальных времени разгона и торможения троллейбуса, а также минимизации его электропотребления в этих режимах.

Цель работы – минимизация при пуско-тормозных режимах (посредством энергосберегающих траекторий изменения скорости и оптимальных длительностей времени разгона и торможения) электропотребления троллейбуса, снабженного частотно-регулируемым асинхронным двигателем и суперконденсаторным накопителем генерируемой энергии.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

При исследованиях приняты допущения:

- объектом исследования являются электро-механические и энергетические процессы для троллейбуса с тяговым ЧРАД при режимах разгона и установившегося движения (с потреблением электроэнергии из КЭС либо из СК) и электрического торможения (с генерацией энергии от тягового двигателя только в СК) – применительно к схеме электропитания, представленной на рис. 1,а; основные технические характеристики исследуемого троллейбуса даны в [7], а режимы работы силовых ключей $V_1 \dots V_4$ в преобразователях напряжения «dc/dc 1» и «dc/dc 2» [8, 9], входящих в эту схему электропитания (примеры выполнения которых показаны на рис. 1,б,в,г), поясняются из [10] в табл. 1;
- применялось идеализированное представление тягового короткозамкнутого ЧРАД типа АТ250L4У2 (номинальной мощностью 120 кВт и номинальным действующим линейным статорным напряжением 400 В), дополненное учетом потерь мощности в стали этого двигателя [7];
- параметры тягового ЧРАД (у которого активные сопротивления были приведены к температуре 115 °С) полагались неизменными;
- полагалось использование для тягового привода троллейбуса векторного типа системы автомати-

ческого управления (САУ), характеризующейся раздельным регулированием намагничивающей i_{1x} и активной i_{1y} проекций обобщенного вектора статорного тока $\bar{i}_1$ (образованного основными гармоническими составляющими фазных статорных токов) ЧРАД на оси вращающейся ортогональной координатной системы «х-у», связанной вещественной осью «х» с обобщенным вектором потоко-сцепления ротора этого двигателя;

– не учитывались свободные (затухающие) составляющие статорных токов тягового ЧРАД в режимах разгона и торможения (что возможно вследствие использования векторной САУ, характеризующейся высоким быстродействием и точностью);

– для тягового ЧРАД при режимах разгона и торможения посредством САУ реализовывались две зоны регулирования: в первой зоне (при $0 < \omega \leq \omega_n$)

– при постоянстве модуля потоко-сцепления ротора Ψ_r , равном его номинальному значению Ψ_{rn} , а во второй зоне (при $\omega > \omega_n$) – при постоянстве соотношения: $\omega_1 \Psi_r = \omega_{1n} \Psi_{rn} = const$ [11], где ω_1 и ω_{1n} – текущее и номинальное значения частоты статора; ω и ω_n – текущее и номинальное значения скорости ротора тягового двигателя, соответственно;

Рисунок 1 – Электрические схемы: а) питания собственных нужд и тягового ЧРАД троллейбуса;

б) повышающего преобразователя напряжения «dc/dc 1»; в) повышающе-понижающего преобразователя напряжения «dc/dc 1»; г) понижающего преобразователя напряжения «dc/dc 2» (где АИН-ШИМ – трехфазный автономный инвертор напряжения, выполненный на IGBT-транзисторах, шунтированных обратными диодами;

СК – суперконденсатор; М – тяговый ЧРАД; $U_{кэс}$ – напряжение контактной электрической сети;

$U_{сн}$ – напряжение питания собственных нужд; АБ (СН) – аккумуляторная батарея для питания собственных нужд; К – катушка электро-механического реле (содержащего н.о. контакт К1 и н.з. контакт К2);

C_1, L и $V_1 \dots V_4$ – конденсатор, индуктивность и IGBT-транзисторы, входящие в состав преобразователей напряжения «dc/dc 1» и «dc/dc 2»

Таблица 1 – Состояние режимов работы транзисторов в схемах преобразователей напряжения «dc/dc 1» и «dc/dc 2» на рис. 1

Схема на рис. 1	Режим ТС	Диапазон напряжения КЭС	Режим работы транзисторов			
			V ₁	V ₂	V ₃	V ₄
б (dc/dc 1)	П	$U_{кэс} \leq U_{ск}^*$	И	–	–	–
		$U_{кэс} > U_{ск}^*$	3	–	–	–
	Г	$U_{кэс} \leq U_{ск}^*$	3	–	–	–
		$U_{кэс} > U_{ск}^*$	3	–	–	–
в (dc/dc 1)	П	$U_{кэс} \geq U_{ск}^*$	И	И	О	3
		$U_{кэс} < U_{ск}^*$	О	3	3	И
	Г	$U_{кэс} \geq U_{ск}^*$	3	3	3	3
		$U_{кэс} < U_{ск}^*$	3	3	3	3
г (dc/dc 2)	П, Г	$U_{кэс} \leq U_{сн}$	3	3	–	–
		$U_{кэс} > U_{сн}$	И	И	–	–

В табл. 1 приняты следующие условные обозначения: П и Г – соответственно режимы потребления и генерации для троллейбуса; О и 3 – соответственно открытое и закрытое состояние транзисторов; И – импульсный режим работы транзисторов.

Рисунок 2 – Схема суперконденсатора на модулях BMOD0006E160B02 емкостью $C = 5,8$ Ф (а) и его эквивалентная схема замещения (б), в которой:

$$r_{ск} = 88 \text{ мОм}, r_{ут} = 2,56 \text{ кОм}, C_{ск} = 14,5 \text{ Ф}$$

– полагается (с учетом наличия в принятой схеме электропитания на рис. 1,а стабилизатора постоянного напряжения «dc/dc 1») всегда достаточным уровень напряжения на входе АИН-ШИМ для реализации вышеупомянутого двухзонного регулирования скорости тягового двигателя [11];

– электромеханические и энергетические процессы троллейбуса исследовались в широком диапазоне изменения длительностей их времени разгона и торможения до скоростей, не превышающих 50 км/ч (значения последних соответствуют режиму городского движения в Украине и Европе, а также – действующему европейскому стандарту городского и пригородного цикла движения транспортных средств (NEDC) [12]); при данном цикле длительности времени разгона (от нулевой до максималь-

ной скорости $v_m = 50$ км/ч) и торможения (от максимальной скорости $v_m = 50$ км/ч до остановленного состояния транспортного средства) составляют 26 с;

– исследования электромеханических и энергетических процессов выполнялись для максимальной полной массы m троллейбуса, равной 18,2 т [7];

– расчеты сил сопротивления движению и механических процессов троллейбуса выполнены в абсолютной системе единиц СИ, а электромеханических и энергетических процессов для тягового ЧРАД – в общепринятой для машин переменного тока относительной системе единиц (о.е.) [11] (в которой, как известно, номинальные значения угловой частоты статора $\omega_{1н}$ и угловой частоты (скорости) ротора ω_n одинаковы между собой и равны 1 о.е.);

– значения коэффициента полезного действия (КПД) для преобразователя напряжения «dc/dc 1» и трехфазного АИН-ШИМ полагались неизменными и равными соответственно: $\eta_{dc1} = 98\%$ и $\eta_u = 96\%$, а текущие значения КПД η_m движущего механизма (трансмиссии) троллейбуса определялись (в функции развиваемой им механической мощности $P_m = F_m v$, отнесенной к номинальной мощности $P_{ов.н}$ тягового ЧРАД) из расчетных соотношений в [7], где F_m и v – текущие значения соответственно силы тяги, Н и скорости движения, м/с троллейбуса;

– принималось отсутствие движения окружающего воздуха (ветра) и проскальзывания колес троллейбуса относительно дорожного полотна;

– с учетом выполнения (согласно схеме на рис. 2,а) суперконденсатора СК на модулях BMOD0006E160B02 фирмы «Maxwell Technologies» (с техническими характеристиками: $C = 5,8$ Ф; $U_n = 160$ В; $U_{max} = 170$ В; $I_{max} = 170$ А; $R_{ск} = 220$ мОм; $R_{ут} = 6,4$ кОм; $m = 5,2$ кг [13]), которые были соединены между собой по четыре последовательно и по десять штук параллельно (при общем количестве 40 модулей), при дальнейших расчетах суперконденсатор задавался эквивалентной схемой замещения, показанной на рис. 2,б [14], со следующими эквивалентными параметрами: сопротивлениями $r_{ск} = 4R_{ск}/10 = 88$ мОм и $r_{ут} = 4 \cdot 6,4/10 = 2,56$ кОм, емкостью $C_{ск} = 10 C/4 = 14,5$ Ф; при этом условимся, что при функционировании преобразователя «dc/dc 1» в схеме электропитания на рис. 1 поддерживается (стабилизируется) при потреблении энергии от КЭС напряжение на суперконденсаторе равным заданному значению $U_{ск}^* = 520\text{В} = const$.

