

В.А. Волков, кандидат техн. наук
(Україна, Днепр, НТУ "Дніпровська політехніка")

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ТРАМВАЯ С ТЯГОВЫМИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМИ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ГЕНЕРИРУЕМОЙ ЭНЕРГИИ

Анотація. Визначено вид траєкторій швидкості при розгоні і гальмуванні трамвая, відповідних мінімізації загального і питомого споживання енергії трамваем. Досліджено електромеханічні і енергетичні процеси в трамваї, тяговому двигуні і суперконденсаторі при пуско-гальмівних режимах. Виконано розрахунки загального та питомого електроспоживання трамваем при русі між сусідніми зупинками з різноманітними відомими видами траєкторій швидкості в пуско-гальмівних режимах. Практичне використання результатів досліджень дозволяє зменшити до мінімально можливих значень загальне або питеме споживання енергії трамваем при його руху.

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

Аннотация. Определен вид траекторий скорости при разгоне и торможении трамвая, соответствующих минимизации общего и удельного потребления энергии трамваем. Исследованы электромеханические и энергетические процессы в трамвае, тяговом двигателе и суперконденсаторе при пуско-тормозных режимах. Выполнены расчеты общего и удельного электропотребления трамваем при движении между соседними остановками с различными видами траекторий скорости в пуско-тормозных режимах. Практическое использование результатов исследований позволяет уменьшить до минимально возможных значений общее или удельное потребление энергии трамваем при его движении.

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

Abstract. The type of trajectories of speed during acceleration and deceleration of a tram, corresponding to the minimization of the total and specific energy consumption of the tram, is determined. The electromechanical and energy processes in the tram, traction engine and supercapacitor are investigated under the start-braking regimes. Calculations of the total and specific power consumption of the tram were made when moving between adjacent stops with different known types of speed trajectories in the start-braking regimes. Practical use of research results allows to reduce to the lowest possible values the total or specific energy consumption of a tram during its movement.

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

Введение. 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 в настоящее время выпускаются более, чем в двадцати странах мира (в том числе – в Германии, Франции, Италии, России, Чехии, Польше, США, 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 как при движении с установленными скоростями, так и – в пуско-тормозных режимах (которые, как известно, составляют для трамвая 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 целый ряд публикаций. В частности, применительно к трамваю в [3] разработана компьютерная модель для вычисления потребляемой мощности и энергии тяговыми двигателями и суммарной 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 статье [4] разработано и исследовано энергосберегающее управление тяговыми ЧРАД трамвая при режимах разгона и торможения, рассчитаны переходные электромеханические и энергетические процессы для указанных режимов тяговых двигателей.

При этих исследованиях предполагалась техническая возможность при торможении трамвая реализации режима генерации энергии тяговыми ЧРАД в контактную электрическую сеть, что на практике не всегда оказывается возможным. А именно, для реализации данного режима генерации (от трамвая, находящегося в режиме торможения) необходимо присутствие на тех же питающих троллеях в этот момент времени хотя бы одного другого (соседнего) трамвая, 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 трамваев). 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 трамвая (посредством тормозных колодок) либо движение трамвая в установившемся режиме или при торможении на выбеге (при котором на последнем этапе торможения также требуется применение механического торможения). Кроме этого, даже при возможной реализации режима генерации энергии (передаваемой от тормозящего трамвая в одному или нескольким соседним трамваям, потребляющим энергию в это время) возникающие потери энергии в троллеях увеличены и зависят от длины троллей между тормозящим и указанным потребляющим генерируемой энергией трамваями.

Наиболее эффективным путем гарантированного обеспечения режимов генерации трамвая является применение в нем накопителей генерируемой энергии [5, 6]. В частности, в статьях [5, 6] 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 контактной электрической сети и уменьшение потерь энергии в этой сети).

Однако до настоящего времени в известной отечественной и зарубежной научно-технической литературе отсутствуют публикации, рассматривающее применительно к суперконденсаторному накопителю энергии схему электропитания трамвая, исследования электромеханических и энергетических процессов трамвая и его тяговых двигателей, энергосберегающих траекторий изменения скорости и оптимальных времен разгона и торможения трамвая, а также минимизацию его электропотребления в этих режимах.

Цель работы. Исследование при пуско-тормозных режимах электромеханических и энергетических процессов и минимизация (посредством энергосберегающих траекторий изменения скорости и оптимальных времен разгона и торможения) электропотребления трамвая, снабженного частотно-регулируемыми асинхронными двигателями и суперконденсаторным накопителем генерируемой энергии.