На *первом этапе* приведем исходные расчетные аналитические зависимости из [7] для механических (в абсолютных единицах):

$$\left. \begin{aligned} F_m - F_c &= m(1+\gamma)v'; \quad \varepsilon = \frac{\omega}{v} = \frac{\omega_n}{v_n} = \frac{\omega_m}{v_m} = const; \\ s &= \int_0^t v dt; \quad s_p = \int_0^{t_p} v dt; \quad s_m = \int_0^{t_m} v dt \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

и энергетических (в относительных единицах) процессов троллейбуса:

$$P_{\Sigma} = [M\omega + (\Delta P_{\partial\partial} + \Delta P_{mod})] / \eta_u + P_{ch}, \quad (2)$$

а также – для электромеханических и энергетических процессов его тягового ЧРАД (все его величины приводятся в относительных единицах):

$$\left. \begin{aligned} M_c &= (M_{co} + q\omega^2) / \eta_m; \quad M = M_c + J\omega'; \\ J &= (1+\gamma)m[\text{кг}] / \varepsilon^2 [\text{рад/м}] J_{\partial} [\text{кг} \cdot \text{м}^2]; \\ \Delta P_{\partial\partial} &= \begin{cases} \Delta P_{\partial\partial.1} & \text{при } 0 \leq \omega \leq \omega_n \text{ (зона 1);} \\ \Delta P_{\partial\partial.2} & \text{при } \omega > \omega_n \text{ (зона 2);} \end{cases} \\ \Delta P_{\partial\partial.1} &= a_1 + b(M_c + J\omega')^2 + \\ &\quad + c(\Psi_m / \Psi_{mn})^2 \omega_1^\lambda + d\omega^2; \\ \Delta P_{\partial\partial.2} &= a_2 \left(\frac{\Psi_m}{\omega_1} - \frac{T_r \Psi_{rn}}{\omega_1^2} \omega_1' \right)^2 + \\ &\quad + b\omega_1^2 (M_c + J\omega')^2 + c(\Psi_m / \Psi_{mn})^2 \omega_1^\lambda + d\omega^2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В формулах (1)–(3) используются следующие обозначения: F_m и F_c – силы соответственно тяги и сопротивления движению троллейбуса (определенные из [7]); v – текущая скорость движения, м/с троллейбуса; $v_n = 22,5$ км/ч – скорость троллейбуса, соответствующая номинальной скорости ω_n тягового ЧРАД; v_m и ω_m – максимальная скорость троллейбуса и соответствующая ей скорость ротора тягового ЧРАД; γ – коэффициент, учитывающий в транспортном средстве соотношение между собой значений кинетических энергий вращательно и поступательно движущихся масс (для троллейбуса принято значение: $\gamma = 0,15$ [7]); v' – производная скорости троллейбуса м/с² по текущему времени t ; $\varepsilon = 25,13$ рад/м – соотношение между соответствующими друг другу скоростью ω ротора ЧРАД, рад/с и скоростью v движения троллейбуса, м/с [7]; s , s_p и s_m – соответственно текущее, пройденное троллейбусом при разгоне или торможении расстояние; t_p и t_m – времена соответственно разгона и торможения троллейбуса; P_{Σ} – текущая потребляемая (при $P_{\Sigma} > 0$) или генерируемая (при $P_{\Sigma} < 0$) мощность троллейбуса; M – развиваемый электромагнитный момент тяговым ЧРАД троллейбуса;

M_c – приведенный к валу ЧРАД статический момент сопротивления троллейбуса; J – приведенный к валу двигателя момент инерции тягового привода троллейбуса; J_{∂} – базисное значение момента инерции тягового ЧРАД в системе относительных единиц; $\Delta P_{\partial\partial}$ – общие основные потери мощности тягового ЧРАД; $\Delta P_{\partial\partial.1}$ и $\Delta P_{\partial\partial.2}$ – текущие значения общих основных потерь мощности тягового двигателя в первой и второй зонах регулирования скорости соответственно; $\lambda = 1,3$ – коэффициент, учитывающий изменение основных потерь мощности в стали тягового ЧРАД от частоты статора ω_1 [7, 11]; Ψ_m и Ψ_{mn} – текущее и номинальное значения модуля обобщенного вектора магнитного потока в воздушном зазоре тягового ЧРАД; M_{co} , q и a_1 , a_2 , b , c , d – постоянные коэффициенты, рассчитываемые из соотношений в [7], исходя из соответственно сопротивления движению троллейбуса или параметров применяемого в нем тягового ЧРАД.

На *втором этапе* проанализируем четыре следующих возможных режима работы системы электропитания (рис. 1):

а) в момент начала разгона троллейбуса напряжение u_{ck} на суперконденсаторе равно значению u_{cko} (превышающему его заданное значение $u_{cko} > U_{ck}^*$); в данном режиме (соответствующем первой части разгона троллейбуса) происходит потребление энергии тяговым ЧРАД (через инвертор) от суперконденсатора, вследствие чего уменьшается заряд и снижается напряжение u_{ck} на суперконденсаторе (но всегда в этом режиме оно неизменно превышает заданное его значение: $u_{ck} > U_{ck}^*$);

б) в процессе разгона и потребления энергии через АИН-ШИМ тяговым ЧРАД текущее напряжение на суперконденсаторе снижается до уровня его заданного значения $u_{ck} = U_{ck}^*$, после чего до этого закрытые транзисторы преобразователя «dc/dc 1» переходят в импульсный режим работы и стабилизируют напряжение u_{ck} суперконденсатора на заданном уровне U_{ck}^* (это соответствует второй части режима разгона или выходу ЧРАД на установившуюся скорость и характеризуется: потреблением троллейбусом энергии от КЭС, равенством нулю тока i_{ck} через суперконденсатор и поддержанием неизменным его напряжения $u_{ck} = U_{ck}^*$);

в) при начале режима торможения из-за возникновения генерации энергии (от ЧРАД через инвертор в суперконденсатор) и одновременного с этим закрытия транзисторов преобразователя «dc/dc 1» происходит заряд СК до напряжения, превышающего его заданное значение $u_{ck} > U_{ck}^*$;

г) во второй части торможения (по мере снижения скорости ЧРАД) режим генерации изменяется на режим потребления энергии тяговым ЧРАД (через инвертор) от суперконденсатора СК (заряженного до напряжения $u_{ск} > U_{ск}^*$); при этом транзисторы преобразователя «dc/dc 1» продолжают оставаться закрытыми; после остановки ЧРАД суперконденсатор остается заряженным до повышенного напряжения $u_{ск}(t_{m1}) > U_{ск}^*$ и за время остановки незначительно уменьшает (обычно из-за непродолжительности и относительного малого потребления во времени энергии) свое напряжение от величины $u_{ск}(t_{m1})$ до значения $u_{ско}$ (где $u_{ско} > U_{ск}^*$).

Для режимов работы «а», «в», «г» рассмотренной системы электропитания справедливы расчетные зависимости для нахождения текущего напряжения $u_{ск}(t)$ на СК и рассеиваемых в нем потерь энергии $\Delta W_{ск}(t)$ при его разряде и заряде:

$$\left. \begin{aligned} u_{ск}(t) &= u_{ск}(0) - \frac{1}{C_{ск}} \int_0^t i_{ск}(t) dt; \\ \Delta W_{ск} &= r_{ск} \int_0^t i_{ск}^2(t) dt, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $u_{ск}(0)$ – начальное значение напряжения на суперконденсаторе при рассматриваемом режиме. Для режима «б» выполняются другие соотношения: $u_{ск} = U_{ск}^*$; $i_{ск} = 0$; $\Delta W_{ск} \approx 0$.

Причем, исходя из уравнения баланса для текущей мощности P_{Σ} на входе АИН-ШИМ (в схеме электропитания на рис. 1,а):

$$P_{\Sigma}(t) = u_{ск}(t) i_{ск}(t), \quad (5)$$

текущее значение тока $i_{ск}(t)$, протекающего в этой схеме через суперконденсатор СК, определяется для режимов «а», «в», «г» из зависимости:

$$i_{ск}(t) = P_{\Sigma}(t) / u_{ск}(t), \quad (6)$$

а для режима «б» (когда $i_{ск} = 0$ и $u_{ск} = U_{ск}^* = const$) выходной ток преобразователя «dc/dc 1» находится из соотношения:

$$i_{dc1}(t) = P_{\Sigma}(t) / U_{ск}^* \geq 0. \quad (7)$$

Принимая во внимание, что положительное значение потребляемой мощности ($P_{\Sigma} > 0$) соответствует режиму потребления троллейбусом энергии, а отрицательное значение ($P_{\Sigma} < 0$) потребляемой мощности – режиму генерации энергии, и исходя из всегда положительного значения напряжения $u_{ск}(t)$ на суперконденсаторе в схеме на рис. 1, следует, что знак протекающего тока $i_{ск}(t)$ через СК всегда совпадает со знаком потребляемой мощности P_{Σ} . При закрытых же транзисторах преобразо-

вателя «dc/dc 1» в схеме на рис. 1, когда отсутствует электропотребление из КЭС или генерация в нее энергии: положительное значение тока суперконденсатора $i_{ск}(t) \geq 0$ – соответствуют согласно (4) его разряду, а отрицательное значение $i_{ск}(t) < 0$ – его заряду.