При исследованиях приняты допущения:

- объектом исследования являются электромеханические и энергетические процессы для одногонного трамвая типа «Tatra – Т6В5» с тяговыми ЧРАД при режимах разгона и установившегося движения (с потреблением электроэнергии из КЭС либо из СК) и электрического торможения (с генерацией энергии от тяговых двигателей только в СК) – применительно к схеме электропитания, представленной на рис. 1; основные технические характеристики исследуемого трамвая даны в табл. 1 [2];

- применялось идеализированное представление используемого тягового короткозамкнутого ЧРАД типа АТМ225М4У2 (номинальной мощностью 55 кВт и номинальным действующим линейным статорным напряжением 450В), дополненное учетом потерь мощности в стали этого двигателя [4];

- параметры тягового ЧРАД (у которого активные сопротивления были приведены к температуре 115°С) полагались неизменными и представлены в табл. 1;

- полагалось использование для тягового привода трамвая векторного типа системы автоматического управления (САУ), характеризующейся отдельным регулированием намагничивающей i_{Lx} и активной i_{Ly} проекций обобщенного вектора статорного тока \vec{i}_l (образованного основными гармоническими составляющими фазных статорных токов) ЧРАД на оси вращающейся ортогональной координатной системы «x-y», связанной вещественной осью «x» с обобщенным вектором потокоцепления 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 потокоцепления ротора Ψ_r ,

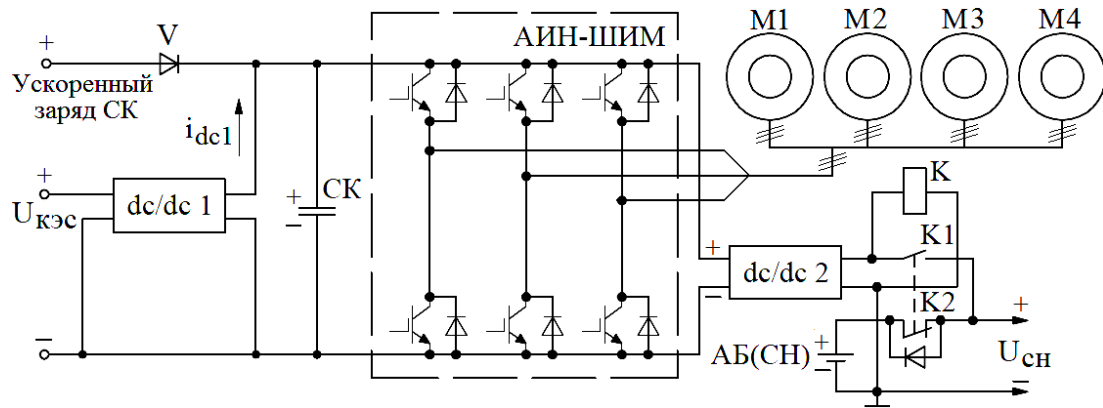


Рис. 1 Электрическая схема питания собственных нужд и тяговых ЧРАД трамвая: где АИН-ШИМ – трехфазный автономный инвертор напряжения, выполненный на IGBT-транзисторах, шунтированных обратными диодами; СК – суперконденсатор; М1...М4 – тяговые ЧРАД; $U_{кэс}$ – напряжение контактной электрической сети; $U_{сн}$ – напряжение питания собственных нужд; АБ (СН) – аккумуляторная батарея для питания собственных нужд; К – электромеханического реле

Таблица 1

Номинальные параметры двигателя и макета трамвая

Название параметра, единицы измерения	Значение
I Двигатель АТМ 225 М4У2	
- мощность, кВт	55
- действующее линейное напряжение, В	450
- частота статорного напряжения, Гц	50
- номинальная/максимальная скорость, об/мин	1500/4000
- скольжение, %	1,5
- крутящий момент, Нм	350
- кратность пускового момента	1,8
- кратность максимального момента	3,5
- коэффициент полезного действия, %	92
- коэффициент мощности	0,86
II Макет одновагонного трамвая (на базе трамвая «Tatra-T6B5»)	
- номинальная вместимость вагона, чел.	120
- максимальная скорость трамвая, км/ч	65
- количество тяговых двигателей, шт.	4
- общая мощность тяговых двигателей, кВт	220
- номинальное напряжение контактной электрической сети, В	550
- допустимые отклонения постоянного напряжения контактной электрической сети от ее номинального значения, В	+ 170 - 150
- КПД силового преобразователя, %	94
- максимальная мощность потребления собственных нужд, кВт	1