На *третьем этапе* для режимов торможения, исходя из зависимостей (2)–(7) для исследуемых (показанных на рис. 3 и описываемых в табл. 2 математическими соотношениями из [7]) тахограмм (ТГ) $v(t)$ троллейбуса рассчитаем из зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} W_{m1(n)} &= 0,5 \int_0^{t_{m1}} P_{\Sigma} [1 + \text{sign}(P_{\Sigma})] dt; \\ W_{m2(n)} &= 0,5 \int_0^{t_{m2}} P_{\Sigma} [1 + \text{sign}(P_{\Sigma})] dt; \\ W_{m1(z)} &= 0,5 \int_0^{t_{m1}} P_{\Sigma} [1 - \text{sign}(P_{\Sigma})] dt; \\ W_{m2(z)} &= 0,5 \int_0^{t_{m2}} P_{\Sigma} [1 - \text{sign}(P_{\Sigma})] dt; \\ \Delta W_{ск.m1(n)} &= 0,5 \int_0^{t_{m1}} r_{ск} i_{ск}^2 [1 + \text{sign}(P_{\Sigma})] dt; \\ \Delta W_{ск.m2(n)} &= 0,5 \int_0^{t_{m2}} r_{ск} i_{ск}^2 [1 + \text{sign}(P_{\Sigma})] dt; \\ \Delta W_{ск.m1(z)} &= 0,5 \int_0^{t_{m1}} r_{ск} i_{ск}^2 [1 - \text{sign}(P_{\Sigma})] dt; \\ \Delta W_{ск.m2(z)} &= 0,5 \int_0^{t_{m2}} r_{ск} i_{ск}^2 [1 - \text{sign}(P_{\Sigma})] dt \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

электропотребление $W_{m1(n)}$, $W_{m2(n)}$ и электрогенерацию $W_{m1(z)}$, $W_{m2(z)}$ при режимах торможения троллейбуса соответственно для первой и второй зон регулирования скорости тягового ЧРАД, а также потери энергии в суперконденсаторе при торможении: в первой $\Delta W_{ск.m1(n)}$, $\Delta W_{ск.m1(z)}$ и второй $\Delta W_{ск.m2(n)}$, $\Delta W_{ск.m2(z)}$ зонах регулирования скорости, – соответствующие при $P_{\Sigma} \geq 0$ электропотреблению (обозначены индексом «n») или при $P_{\Sigma} < 0$ генерации (обозначены индексом «z»), где t_{m1} и t_{m2} – длительности времени торможения в первой и второй зонах регулирования; t – текущее время, отсчитываемое от начала и на протяжении рассматриваемых первой и второй зон регулирования скорости: $0 \leq t \leq t_{m1}$ и $0 \leq t \leq t_{m2}$; «sign» – математическая операция определения знака алгебраического числа (т.е. $\text{sign}(P_{\Sigma}) = 1$ при $P_{\Sigma} \geq 0$ и $\text{sign}(P_{\Sigma}) = -1$ при $P_{\Sigma} < 0$).

Рисунок 3 – Види досліджуваних тахограмм троллейбуса при пуско-тормозних режимах: а – для параболічної Π'' і квазіоптимальних K'' , K_y'' вогнутої форми; б – для лінійної L , параболічної Π' і квазіоптимальних K' , K_y' вогнутої форми; в – для комбінованих (із участків квазіоптимальних вогнутих K'' , K_y'' або лінійної L і квазіоптимальної K' вогнутої форми) тахограмм

Таблиця 2 – Расчетные зависимости для исследуемых тахограмм (ТГ) троллейбуса при разгоне (Р) и торможения (Т)

№ п/п	Вид ТГ (условн. обозн.)	Режим	Расчетная аналитическая зависимость для:		Зона регулирования	Значения коэффициентов A , B и K		
			скорости $v(t)$ троллейбуса	ее производной $v'(t)$		A	B	K
5	Линейная (L)	Р	$A + B \left(\frac{t}{t_p} \right)$	$\frac{B}{t_p}$	1	0	v_n	—
					2	v_n	$v_m - v_n$	—
		Т	$A + B \left(\frac{t_m - t}{t_m} \right)$	$-\frac{B}{t_m}$	1	0	v_n	—
					2	v_n	$v_m - v_n$	—
3	Параболическая вогнутая (Π')	Р	$A + B \left(\frac{t}{t_p} \right)^2$	$\frac{2B}{t_p^2} t$	1	0	v_n	—
					2	v_n	$v_m - v_n$	—
		Т	$A + B \left(\frac{t_m - t}{t_m} \right)^2$	$-\frac{2B}{t_m^2} t$	1	0	v_n	—
					2	v_n	$v_m - v_n$	—
4	Параболическая выпуклая (Π'')	Р	$A + B \left(1 - \frac{t_p - t}{t_p} \right)^2$	$\frac{2B(t_p - t)}{t_p^2}$	1	0	v_n	—
					2	v_n	$v_m - v_n$	—
		Т	$A + B \left(1 - \frac{t}{t_m} \right)^2$	$-\frac{2B(t_m - t)}{t_m^2}$	1	0	v_n	—
					2	v_n	$v_m - v_n$	—
1	Квазиоптимальная вогнутая (K' , K_y')	Р	$A + B \frac{sh(\xi^* \sqrt{K} t)}{sh(\xi^* \sqrt{K} t_p)}$	$\frac{\xi^* \sqrt{K} B ch(\xi^* \sqrt{K} t)}{sh(\xi^* \sqrt{K} t_p)}$	1	0	v_n	K_1
					2	v_n	$v_m - v_n$	K_2
		Т	$A + B \frac{sh[\xi^* \sqrt{K} (t_m - t)]}{sh(\xi^* \sqrt{K} t_m)}$	$\frac{\xi^* \sqrt{K} B sh[\xi^* \sqrt{K} (t_m - t)]}{sh(\xi^* \sqrt{K} t_m)}$	1	0	v_n	K_1
					2	v_n	$v_m - v_n$	K_2
2	Квазиоптимальная выпуклая (K'' , K_y'')	Р	$A + B \left\{ 1 - \frac{sh[\xi^* \sqrt{K} (t_p - t)]}{sh(\xi^* \sqrt{K} t_p)} \right\}$	$\frac{\xi^* \sqrt{K} B ch[\xi^* \sqrt{K} (t_p - t)]}{sh(\xi^* \sqrt{K} t_p)}$	1	0	v_n	K_1
					2	v_n	$v_m - v_n$	K_2
		Т	$A + B \left\{ 1 - \frac{sh(\xi^* \sqrt{K} t)}{sh(\xi^* \sqrt{K} t_m)} \right\}$	$-\frac{\xi^* \sqrt{K} B ch(\xi^* \sqrt{K} t)}{sh(\xi^* \sqrt{K} t_m)}$	1	0	v_n	K_1
					2	v_n	$v_m - v_n$	K_2

С учетом (8) применительно к режиму торможения троллейбуса вычислим из зависимостей [7, 15]:

$$\left. \begin{aligned} W_{m(n)} &= W_{m1(n)} + W_{m2(n)}; \\ W_{m(z)} &= W_{m1(z)} + W_{m2(z)}; \\ W_{ск.м} &= W_{m(n)} + W_{m(z)} + \Delta W_{ск.м(n)} + \Delta W_{ск.м(z)}; \\ \Delta W_{ск.м(z)} &= \Delta W_{ск.м1(z)} + \Delta W_{ск.м2(z)}; \\ \eta_{ск.м} &= \left(|W_{m(z)}| - W_{m(n)} - \Delta W_{ск.м(n)} - \right. \\ &\quad \left. - \Delta W_{ск.м(z)} \right) / \left(|W_{m(z)}| - W_{m(n)} \right); \\ W_{m1} &= W_{m1(n)} + W_{m1(z)} + \Delta W_{ск.м1(n)} + \\ &\quad + \Delta W_{ск.м1(z)}; \\ W_{m2} &= W_{m2(n)} + W_{m2(z)} + \Delta W_{ск.м2(n)} + \\ &\quad + \Delta W_{ск.м2(z)}; \\ p_{m1} &= \frac{W_{m1}}{\alpha_{m1}}; \quad p_{m2} = \frac{W_{m2}}{\alpha_{m2}}; \quad p_m = \frac{W_m}{\alpha_m}; \\ \alpha_{m1} &= \int_0^{t_{m1}} \omega dt; \quad \alpha_{m2} = \int_0^{t_{m2}} \omega dt; \quad \alpha_m = \alpha_{m1} + \alpha_{m2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

значения потребляемой $W_{m(n)}$ и генерируемой $W_{m(z)}$ энергии, общей потребляемой энергии W_m в указанном режиме, накопленной энергии $W_{ск.м}$ суперконденсатором при торможении, потребления энергии W_{m1} и W_{m2} соответственно при первом и втором диапазоне регулирования скорости ЧРАД, значение $\eta_{ск.м}$ КПД суперконденсатора при режиме торможения троллейбуса, а также удельные значения p_{m1} , p_{m2} электропотребления соответственно в первой и второй зонах регулирования скорости и удельное общее электропотребление p_m при торможении троллейбуса, где α_{m1} и α_{m2} – пройденные положения валом тягового ЧРАД при торможении соответственно в первой и второй зонах регулирования; α_m – общее пройденное положение валом тягового двигателя при торможении; $t_m = t_{m1} + t_{m2}$ – общее время торможения.