равном его номинальному значению $\Psi_{гн}$, а во второй зоне (при $\omega > \omega_n$) – при постоянстве соотношения: $\omega_l \cdot \Psi_r = \omega_{ln} \cdot \Psi_{гн} = const$ [7], где ω_l и ω_{ln} – текущее и номинальное значения частоты статора; ω и ω_n – текущее и номинальное значения скорости ротора тягового двигателя соответственно;

- полагается (с учетом наличия в принятой схеме электропитания на рис.1 стабилизатора постоянного напряжения «dc/dc1») всегда достаточным уровень напряжения на входе АИН-ШИМ для реализации вышеупомянутого двухзонного регулирования скорости тягового двигателя [4];

- электромеханические и энергетические процессы трамвая исследовались в широком диапазоне изменения длительностей их времен разгона и торможения до скоростей, не превышающих 50 км/ч (значения последних соответствуют режиму городского движения в Украине и Европе, в том числе – действующему европейскому стандарту городского и пригородного цикла движения транспортных средств (NEDC) [8]); при данном цикле движения длительности времен разгона (от нулевой до максимальной скорости $v_m = 50$ км/ч) и торможения (от максимальной скорости $v_m = 50$ км/ч до остановленного состояния транспортного средства) составляют 26с;

- исследования электромеханических и энергетических процессов выполнялись для максимальной полной массы m трамвая, равной 26.8 т [4];
- расчеты сил сопротивления движению и механических процессов трамвая 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.) [7];
- значения коэффициента полезного действия (КПД) для преобразователя напряжения «dc/dc1» 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) трамвая определялись (в функции развиваемой им механической мощности $P_m = F_m \cdot v$, отнесенной к номинальной мощности $P_{об.н}$ тягового ЧРАД) из расчетных соотношений в [4], где F_m и v – текущие значения соответственно силы тяги, Н и скорости движения, м/с трамвая;
- принималось отсутствие: движения окружающего воздуха (ветра) и проскальзывания колес трамвая относительно рельса;
- с учетом выполнения (согласно схеме на рис.2,а) суперконденсатора СК на модулях ВМ0D0006E160B02 фирмы «Maxwell Technologies» (с техническими характеристиками: $C = 5.8\Phi$; $U_n = 160\text{ В}$; $U_{max} = 170\text{ В}$; $I_{max} = 170\text{ А}$; $R_{ск} = 220\text{ мОм}$; $R_{ym} = 6.4\text{ кОм}$; $m = 5.2\text{ кг}$) [9], которые были соединены между собой по четыре последовательно и по двадцать четыре штуки параллельно (при общем количестве 48 модулей), при дальнейших расчетах суперконденсатор задавался эквивалентной схемой замещения, показанной на рис.2,б [10], со следующими эквивалентными параметрами: сопротивлениями $r_{ск} = 4R_{ск}/24 = 36.7\text{ мОм}$ и $r_{ym} = 4 \cdot 6.4/24 = 1.07\text{ кОм}$, емкостью $C_{ск} = 24C/4 = 34.8\text{ Ф}$; при этом условимся, что при функционировании в широтно-импульсном режиме преобразователя «dc/dc1» [11, 12] в схеме электропитания на рис.1 поддерживается (стабилизируется) при потреблении энергии от КЭС напряжение на суперконденсаторе равным заданному значению: $U_{ск}^* = 560\text{ В} = const$;
- все приводимые далее в статье расчетные данные (в таблицах и на рисунках) для электромеханических и энергетических процессов трамвая соответствуют его горизонтальному движению (с крутизной уклона $i = 0$).

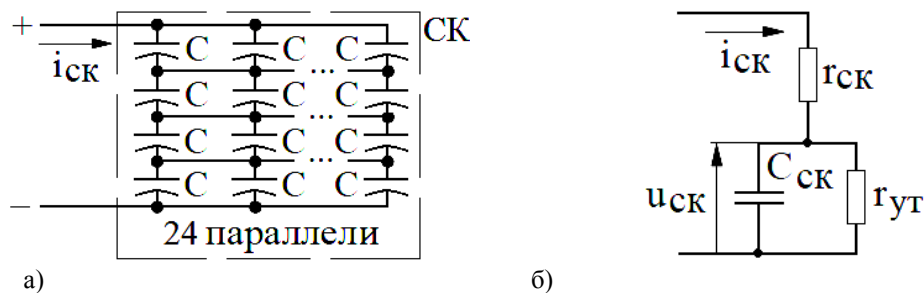


Рис. 2 Схема суперконденсатора на модулях ВМ0D0006E160B02 емкостью $C = 5.8\text{ Ф}$ (а) и его эквивалентная схема замещения (б), в которой: $r_{ск} = 36.7\text{ мОм}$, $r_{ym} = 1.07\text{ кОм}$, $C_{ск} = 34.8\text{ Ф}$