Исходя из уравнения баланса для запасенной энергии в СК при режиме торможения:

$$0,5C_{ск} \left(U_{ск}^* \right)^2 + |W_{ск.м}| = 0,5C_{ск} u_{ск}^2(t_{m1}) \quad (10)$$

определяется максимальное значение напряжения $u_{ск}(t_{m1}) = u_{ск.м}$ на этом конденсаторе по окончании режима торможения:

$$u_{ск}(t_{m1}) = \sqrt{2 |W_{ск.м}| / C_{ск} + \left(U_{ск}^* \right)^2}, \quad (11)$$

где $U_{ск}^*$ – значение напряжения на суперконденсаторе в начале торможения.

На четвертом этапе для режимов разгона, исходя из расчетных зависимостей (2)–(7) для исследуемых (показанных на рис. 3 и описываемых в табл. 2 соотношениями из [7]) тахограмм $v(t)$

троллейбуса, рассчитаем из соотношений [7, 15]:

$$\left. \begin{aligned} W_{p1} &= \int_0^{t_{p1}} P_{\Sigma} dt; \quad W_{p2} = \int_0^{t_{p2}} P_{\Sigma} dt; \\ \Delta W_{ск.р} &= \int_0^{t_p^*} r_{ск} i_{ск}^2(t) dt; \quad p_{кэс} = W_{кэс} / \alpha_p; \\ W_p &= W_{p1} + W_{p2} + \Delta W_{ск.р}; \\ W_{кэс} &= \left\{ W_p - 0,5C_{ск} \left[u_{ско}^2 - \left(U_{ск}^* \right)^2 \right] \right\} / \eta_{дс1} \geq 0; \\ p_{p1} &= \left[W_{p1} + \int_0^{t_{p1}} r_{ск} i_{ск}^2(t) dt \right] / \alpha_{p1}; \\ p_{p2} &= \left[W_{p2} + \int_0^{(t_p^* - t_{p1})} r_{ск} i_{ск}^2(t) dt \right] / \alpha_{p2}; \\ \eta_{ск.р} &= \frac{0,5C_{ск} \left[u_{ско}^2 - \left(U_{ск}^* \right)^2 \right] - \Delta W_{ск.р}}{0,5C_{ск} \left[u_{ско}^2 - \left(U_{ск}^* \right)^2 \right]}; \\ \alpha_{p1} &= \int_0^{t_{p1}} \omega dt; \quad \alpha_{p2} = \int_0^{t_{p2}} \omega dt; \quad \alpha_p = \alpha_{p1} + \alpha_{p2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

значения потребляемых энергий W_{p1} , W_{p2} и удельных потребляемых энергий p_{p1} , p_{p2} в первой и второй зонах регулирования скорости, потерь энергии $\Delta W_{ск.р}$ в суперконденсаторе и КПД $\eta_{ск.р}$ суперконденсатора при разгоне, общее потребление троллейбусом энергии $W_{кэс}$ и удельной потребляемой энергии $p_{кэс}$ из КЭС, пройденные положения α_{p1} и α_{p2} валом тягового ЧРАД соответственно в первой и второй зонах регулирования скорости, общее пройденное положение α_p валом тягового двигателя при разгоне, где t_{p1} и t_{p2} – длительности времени разгона соответственно в первой и второй зонах регулирования; t_p^* – длительность времени (отсчитываемого от начала разгона) для режима «а» в схеме электропитания на рис. 1 (соответствующего разряду СК до стабилизируемого значения напряжения: $u_{ск} = U_{ск}^*$); $u_{ско}$ – начальное значение напряжения (присущее началу разгона) на суперконденсаторе (принятое при расчетах равным напряжению на нем по окончании режима «б» торможения $u_{ско} \approx u_{ск}(t_{m1})$). Это, очевидно, обусловлено обычно малым значением электропотребления остановленного троллейбуса при кратковременной длительности его остановки (например, для высадки и посадки пассажиров или при запрещающем сигнале светофора); t – текущее время, отсчитываемое от начала и на протяжении рассматриваемых режимов

работы: $0 \leq t \leq t_{p1}$, $0 \leq t \leq t_{p2}$ или $0 \leq t \leq t_p^*$;
 $t_p = t_{p1} + t_{p2}$ – общее время разгона.

Результаты вычисления потребляемых энергий W_{p1} , W_{p2} , $W_{кэс}$ и W_{m1} , W_{m2} и их удельных значений p_{p1} , p_{p2} , $p_{кэс}$ и p_{m1} , p_{m2} при разгоне и торможении троллейбуса и варьировании длительностей времени разгона t_{p1} , t_{p2} и торможения t_{m1} , t_{m2} изображены в виде графических зависимостей, показанных на рис. 4 и рис. 5. В табл. 3 представлены по результатам выполненных расчетов оптимальные (минимальные) потребления энергии W_{p1}^o , W_{p2}^o , $W_{кэс}^o$ и W_{m1}^o , W_{m2}^o и их удельные значения p_{p1} , p_{p2} , $p_{кэс}$ и p_{m1} , p_{m2} , соответствующие на рис. 4 и рис. 5 оптимальным значениям времени разгона t_{p1}^o , t_{p2}^o и торможения t_{m1}^o , t_{m2}^o в первой и второй зонах регулирования скорости тягового ЧРАД (все величины для троллейбуса и ЧРАД, относящиеся к первой зоне регулирования, в статье обозначаются индексом «1», а ко второй – индексом «2»).

При выполненных исследованиях электропотребления и удельного энергопотребления троллейбуса в пуско-тормозных режимах (результаты

которых показаны графиками на рис. 4 и рис. 5) задавались разного вида траектории изменения скорости ЧРАД: линейная (L), параболическая вогнутой (Π') и выпуклой (Π'') формы, квазиоптимальная вогнутой (K') и выпуклой (K'') формы, квазиоптимальная вогнутой (K'_y) и выпуклой (K''_y) формы применительно к удельному электропотреблению. При этом (аналогично рассмотренному в [7]) значения поправочного коэффициента ξ^* (равные ξ_1^* в первой и ξ_2^* – во второй зоне регулирования скорости) соответствуют (при конкретных неизменных длительностях времени разгона t_p или торможения t_m) минимально возможным значениям электропотребления: W_{p1} , W_{p2} или W_{m1} , W_{m2} в режимах разгона или торможения с траекториями K и K'' , а при траекториях K'_y , K''_y – минимально возможным удельным значениям электропотребления: p_{p1} , p_{p2} и p_{m1} , p_{m2} . Рассчитанные для квазиоптимальных траекторий K' , K'' и K'_y , K''_y скорости значения соответствующих поправочных коэффициентов ξ_1^* и ξ_2^* представлены на рис. 6.

Рисунок 4 – Зависимости значений электропотребления W_{p1} , W_{p2} , W_{m1} , W_{m2} (показаны сплошной линией) и удельного электропотребления p_{p1} , p_{p2} , p_{m1} , p_{m2} (показаны пунктиром) троллейбуса при разгоне (а, б) и торможении (в, г) в первой (а, в) и второй (б, г) зонах регулирования при варьировании времени разгона t_{p1} , t_{p2} и торможения t_{m1} , t_{m2} для разных видов (K' , K'' , K'_y , K''_y , Π' , Π'' , L) тахограмм

Таблица 3 – Оптимальные значения времени $t_{p1}^o, t_{p2}^o, t_{m1}^o, t_{m2}^o$ разгона и торможения троллейбуса и соответствующих им потребляемых энергий $W_{p1}^o, W_{p2}^o, W_{m1}^o, W_{m2}^o$ и общего электропотребления $W_{кэс}$, а также удельных потреблений энергии $P_{p1}, P_{p2}, P_{m1}, P_{m2}, P_{кэс}$ для разных видов ($K', K'', \Pi', \Pi'', Л$) тахограмм

Вид ТГ	Разгон								Торможение					
	t_{p1}^o	W_{p1}^o	P_{p1}	t_{p2}^o	W_{p2}^o	P_{p2}	$W_{кэс}$	$P_{кэс}$	t_{m1}^o	W_{m1}^o	P_{m1}	t_{m2}^o	W_{m2}^o	P_{m2}
Ед. изм.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.
K'	3,3	1185	2,586	5,0	4873	1,954	1743	0,689	3,3	-767,2	-1,592	4,0	-2972	-1,377
K''	3,2	1188	2,403	5,0	4871	1,926	1743	0,679	3,2	-764,0	-1,487	4,0	-2773	-1,362
Π'	4,0	1198	2,923	7,0	5022	1,640	1876	0,606	4,0	-754,3	-1,740	5,5	-2878	-1,101
Π''	3,4	1247	1,778	4,9	5056	1,852	1975	0,707	3,3	-704,5	-1,020	4,2	-2849	-1,190
$Л$	3,2	1188	2,403	5,0	4873	1,954	1743	0,689	3,2	-764,0	-1,487	4,0	-2972	-1,77

Рисунок 5 – Зависимости для общего $W_{кэс}$ (показаны сплошной линией) и удельного потребления $p_{кэс}$ энергии (показаны пунктиром) троллейбусом из контактной электрической сети при разных видах ($K', K'', K_y, K_y', \Pi', \Pi'', Л$) тахограмм

На *пятом этапе*, исходя из допустимых для троллейбуса максимальных значений: ускорения $v'_{p,max} = 1,5 \text{ м/с}^2$ и замедления $v'_{m,max} = 1,3 \text{ м/с}^2$ (приведенных в [16]), проанализируем минимально возможные значения длительностей времени разгона t_{p1}^*, t_{p2}^* и торможения t_{m1}^*, t_{m2}^* в первой (при $0 \leq v \leq v_n = 22,5 \text{ км/ч} = 6,25 \text{ м/с}$) и второй (при $v_n \leq v \leq v_m = 50 \text{ км/ч} = 13,9 \text{ м/с}$) зонах регулирования скорости троллейбуса. Для этого, подставив в зависимости (кроме линейной) для текущей производной скорости $v'(t)$ из табл. 2 значения $t = t_p$ и $t = t_m$ – для вогнутой или $t = 0$ – для выпуклой формы траекторий скорости, найдем максимальные значения ускорений v'_{pm} и замедлений v'_{mm} для этих скоростей, ограниченные следующими условиями для линейной:

$$v'_{pm} = B/t_p \leq v'_{p,max} \quad \text{и} \quad v'_{mm} = B/t_m \leq v'_{m,max}, \quad (13)$$

параболической (вогнутой и выпуклой формы):

$$v'_{pm} = 2B/t_p \leq v'_{p,max} \quad \text{и} \quad v'_{mm} = 2B/t_m \leq v'_{m,max} \quad (14)$$

или квазиоптимальной (вогнутой и выпуклой

формы) тахограммы:

$$\frac{\xi^* \sqrt{KB}}{th(\xi^* \sqrt{K} t_p)} \leq v'_{p,max} \quad \text{и} \quad \frac{\xi^* \sqrt{KB}}{th(\xi^* \sqrt{K} t_m)} \leq v'_{m,max}. \quad (15)$$

Рисунок 6 – Зависимости коэффициентов $\xi^*(t_p)$, $\xi^*(t_m)$ для квазиоптимальных (а – по потреблению, б – по удельному потреблению энергии) тахограмм вогнутой и выпуклой (показаны одним и двумя штрихами соответственно) формы при первой и второй зонах регулирования (показаны индексами 1 и 2 соответственно), изображенные: сплошной линией – для разгона, пунктиром – для торможения

Исходя из неравенств (13)–(15), определим рабочие диапазоны изменения длительности времени разгона t_{p1}^*, t_{p2}^* и торможения t_{m1}^*, t_{m2}^* (при которых значения ускорений и замедлений троллейбуса

не превышают их максимальных значений) для линейной:

$$t_{p1,2} \geq t_{p1,2}^* = \frac{B}{v'_{p,\max}} \text{ и } t_{m1,2} \geq t_{m1,2}^* = \frac{B}{v'_{m,\max}}, \quad (16)$$

параболической (вогнутой и выпуклой формы):

$$t_{p1,2} \geq t_{p1,2}^* = \frac{2B}{v'_{p,\max}}, \quad t_{m1,2} \geq t_{m1,2}^* = \frac{2B}{v'_{m,\max}}, \quad (17)$$

и квазиоптимальной (вогнутой и выпуклой формы) траектории:

$$\left. \begin{aligned} t_{p1,2} \geq t_{p1,2}^* &= \frac{1}{\xi^* \sqrt{K}} \operatorname{arth} \left(\frac{\xi^* \sqrt{KB}}{v'_{p,\max}} \right); \\ t_{m1,2} \geq t_{m1,2}^* &= \frac{1}{\xi^* \sqrt{K}} \operatorname{arth} \left(\frac{\xi^* \sqrt{KB}}{v'_{m,\max}} \right), \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где коэффициент B принимает (согласно табл. 2) значение равное v_n – при первой зоне регулирования или $(v_m - v_n)$ – при второй зоне регулирования скорости. Рассчитанные из (16)–(18) для исследуемых траекторий пуско-тормозных режимов троллейбуса минимально возможные (исходя из допустимых значений его ускорения и замедления) длительности времени разгона t_{p1}^* , t_{p2}^* и торможения t_{m1}^* , t_{m2}^* представлены в табл. 4.

Рассчитав из зависимостей в табл. 2 для текущих значений скорости $v(t)$ их вторые производные $v''(t)$ по времени, определим их максимальные значения применительно к исследуемым траекториям скорости троллейбуса, которые равны: нулю – при разгоне и торможении для линейного вида, $2B/t_p^2$ или $2B/t_m^2$ – при разгоне или торможении для параболического вида, $B(\xi^* \sqrt{K})^2$ – при разгоне и тор-

можении для квазиоптимального вида траектории скорости. Выявлено, что вычисленные максимальные значения вторых производных скорости для параболической (вогнутой и выпуклой формы) и квазиоптимальной (вогнутой и выпуклой формы) при разгоне и торможении (со значениями времени, равными и превышающими значения t_{p1}^* , t_{p2}^* и t_{m1}^* , t_{m2}^* из табл. 4) составляют менее $0,2 \text{ м/с}^3$. Согласно же [16] максимальные значения второй производной скорости для троллейбуса не должны превышать 2 м/с^3 .

На шестом этапе применительно к стандартному европейскому циклу городского и пригородного движения NEDC [12] (характеризуемому максимальными скоростями $v_m = 50 \text{ км/ч}$ движения при значениях времени разгона t_p и торможения t_m , равных 26 с) выполнены, исходя из зависимостей (1)–(4), (6), (8), (9) и (12), расчеты: механических (скорости ω ротора тягового ЧРАД и скорости v троллейбуса, угла α положения ротора тягового двигателя и пройденного расстояния $s = \alpha / z_p \varepsilon$ троллейбусом, где $z_p = 2$ – число пар полюсов тягового ЧРАД), электромеханических (электромагнитного момента M тягового двигателя, его модуля Ψ_r обобщенного вектора потокоцепления ротора и модуля i_l обобщенного вектора статорного тока) и энергетических (потребляемой мощности P_Σ и энергии $W_{кэс}$ троллейбусом, напряжения $u_{ск}$, тока $i_{ск}$ и изменения энергии $\Delta W_{ск}$ для суперконденсатора) переходных процессов разгона и торможения троллейбуса с суперконденсаторным накопителем генерируемой энергии, графические зависимости которых приведены на рис. 7.

Таблица 4 – Результаты расчета минимально возможных (исходя из максимально допустимых ускорений и замедлений) времен t_{p1}^* , t_{p2}^* и t_{m1}^* , t_{m2}^* разгона и торможения троллейбуса и соответствующие им потребляемые энергии W_{p1}^* , W_{p2}^* , W_{m1}^* , W_{m2}^* и общего электропотребления $W_{кэс}^*$, а также удельных потребляемых энергий P_{p1} , P_{p2} , $P_{кэс}$, P_{m1} , P_{m2} для разных видов тахограмм

Вид ТГ	Разгон								Торможение					
	t_{p1}^*	W_{p1}^*	P_{p1}	t_{p2}^*	W_{p2}^*	P_{p2}	$W_{кэс}^*$	$P_{кэс}$	t_{m1}^*	W_{m1}^*	P_{m1}	t_{m2}^*	W_{m2}^*	P_{m2}
Ед. изм.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.
K'_y	4,20	1196	1,836	5,12	4873	1,914	2578	0,995	4,84	-712,8	-1,945	5,90	-2901	-0,989
K''_y	4,20	1410	1,319	5,12	5059	1,772	3038	1,034	4,84	-744,7	-0,966	5,90	-2917	-0,936
K'	4,20	1190	2,154	5,12	4873	1,914	2538	0,980	4,84	-754,5	-1,201	5,90	-2920	-0,955
K''	4,20	1196	1,836	5,12	4871	1,885	2553	0,971	4,84	-744,7	-0,966	5,90	-2917	-0,936
Π'	8,28	1257	1,466	10,2	5128	1,134	3215	0,706	9,62	-665,0	-0,651	11,8	-2622	-0,486
Π''	8,28	1369	0,795	10,2	5441	0,933	4243	0,723	9,62	-533,4	-0,265	11,8	-2367	-0,352
L	4,17	1196	1,849	5,10	4874	1,884	2552	0,970	4,81	-745,3	-0,973	5,88	-2918	-0,940

Рисунок 7 – Электромеханические и энергетические процессы для разгона (а) и торможения (б) троллейбуса при цикле движения NEDC для параболических вогнутой (П') и выпуклой (П''), квазиоптимальной вогнутой (К') и линейной (Л) тахограмм

Для перехода при оценке электромеханических и энергетических процессов от относительных к абсолютным значениям величин следует полученные в относительных единицах значения умножить на базисные значения, приведенные в табл. 5.

На этом же этапе определим при цикле движения NEDC суммарное электропотребление W_{Σ} троллейбуса (со схемой электропитания на рис. 1), затрачиваемое на его движение между соседними остановками (находящимися друг от друга, например, на расстоянии равном $L_o = 450$ м).