На *первом этапе* приведем исходные расчетные аналитические зависимости из [4] для механических (в абсолютных единицах):

$$F_m - F_c = m(1 + \gamma) \cdot v', \quad \varepsilon = \frac{\omega}{v} = \frac{\omega_n}{v_n} = \frac{\omega_m}{v_m} = const, \quad s = \int_0^t v \cdot dt, \quad s_p = \int_0^{t_p} v \cdot dt, \quad s_m = \int_0^{t_m} v \cdot dt \quad (1)$$

и энергетических (в относительных единицах) процессов трамвая:

$$P_{\Sigma} = n \cdot [M \cdot \omega + (\Delta P_{об} + \Delta P_{mod})] / \eta_u + P_{сн}, \quad (2)$$

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

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

В формулах (1) – (3) используются следующие обозначения: F_m и F_c – силы соответственно тяги и сопротивления движению трамвая (определенные из [4]); v – текущая скорость движения, м/с трамвая; $v_n = 24.4$ км/ч – скорость трамвая, соответствующая номинальной скорости ω_n тягового ЧРАД; v_m и ω_m – максимальная скорость трамвая 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 трамвая принято значение: $\gamma = 0.1$ [4]); v' – производная скорости трамвая, м/с² по текущему времени t ; $\varepsilon = 23.19$ рад/м – соотношение между соответствующими друг другу скоростью ω ротора ЧРАД, рад/с и скоростью v движения троллейбуса, м/с [4]; s , s_p и s_m – соответственно текущее, пройденное трамваем при разгоне или торможении, расстояние; t_p и t_m – времена соответственно разгона и торможения трамвая; P_{Σ} – текущая суммарная потребляемая (при $P_{\Sigma} > 0$) или генерируемая (при $P_{\Sigma} < 0$) мощность всеми ЧРАД; $n = 4$ – количество тяговых двигателей в одновагонном трамвае; M – развиваемый электромагнитный момент одним тяговым ЧРАД трамвая; M_c – приведенный к валу ЧРАД суммарный статический момент сопротивления трамвая; $M_{c.\partial\delta}$ – приведенный к валу ЧРАД статический момент одного тягового двигателя; J_{Σ} – приведенный к валам тяговых ЧРАД суммарный момент инерции трамвая; J – приведенный к валу одного тягового ЧРАД момент инерции трамвая; J_{δ} – базисное значение момента инерции тягового ЧРАД в системе относительных единиц; $\Delta P_{\partial\delta}$ – общие основные потери мощности одного тягового ЧРАД; $\Delta P_{\partial\delta.1}$ и $\Delta P_{\partial\delta.2}$ – текущие значения общих основных потерь мощности одного 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 [4, 7]; 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 [4], исходя из соответственно сопротивления движению трамвая или параметров применяемого в нем тягового ЧРАД.

На *втором этапе* проанализируем четыре возможных режима работы системы электропитания на рис.1:

а) в момент начала разгона трамвая напряжение u_{ck} на суперконденсаторе равно значению u_{ck0} (превышающему его заданное значение $u_{ck0} > U_{ck}^*$); в данном режиме (соответствующем первой части разгона трамвая) 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 тяговыми ЧРАД текущее напряжение на суперконденсаторе снижается до уровня его заданного значения $u_{ck} = U_{ck}^*$, после чего до этого закрытые транзисторы преобразователя «dc/dc1» переходят в широтно-импульсный режим работы [11, 12] 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 трамваем энергии от КЭС, равенством нулю тока $i_{ck} \approx 0$ через суперконденсатор и поддержанием неизменным его напряжения: $u_{ck} = U_{ck}^*$);

в) при начале режима торможения из-за возникновения генерации энергии (от четырех ЧРАД через инвертор в суперконденсатор) и одновременного с этим закрытия транзисторов преобразователя «dc/dc1» происходит заряд СК до напряжения, превышающего его заданное значение: $u_{СК} > U_{СК}^*$;

г) во второй части торможения (по мере снижения скорости ЧРАД) режим генерации изменяется на режим потребления энергии тяговыми ЧРАД (через инвертор) от суперконденсатора СК (заряженного до напряжения $u_{СК} > U_{СК}^*$); при этом транзисторы преобразователя «dc/dc1» продолжают оставаться закрытыми; после остановки ЧРАД суперконденсатор остается заряженным до повышенного напряжения $u_{СК}(t_{ml}) > U_{СК}^*$ и за время остановки незначительно уменьшает (обычно из-за ее непродолжительности и относительного малого потребления во время нее энергии) свое напряжение от величины $u_{СК}(t_{ml})$ до значения u_{CKO} (где $u_{CKO} > U_{СК}^*$).