Данное суммарное электропотребление W_{Σ} троллейбуса находится с учетом (1)–(3), (8), (9) и (12) из зависимостей в [7, 11] в виде:

$$\left. \begin{aligned} W_{\Sigma} &= W_{кэс} + W_{уст}; \quad W_{уст} = P_{\Sigma,уст} t_{уст}; \\ t_{уст} &= \frac{L_o - (s_p + s_m)}{v_{уст}}; \quad \chi_o = \frac{2}{k_r L_m} (XY)^{0,5}; \\ P_{\Sigma,уст} &= (M_c \omega_{уст} + \Delta P_{\delta\phi} + \Delta P_{mod}) / \eta_{cn} + P_{cn}; \\ \Delta P_{\delta\phi} &= \Delta P_{эм} + d \omega_{уст}^2; \quad \Delta P_{эм} = |M_c| \chi_o; \\ \omega_1 &= \frac{1}{2\tau} (1 - \sqrt{1 - 4\tau \omega_{уст}}); \quad \tau = R_r M_c / \Psi_{rn}^2; \\ X &= R_s + 0,005 \frac{P_{\delta\phi,n}}{\eta_n} + k_r^2 \left(R_r + \frac{\Delta P_{ст,н} L_{гр}^2 \omega_1^2}{\Psi_{mn}^2} \right); \\ Y &= R_s + 0,005 P_{\delta\phi,n} / \eta_n + \Delta P_{ст,н} L_{гр}^2 \omega_1^2 / \Psi_{mn}^2, \end{aligned} \right\} (19)$$

где W_p и W_m – электропотребление троллейбуса в

режимах разгона и торможения; $P_{\Sigma,уст}$ и $W_{уст}$ – потребление соответственно мощности и энергии в установившемся режиме работы троллейбуса; R_s и R_r – активные сопротивления фазных статорной и роторной обмоток тягового ЧРАД; $\omega_{уст}$ и ω_1 – установившееся значение скорости и соответствующее ему значение угловой частоты статора тягового двигателя; L_m и $L_{гр}$ – индуктивности намагничивания и рассеяния ротора тягового ЧРАД; k_r – коэффициент связи ротора двигателя; $\Delta P_{эм}$ и $\Delta P_{ст,н}$ – текущее значение магнитных потерь мощности и номинальные потери мощности в стали тягового ЧРАД; $v_{уст}$ и $t_{уст}$ – значения установившейся скорости троллейбуса и длительности времени режима с установившейся скоростью; $P_{\delta\phi,n}$ и η_n – номинальные значения мощности и КПД тягового ЧРАД; $\eta_{cn} = \eta_{dc1} \eta_u$ – КПД силового преобразователя; τ , X , Y – расчетные коэффициенты. Результаты расчетов представлены в табл. 6.

На *седьмом этапе* оценим запас хода троллейбуса (на горизонтальном участке дороги) при исчезновении напряжения в контактной сети ($u_{кэс} = 0$) и питании инвертора АИН-ШИМ (при закрытых транзисторах $V_1 \dots V_4$ в преобразователе напряжения «dc/dc 1» в схеме на рис. 1) от первоначально заряженного (до его заданного напряжения $U_{ск}^* = 520$ В) суперконденсатора СК.

Таблица 5 – Базисные значения величин тягового двигателя

Величина	i_1	M, M_c	Ψ	ω_1	ω	$P, \Delta P$	$W, \Delta W$	R_s, R_r	L	C	J	t
Размерность	А	Нм	Вб	рад/с	рад/с	кВт	Дж	Ом	мГн	мФ	кг·м ²	с
Значение	286,4	893	1,039	100π	50π	140,27	446,4	1,1402	3,65	2,793	0,0181	0,01/π

Таблица 6 – Результаты расчета удельного расхода w энергии и суммарного электропотребления W_{Σ} троллейбуса за время движения (с циклом NEDC) между остановками ($L_o = 450$ м, $v_m = 50$ км/ч) для разных видов ($K'_y, K''_y, K', K'', P', P'', L, K'' - K', L - K', K''_y - K'$) его тахограмм со значениями времени

разгона и торможения: $t_{p1} = t_{m1} = 10$ с и $t_{p2} = t_{m2} = 16$ с

Вид ТГ	$\eta_{ск,р}$	$\eta_{ск,т}$	$u_{ск,м}$	$t_{уст}$	s_p	s_m	$s_{уст}$	W_p	W_m	$W_{кэс}$	$p_{кэс}$	W_z	$W_{уст}$	W_{Σ}	w
	%	%	В	с	м	м	м	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	Вт/т·км
K'_y	99,09	94,46	628,7	9,1	192,3	131,4	126,3	7082	–3201	4124	0,510	–3313	1580	5704	86,37
K''_y	97,78	98,99	615,9	0,4	252,3	192,3	5,4	8163	–2646	5623	0,567	–2654	70	5693	86,19
K'	98,88	95,16	628,8	11,7	147,9	139,3	162,8	6812	–3232	3846	0,574	–3305	2032	5878	88,99
K''	99,12	98,99	615,9	4,7	192,3	192,3	65,4	7078	–2646	4515	0,558	–2654	816	5332	80,72
P'	99,07	97,85	626,2	9,1	161,5	161,5	127,0	6826	–3009	3941	0,557	–3054	1580	5521	83,59
P''	98,96	99,99	600,2	0,3	223,1	223,1	3,8	7537	–2559	5459	0,599	–2605	52	5511	83,44
L	99,12	98,99	615,9	4,7	192,3	192,3	65,4	7078	–2646	4515	0,558	–2654	816	5332	80,72
$K'' - K'$	99,09	95,16	628,8	8,5	192,3	139,3	118,4	7082	–3232	4121	0,509	–3305	1476	5597	84,74
$L - K'$	99,09	95,16	628,8	8,5	192,3	139,3	118,4	7082	–3232	4121	0,509	–3305	1476	5597	84,74
$K''_y - K'$	97,68	95,16	628,8	4,2	252,3	139,3	58,4	8175	–3232	5236	0,523	–3305	729	5966	90,32

При дальнейших расчетах: во-первых, условимся, что допустимый разряд СК характеризуется снижением на нем напряжения до 70 % от заданного значения $U_{ск}^*$ (то есть, в диапазоне от $U_{ск}^* = 520$ В до $U_{ск.min} = 0,7U_{ск}^* = 364$ В); во-вторых, будем полагать, что при исчезновении напряжения КЭС автоматически от САУ осуществляется ограничение максимальной скорости троллейбуса на уровне $v_m = 0,7v_n$ (что составляет 15,8 км/ч для троллейбуса [7]) и соответствует значению $\omega = 0,7\omega_n = 0,7$ о.е. скорости его тягового ЧРАД (при которой при указанном снижении напряжения на входе инвертора обеспечивается функционирование тягового двигателя в первой зоне регулирования скорости с номинальным значением $\Psi_{гн}$ потокоцепления ротора [11]).

Исходя из начального значения энергии заряженного конденсатора, рассчитываемого в виде:

$$W_{ск}^* = 0,5C_{ск} (U_{ск}^*)^2 = 0,545 \text{ кВтч},$$

вычислим отдаваемую этим конденсатором энергию (при его разряде до напряжения $U_{ск.min}$):

$$\Delta W_{ск} = 0,5C_{ск} \left[(U_{ск}^*)^2 - U_{ск.min}^2 \right] = 0,278 \text{ кВтч}. \quad (20)$$

Для простоты расчета рассмотрим случай исчезновения напряжения КЭС во время остановки троллейбуса, когда запас хода троллейбуса (за счет потребления от суперконденсатора упомянутой энергии $\Delta W_{ск}$) вычисляется аналогично [17] в виде:

$$s = s_p + s_{ycm} = s_p + v_{ycm} \left[\Delta W_{ск} \eta_{ск.p} \eta_u - W_{p1} - (P_{сн} \eta_u + \Delta P_{mod}) t_{p1} \right] / (P_{сн} \eta_u + M_c \omega_{ycm} + \Delta P_{об.1} + \Delta P_{mod}), \quad (21)$$

где s_p – расстояние, пройденное троллейбусом при разгоне за время t_{p1} ; $v_{ycm} = 15,8$ км/ч и $\omega_{ycm} = 0,7$ о.е. – установившиеся пониженные значения скоростей соответственно троллейбуса и тягового ЧРАД; $\eta_{ск.p} = 99$ % – КПД суперконденсатора. Вычисленное из этой формулы значение запаса хода составляет 360 м.

Представляют практический интерес оценка значений длительностей времени ускоренного заряда суперконденсатора неизменным значением постоянного тока $I_{ск} = 100$ А (через диод V в схеме на рис. 1) на электрической заправочной станции применительно к следующим диапазонам изменения напряжения $u_{ск}$ на указанном суперконденсаторе:

– от нуля до заданного значения $U_{ск}^* = 520$ В:

$$\tau_{з1} = \frac{C_{ск} U_{ск}^*}{I_{ск}} = \frac{14,5 \cdot 520}{100} = 75,6 \text{ с} \quad \text{и}$$

– от напряжения $U_{ск.min} = 364$ В до $U_{ск}^* = 520$ В:

$$\tau_{з2} = \frac{C_{ск} (U_{ск}^* - U_{ск.min})}{I_{ск}} = \frac{14,5(520 - 364)}{100} = 22,6 \text{ с}.$$

Аналогично из последних двух соотношений получим, что при увеличении зарядного тока $I_{ск}$ до 250 А значения времени заряда $\tau_{з1}$ и $\tau_{з2}$ сокращаются и становятся равными 30 с и 9 с соответственно.

Также оценим в ночное (нерабочее) время (когда троллейбус отключен от КЭС и выключены все его электропотребители) происходящее уменьшение напряжения $u_{ск}$ на суперконденсаторе, вызванное его разрядом от протекания в нем тока утечки [13]. Задавись длительностью ночного (нерабочего для троллейбуса) интервала времени, равным $\tau_{нр} = 8$ ч, вычислим из соотношений:

$$U_{ск.min} \approx U_{ск}^* e^{-\tau_{нр}/T_{ск}} \quad \text{и} \quad T_{ск} = r_{ym} C_{ск} \quad (23)$$

значение напряжения $U_{ск.min}$ для этого разряженного (после ночи) суперконденсатора: $U_{ск.min} = 239$ В, где $T_{ск} = 10,3$ ч – электромагнитная постоянная времени разряда суперконденсатора. Далее из формулы (20) рассчитаем соответствующие данному разряду ежедневные потери энергии $\Delta W_{ск} = 0,430$ кВтч в СК. Очевидно, эти потери энергии должны быть восполнены (путем заряда СК до его заданного напряжения $U_{ск}^*$) перед утренним выездом из парка на маршрут каждого троллейбуса.

Из публикации [4] известно, что за счет применения емкостного накопителя генерируемой энергии на практике для трамвая экономится (из-за обеспечиваемого устойчивого режима генерации энергии в накопитель независимо от наличия или отсутствия на тех же троллеях другого электротранспорта, потребляющего электроэнергию) до 23 % от общей потребляемой энергии. Исходя из подобия между собой функционирования и электроснабжения троллейбуса и трамвая, аналогичный размер экономии ($\delta = 23$ %) следует ожидать в электропотреблении для троллейбуса. С учетом этого рассчитаем годовой размер экономии электроэнергии, приходящейся на один троллейбус и достигаемой за счет применения суперконденсаторного накопителя энергии:

$$\mathcal{E}_2 = \Delta W \cdot 15 \cdot 18 \cdot 365 \cdot W_6 / 3600 = 19930 \text{ кВтч},$$

$$\Delta W \approx W_{кэс} \left[1/(1-\delta) - 1 \right] = 5459 \cdot 0,2987 = 1631 \text{ о.е.},$$

где ΔW – экономия энергии при одном пуско-тормозном режиме троллейбуса (на примере, тахограммы вида Π'' согласно табл. 6, для которой $W_{кэс} = 5459$ о.е.); 15 – среднее количество этих режимов в час; 18 – количество рабочих часов для троллейбуса в сутки; 365 – число рабочих дней в году; W_6 – базисное значение энергии из табл. 5; 3600 – переводной коэффициент энергии из кДж в кВтч.

Дополнительное значение годовой экономии при переходе от цикла NEDC к минимально возможным

значениям длительностям времени разгона t_{p1}^* , t_{p2}^* и торможения t_{m1}^* , t_{m2}^* в пуско-тормозных режимах троллейбуса (на примере линейной траектории изменения его скорости) вычисляется согласно табл. 4 в виде:

$$\mathcal{E}_{\Sigma,0} = (W_{\text{кэс}} - W_{\text{кэс}}^*) \cdot 15 \cdot 18 \cdot 365 W_{\Sigma} / 3600 \approx 24 \cdot 10^3 \text{ кВтч},$$

где $W_{\text{кэс}} = 4515$ о.е. и $W_{\text{кэс}}^* = 2552$ о.е. – значения потреблений энергии из КЭС для цикла NEDC (из табл. 6) и для минимально возможных значений времени разгона и торможения с линейной ТГ (из табл. 4).

Удельный расход энергии троллейбусом при движении в цикле NEDC находится (применительно к исследуемым видам тахограмм) из соотношения:

$$w = W_{\Sigma} W_{\Sigma} / (3600 m L_0) \text{ кВтч/т·км},$$

где $m = 18,2$ т и $L_0 = 0,45$ км – соответственно масса полного троллейбуса и расстояние между соседними остановками; W_{Σ} – суммарное потребление энергии между соседними остановками (удаленными друг от друга на указанное расстояние). Результаты данных расчетов приведены в табл. 6.

ВЫВОДЫ.

1. По результатам проведенной в пуско-тормозных режимах оптимизации электропотребления троллейбуса, снабженного тяговым ЧРАД и суперконденсаторным накопителем энергии, установлено, что в первой и второй зонах регулирования скорости наименьшее (согласно рис. 5) потребление энергии из контактной электрической сети достигается при использовании квазиоптимальной K' тахограммы вогнутой формы, а наименьшее удельное потребление энергии обеспечивается при применении квазиоптимальной выпуклой формы K''_y тахограммы. Данные квазиоптимальные тахограммы рассчитываются из табл. 2 в виде временных функций гиперболического синуса (содержащих в аргументе поправочный коэффициент ξ^* , значения которого согласно рис. 6 зависят от значений длительностей времени разгона и торможения троллейбуса).

2. Выявлен «U»-образный вид зависимостей (показанных на рис. 4 и рис. 5) потребления W_{p1} , W_{p2} , $W_{\text{кэс}}$ и генерации W_{m1} , W_{m2} энергии троллейбусом от длительности времени разгона и торможения применительно ко всем видам (линейному, параболическому и квазиоптимальному) исследуемых тахограмм. Такой вид зависимостей свидетельствует о наличии для первой и второй зон регулирования скорости оптимальных значений длительностей времени разгона t_{p1}^o , t_{p2}^o и торможения t_{m1}^o , t_{m2}^o , обеспечивающих минимальное значение электропотребления или максимальное значение генерации энергии в пуско-тормозных режимах. Однако, исходя из существующих ограничений в пуско-тормозных режимах для троллейбуса по допусти-

мым значениям его ускорения и замедления, указанные оптимальные значения времени на практике оказываются нереализуемыми.

3. Установлен (согласно рис. 4 и рис. 5) для первой и второй зон регулирования скорости троллейбуса монотонно убывающий вид зависимости удельных электропотреблений P_{p1} , P_{p2} , $P_{\text{кэс}}$ и P_{m1} , P_{m2} при увеличении длительности времени разгона и аналогичный монотонно убывающий вид удельной генерации при увеличении длительности времени торможения. Из этого следует, что для минимизации удельных электропотребления и генерации необходимо при пуско-тормозных режимах задавать всегда наименьшие на практике реализуемые (из табл. 4) значения длительностей времени разгона t_{p1}^* , t_{p2}^* и торможения t_{m1}^* , t_{m2}^* при всех рассмотренных видах траекторий изменения скорости.

4. Полученные аналитические соотношения (16)–(18) позволяют определить практически реализуемый диапазон изменения времени разгона и торможения троллейбуса (исходя из существующих ограничений для его ускорения и замедления) при первой и второй зонах регулирования скорости применительно ко всем исследуемым видам (линейному, параболическому и квазиоптимальному) траекторий изменения скорости в этих режимах.

5. Полученные аналитические зависимости (6)–(12), (19) позволяют рассчитать для пуско-тормозных и установившихся режимов троллейбуса потребление, генерацию и потери энергии в схеме электропитания на рис. 1, снабженной суперконденсаторным накопителем энергии.

6. Проведенные исследования переходных и установившихся режимов работы троллейбуса с суперконденсаторным накопителем энергии подтверждают возможность ее практической реализации (поскольку согласно рис. 7 все электромеханические и энергетические параметры троллейбуса, тягового двигателя и суперконденсатора находятся в пределах для них допустимых значений), а также свидетельствуют (из табл. 6) о значениях КПД суперконденсатора, равных (95–99) %, и удельном расходе энергии троллейбусом, равном (80–90) Вт·ч/т·км.

7. Из результатов исследования суммарного электропотребления W_{Σ} для европейского стандартного цикла движения NEDC следует, что согласно табл. 6 переход в пуско-тормозных режимах от параболического и других видов траекторий скорости к линейному виду траектории позволяет уменьшить удельный расход энергии троллейбуса на (2,5–10) % и более. Выявлено, что длительности времени разгона и торможения при цикле движения NEDC близки (с отклонением не более 10 %) к значениям их времени в пуско-тормозных режимах, обеспечивающим минимизацию общих потерь энергии в тяговом ЧРАД троллейбуса [7].

8. Согласно рис. 4, рис. 5 и табл. 4 переход от длительности времени разгона и торможения, соот-

ветствующих циклу NEDC, к минимально возможным (исходя из допустимых максимальных ускорений и замедлений троллейбуса) их значениям из табл. 4, позволяет в (1,2–1,7) раза уменьшить электропотребление троллейбуса в пуско-тормозных режимах.