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

$$u_{СК}(t) = u_{СК}(0) - \frac{1}{C_{СК}} \cdot \int_0^t i_{СК}(t) \cdot dt, \quad \Delta W_{СК}(t) = r_{СК} \cdot \int_0^t i_{СК}^2(t) \cdot dt, \quad (4)$$

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

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

$$P_{\Sigma}(t) \approx u_{СК}(t) \cdot i_{СК}(t), \quad (5)$$

мгновенное 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 $i_{СК} \approx 0$ и $u_{СК} = U_{СК}^* = const$) выходной ток преобразователя «dc/dc1» находится из соотношения:

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

Принимая во внимание, что положительное значение потребляемой суммарной мощности ($P_{\Sigma} > 0$) соответствуют режиму потребления трамваем энергии, а отрицательное значение ($P_{\Sigma} < 0$) – 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 преобразователя «dc/dc1» 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 математическими соотношениями из [13]) тахограмм (ТГ) $v(t)$ трамвая, рассчитаем из зависимостей [14]:

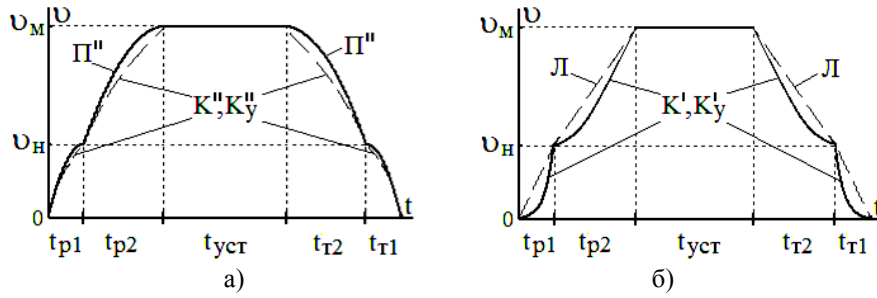


Рис. 3 Види досліджуваних тахограмм трамвая при пуско-тормозних режимах: а – для параболічної Π'' і квазіоптимальних K'' , K_y'' вивуклої форми; б – для лінійної $Л$, параболічної Π' і квазіоптимальних K' , K_y' вогнутої форми тахограмм

$$\left. \begin{aligned}
 W_{m1(n)} &= 0.5 \int_0^{t_{m1}} P_{\Sigma} \cdot [1 + \text{sign}(P_{\Sigma})] \cdot dt, & W_{m2(n)} &= 0.5 \int_0^{t_{m2}} P_{\Sigma} \cdot [1 + \text{sign}(P_{\Sigma})] \cdot dt, \\
 W_{m1(\varepsilon)} &= 0.5 \int_0^{t_{m1}} P_{\Sigma} \cdot [1 - \text{sign}(P_{\Sigma})] \cdot dt, & W_{m2(\varepsilon)} &= 0.5 \int_0^{t_{m2}} P_{\Sigma} \cdot [1 - \text{sign}(P_{\Sigma})] \cdot dt, \\
 \Delta W_{ск.м1(n)} &= 0.5 \int_0^{t_{m1}} r_{ск} \cdot i_{ск}^2 \cdot [1 + \text{sign}(P_{\Sigma})] \cdot dt, & \Delta W_{ск.м2(n)} &= 0.5 \int_0^{t_{m2}} r_{ск} \cdot i_{ск}^2 \cdot [1 + \text{sign}(P_{\Sigma})] \cdot dt, \\
 \Delta W_{ск.м1(\varepsilon)} &= 0.5 \int_0^{t_{m1}} r_{ск} \cdot i_{ск}^2 \cdot [1 - \text{sign}(P_{\Sigma})] \cdot dt, & \Delta W_{ск.м2(\varepsilon)} &= 0.5 \int_0^{t_{m2}} r_{ск} \cdot i_{ск}^2 \cdot [1 - \text{sign}(P_{\Sigma})] \cdot dt
 \end{aligned} \right\} (8)$$

електропотребление $W_{m1(n)}$, $W_{m2(n)}$ и электрогенерацию $W_{m1(\varepsilon)}$, $W_{m2(\varepsilon)}$ при режимах торможения трамвая соответственно для первой и второй зон регулирования скорости тягового ЧРАД, а также потери энергии в суперконденсаторе при торможении: в первой $\Delta W_{ск.м1(n)}$, $\Delta W_{ск.м1(\varepsilon)}$ и второй $\Delta W_{ск.м2(n)}$, $\Delta W_{ск.м2(\varepsilon)}$ зонах регулирования скорости, – соответствующие при $P_{\Sigma} \geq 0$ электропотреблению (обозначены показанным в скобках индексом «п») или при $P_{\Sigma} < 0$ генерации (обозначены показанным в скобках индексом «г»), где t_{m1} и t_{m2} – длительности времен торможения соответственно 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 $P_{\Sigma} < 0$).

С учетом (8) применительно к режиму торможения трамвая вычислим из зависимостей [14]:

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

значения потребляемой $W_{m(n)}$ и генерируемой $W_{m(\varepsilon)}$ энергии, общей потребляемой энергии W_m в указанном режиме, накопленной энергии $W_{ск.м}$ суперконденсатором при торможении, потребления энергий W_{m1} и W_{m2} соответственно при первом и втором диапазоне регулирования скорости ЧРАД, значение $\eta_{ск.м}$ КПД суперконденсатора при режиме торможения трамвая, 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 трамвая, 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:

$$0.5 \cdot C_{СК} \cdot (U_{СК}^*)^2 + |W_{СК,m}| = 0.5 \cdot C_{СК} \cdot u_{СК}^2(t_{m1}), \quad (10)$$

определим максимальное значение напряжения $u_{СК}(t_{m1}) = u_{СК,m}$ на этом конденсаторе по окончании режима торможения:

$$u_{СК}(t_{m1}) = \sqrt{2 |W_{СК,m}| / C_{СК} + (U_{СК}^*)^2}, \quad (11)$$

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 соотношениями из [13]) тахограмм $\nu(t)$ трамвая, рассчитаем из соотношений [14]:

$$\left. \begin{aligned} W_{p1} &= \int_0^{t_{p1}} P_{\Sigma} dt, & W_{p2} &= \int_0^{t_{p2}} P_{\Sigma} dt, & \Delta W_{СК,p} &= \int_0^{t_p^*} r_{СК} \cdot i_{СК}^2(t) \cdot dt, & P_{кэс} &= W_{кэс} / \alpha_p, \\ W_p &= W_{p1} + W_{p2} + \Delta W_{СК,p}, & W_{кэс} &= \left\{ W_p - 0.5 C_{СК} \left[u_{ско}^2 - (U_{СК}^*)^2 \right] \right\} / \eta_{дс1} \geq 0, \\ p_{p1} &= \left[W_{p1} + \int_0^{t_{p1}} r_{СК} \cdot i_{СК}^2(t) \cdot dt \right] / \alpha_{p1}, & p_{p2} &= \left[W_{p2} + \int_0^{(t_p^* - t_{p1})} r_{СК} \cdot i_{СК}^2(t) \cdot dt \right] / \alpha_{p2}, \\ \eta_{СК,p} &= \frac{0.5 \cdot C_{СК} \cdot \left[u_{ско}^2 - (U_{СК}^*)^2 \right] - \Delta W_{СК,p}}{0.5 \cdot C_{СК} \cdot \left[u_{ско}^2 - (U_{СК}^*)^2 \right]}, & \alpha_{p1} &= \int_0^{t_{p1}} \omega \cdot dt, & \alpha_{p2} &= \int_0^{t_{p2}} \omega \cdot dt, & \alpha_p &= \alpha_{p1} + \alpha_{p2} \end{aligned} \right\} (12)$$

значения потребляемых энергий W_{p1} , W_{p2} и удельных потребляемых энергий p_{p1} , p_{p2} в первой и второй зонах регулирования скорости, потерь энергии $\Delta W_{СК,p}$ в суперконденсаторе и КПД $\eta_{СК,p}$ суперконденсатора при разгоне, общего потребления трамваем 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 времен 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 остановленным трамваем 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 трамвая и варьировании длительностей

времен 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.2 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 временам 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 трамвая и ЧРАД, относящиеся к первой зоне регулирования, обозначаются индексом «1», а ко второй – индексом «2»).