9. Полученные результаты исследований направлены на уменьшение непроизводительных потерь энергии в троллейбусе, снабженном тяговым ЧРАД, и рекомендуются для практического использования проектантам и службам эксплуатации городского электротранспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подвижной состав. *Интернет портал «ГЭТ Электротранспорт Санкт-Петербурга»* : веб-сайт. URL: https://www.electrotrans.spb.ru/podvizhnoy_sostav (дата обращения: 07.03.2019).
2. Троллейбус модели 321. *Интернет портал «БЕЛКОММУНАШ»* : веб-сайт. URL: <https://bkm.by/catalog/product-1/> (дата обращения: 07.03.2019).
3. Edstrand J. Calculation method for powering a tramway network. Sweden : Goteborg, 2012. 101 p.
4. Xiao Zh. Sun P., Wang Q., Zhu Y., Feng X. Integrated Optimization of Speed Profiles and Power Split for a Tram with Hybrid Energy Storage Systems on a Signalized Route. China : Chengdu, 2018. PP. 1–21.
5. Fernandez L. M., Garcia P., Garcia C. A., Jurado F. Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single dc/dc converter for a tramway. Spain, 2011. PP. 2183–2191.
6. Фролов Д. С. Электробус. Опыт эксплуатации в России. URL: <https://docplayer.ru/78755124-Elektrobus-opyt-ekspluatacii-v-rossii.html> (дата обращения: 07.03.2019).
7. Волков В. А. Энергосберегающее управление тяговым частотно-регулируемым асинхронным двигателем троллейбуса. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2018. № 4 (44). С. 38–52. DOI: 10.30929/2072-2052.2018.4.44.38-52.
8. Gopikrishnan M. Battery/ultra Capacitor Hybrid

Energy Storage System for Electric, Hybrid and Plug-in Hybrid Electric Vehicles. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2014. PP.1122–1126.

9. Michalczyk M., Grzesiak L. M., Ufnalski B. A lithium battery and ultracapacitor hybrid energy source for an urban electric vehicle. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2012. PP. 158–162.

10. Зиновьев Г. С. Силовая электроника. Москва : Юрайт, 2012. 667 с.

11. Пивняк Г. Г., Волков В. А. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. Днепропетровск : НГУ, 2006. 470 с.

12. Запас хода электромотоцикла: ездовые циклы NEDC, EPA, WLTC и JC08 – какой правильнее? *Интернет портал «ЭкоТехника»* : веб-сайт. URL: <https://ecotechnica.com.ua/stati/1854-zapas-khoda-elektromobilya-ezdovye-tsikly-nedc-epa-wltc-i-jc08-kakoj-pravilnee.html> (дата обращения: 07.03.2019).

13. Datasheet 160V Module. *Интернет портал «Maxwell»* : веб-сайт. URL: http://www.maxwell.com/images/documents/160VModule_DS_3000246_6.pdf (дата обращения: 07.03.2019).

14. Singh Th. P., Kumar S.Y. Comparative Performance Investigation of Battery and Ultracapacitor for Electric Vehicle Applications. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. No. 20. PP. 10197–10204.

15. Thakur A., Saini L. M. A Voltage and State of Charge Control Technique for Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Standalone Photovoltaic Application. *IEEE*. 2015. PP. 1–6.

16. Ефремов И. С. Троллейбусы (теория, конструкция и расчет). Москва : Высшая школа, 1969. 488 с.

17. Волков В. А. Энергосберегающее управление тяговым частотно-регулируемым синхронно-реактивным двигателем. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2018. № 3 (43). С. 8–23. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2018.3.43.8-23>.

OPTIMIZATION OF ELECTRIC CONSUMPTION OF TROLLEYBUS WITH TRACTION FREQUENCY-REGULATED ASYNCHRONOUS ENGINE AND SUPER-CONDENSATING DRIVER OF GENERATED ENERGY

V. Volkov

National Technical University “Dnipro Polytechnic”

prosp. Dmytra Yavornitskoho, 19, Dnipro, 49600, Ukraine. E-mail: green_stone@ukr.net

Purpose. The article is devoted to minimization of the power consumption of a trolleybus equipped with a frequency-regulated asynchronous motor and a supercapacitor accumulator of the generated energy during start-braking regimes (by means of energy-saving trajectories of speed change and optimal durations of acceleration and deceleration times). **Methodology.** When conducting research, the methods of energy balance, mathematical analysis and simulation computer modelling were used. **Results.** The type of trajectories of speed during acceleration and deceleration of the trolleybus, corresponding to the minimization of the total and specific energy consumption of the trolleybus, is determined. The presence of optimal durations of acceleration and deceleration times, minimizing the total energy consumption of the trolleybus in the start-braking regimes, is revealed. Analytical dependencies are proposed for calculating the total and specific energy consumption and generation by a trolleybus containing a supercondenser storage of generated energy. As applied to the various studied (linear, parabolic and quasioptimal) trajectories of trolleybus speed changes, the calculated ratios were obtained for the values of the minimum possible values of its acceleration and deceleration times, based on the maximum acceleration and deceleration for the trolleybus in the specified regimes. Electromechani-

cal and energetic processes in a trolley bus, a traction engine, and a supercondensator under commissioning and braking conditions were investigated. Calculations of total and specific power consumption by a trolleybus were carried out when moving between adjacent stops with the above-mentioned different types of speed trajectories in the start-braking regimes. **Practical value.** Practical use of research results allows to reduce to the minimum possible values the total or specific energy consumption of a trolleybus during its movement. Figures 7, tables 6, references 17.

Key words: trolleybus, traction asynchronous engine, frequency regulation, power consumption, optimization.

REFERENCES

1. Podvizhnoy sostav [Rolling stock]. *electrotrans.spb.ru*. Retrieved from https://www.electrotrans.spb.ru/podvizhnoy_sostav [in Russian]
2. Trolleybus modeli 321 [Trolleybus model 321]. *bkm.by*. Retrieved from <https://bkm.by/catalog/product-1/> [in Russian]
3. Edstrand, J. (2012). Calculation method for powering a tramway network. Sweden: Goteborg.
4. Xiao, Zh., Sun, P., Wang, Q., Zhu, Y., & Feng, X. (2018). Integrated Optimization of Speed Profiles and Power Split for a Tram with Hybrid Energy Storage Systems on a Signalized Route. China: Chengdu. 1–21.
5. Fernandez, L.M., Garcia, P., Garcia, C.A., & Jurado, F. (2011). Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single dc/dc converter for a tramway. Spain.
6. Frolov, D.S. Elektrobus. Opyt ekspluatatsii v Rossii [Electric bus. Operating experience in Russia]. *docplayer.ru*. Retrieved from <https://docplayer.ru/78755124-Elektrobus-opyt-ekspluatatsii-v-rossii.html> [in Russian]
7. Volkov, V. A. (2018). Energoberegayushcheye upravleniye tyagovym chastotno-reguliruyemym asinkhronnym dvigatelem trolleybusa. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, 4 (44), 38–52. DOI: 10.30929/2072-2052.2018.4. 44.38-52. [in Russian]
8. Gopikrishnan, M. (2014). Battery/ultra Capacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid and Plug-in Hybrid Electric Vehicles. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 1122 –1126.
9. Michalczuk, M. A, Grzesiak, L. M., & Ufnalski, B. (2012). A lithium battery and ultracapacitor hybrid energy source for an urban electric vehicle. *Przeglad Elektrotechniczny*, 158–162.
10. Zinovyev, G. S. (2012). *Silovaya elektronika [Power electronics]*. Moscow: Yurayt. [in Russian]
11. Pivnyak, G. G., & Volkov, A. V. (2006). *Sovremennyye chastotno-reguliruyemye asinkhronnye elektroprivody s shirotno-impulsnoy modulyatsiey [Modern frequency-adjustable asynchronous electric drives with pulse-width modulation]*. Dnipro: NMU. [in Russian]
12. Zapas khoda elektromobilya: ezdoverye tsikly NEDC, EPA, WLTC i JC08 – kakoy pravilnee? [Power reserve: NEDC, EPA, WLTC and JC08 driving cycles – which one is more correct?]. *ecotechnica.com.ua*. Retrieved from <https://ecotechnica.com.ua/stati/1854-zapas-khoda-elektromobilya-ezdovye-tsikly-nedc-epa-wltc-i-jc08-kakoj-pravilnee.html> [in Russian]
13. Datasheet 160V Module. *maxwell.com*. Retrieved from http://www.maxwell.com/images/documents/160VModule_DS_3000246_6.pdf [in Russian]
14. Singh, Th. P., & Kumar, S. Y. (2017). Comparative Performance Investigation of Battery and Ultracapacitor for Electric Vehicle Applications. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12 (20), 10197–10204.
15. Thakur, A., & Saini, L. M. (2015). A Voltage and State of Charge Control Technique for Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Standalone Photovoltaic Application. *IEEE*, 1–6.
16. Yefremov, I. S. (1969). *Trolleybusy (teoriya, konstruktsiya i raschet) [Trolleybuses (theory, design and calculation)]*. Moscow: Vysshaya shkola. [in Russian]
17. Volkov, V. A. (2018). Energoberegayushcheye upravleniye tyagovym chastotno-reguliruyemym sinkhronno-reaktivnym dvigatelem. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, 3 (43), 8–23. DOI: 10.30929/2072-2052.2018.3.43.8-23. [in Russian]

Стаття надійшла 12.03.2019.