Таблица 2

Значения оптимальных времен $t_{p1}^o, t_{p2}^o, t_{m1}^o, t_{m2}^o$ разгона и торможения трамвая и соответствующих им потребляемых энергий $W_{p1}^o, W_{p2}^o, W_{кэс}^o, W_{m1}^o, W_{m2}^o$ и общего электропотребления $W_{кэс}^o$, а также удельных потреблений энергии $p_{p1}, p_{p2}, p_{m1}, p_{m2}, p_{кэс}$ для разных видов (К', К'', П', П'', Л) тахограмм

Вид ТГ	Разгон								Торможение					
	t_{p1}^o	W_{p1}^o	p_{p1}	t_{p2}^o	W_{p2}^o	p_{p2}	$W_{кэс}^o$	$p_{кэс}$	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.
К'	4.2	3793.9	6.334	5.6	12519	4.700	7012.3	2.614	4.2	-2720.4	-4.426	5.0	-8635.6	-3.505
К''	4.0	3799.9	6.104	5.6	12514	4.633	7011.8	2.577	4.2	-2714.2	-4.062	5.0	-8637.7	-3.476
П'	5.0	3837.4	7.419	7.7	12815	3.949	6836.5	2.094	5.0	-2676.7	-5.017	6.7	-8415.8	-2.869
П''	4.3	3943.7	4.415	5.7	12869	4.268	8360.2	2.747	4.3	-2571.3	-2.857	5.0	-8368.7	-3.134
Л	4.0	3799.9	6.104	5.6	12519	4.700	7012.3	2.614	4.2	-2714.2	-4.062	5.0	-8635.6	-3.505

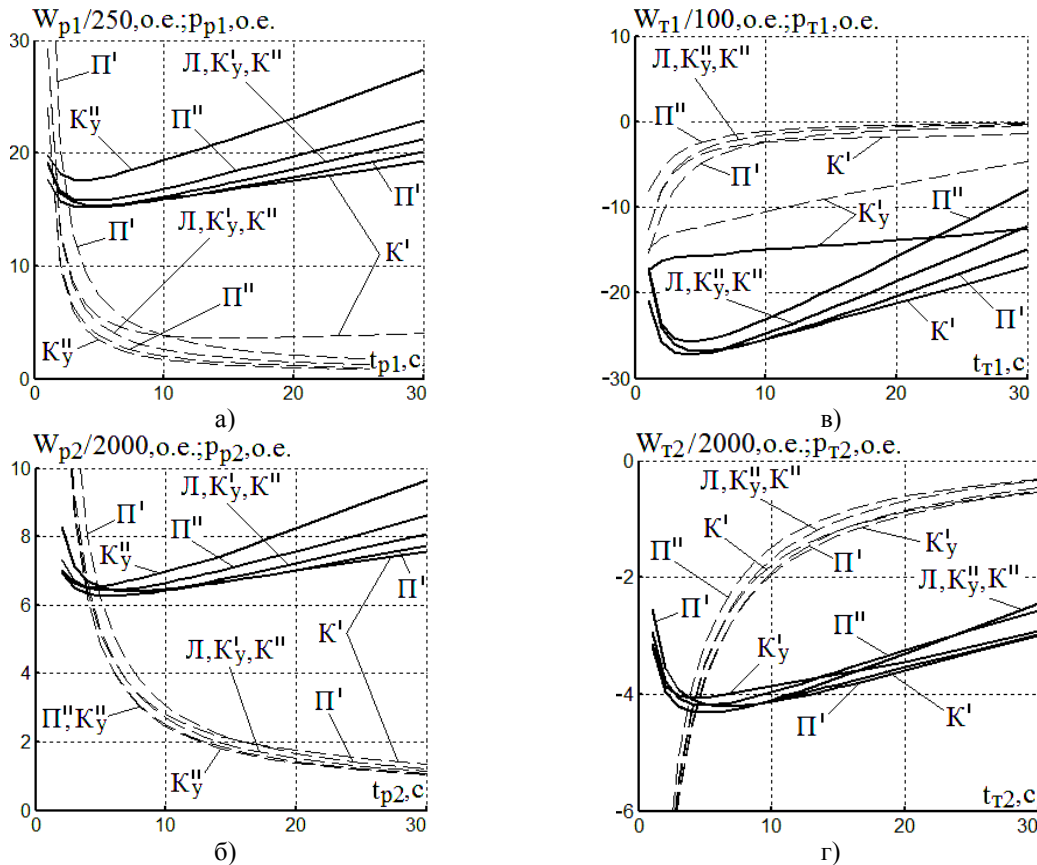


Рис. 4 Зависимости значений электропотребления $W_{p1}, W_{p2}, W_{m1}, W_{m2}$ (показаны сплошной линией) и удельного электропотребления $p_{p1}, p_{p2}, p_{m1}, p_{m2}$ (показаны пунктиром) трамвая при разгоне (а, б) и торможении (в, г) в первой (а, в) и второй (б, г) зонах регулирования при варьировании времен разгона t_{p1}, t_{p2} и торможения t_{m1}, t_{m2} для разных видов (К', К'', К'у, К''у, П', П'', Л) тахограмм

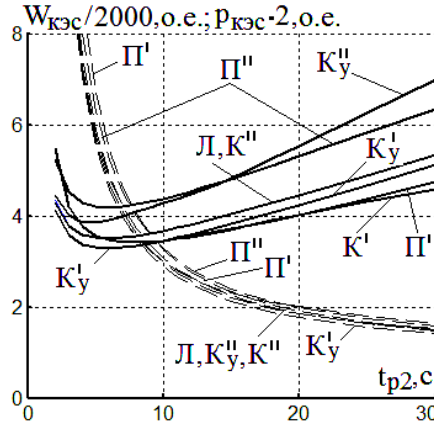


Рис. 5. Зависимости для общего $W_{кэс}$ (показаны сплошной линией) и удельного $P_{кэс}$ потребления энергии (показаны пунктиром) трамваем из контактной электрической сети при разных видах (K' , K'' , K'_y , K''_y , Π' , Π'' , L) тахограмм

При выполненных исследованиях электропотребления и удельного энергопотребления трамвая в пуско-тормозных режимах (результаты которых показаны графиками на рис. 4 и рис. 5) задавались различного вида тахограммы 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 тахограммы, полученные применительно к удельному электропотреблению. При этом (аналогично рассмотренному в [4]) значения поправочного коэффициента ξ^* (равные ξ_1^* в первой и ξ_2^* – во второй зоне регулирования скорости) соответствуют (при конкретных неизменных длительностях времен 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 скорости K' , K'' и K'_y , K''_y значения соответствующих поправочных коэффициентов ξ_1^* и ξ_2^* представлены на рис. 6.

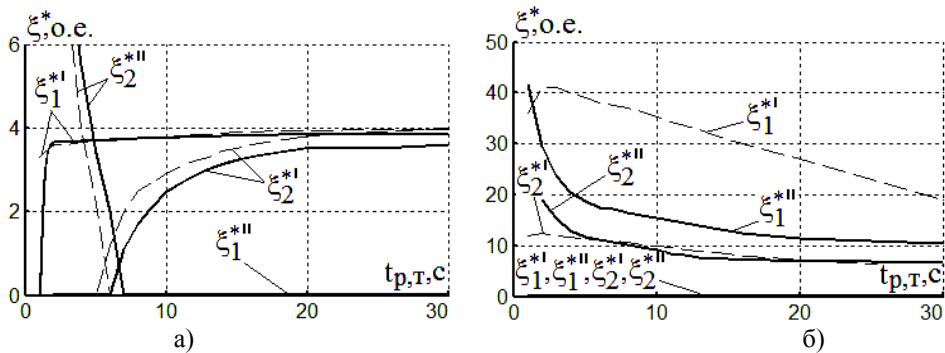


Рис. 6. Зависимости поправочных коэффициентов $\xi^*(t_p)$, $\xi^*(t_m)$ для квазиоптимальных (а – по потреблению, б – по удельному потреблению энергии) тахограмм вогнутой и выпуклой (показаны одним и двумя штрихами соответственно) формы при первой и второй зонах регулирования (показаны индексами 1 и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

На *пятом этапе*, исходя из допустимых для трамвая максимальных значений ускорения $v'_{p,max} = 1.5 \text{ м/с}^2$ и замедления $|v'_{m,max}| = 1.3 \text{ м/с}^2$ (соответствующих согласно [14] комфортному нахождению пассажиров в городском электротранспорте), определим из полученных в [14] зависимостей рабочие диапазоны изменения длительностей времен разгона t_{p1} , t_{p2} и торможения t_{m1} , t_{m2} , при которых значения ускорений и замедлений трамвая не превышают их максимальных значений, для линейной:

$$t_{p1,2} \geq t_{p1,2}^* = B/v'_{p,max} \quad \text{и} \quad t_{m1,2} \geq t_{m1,2}^* = B/v'_{m,max}, \quad (13)$$

параболической (вогнутой и выпуклой формы):

$$t_{p1,2} \geq t_{p1,2}^* = 2B/v'_{p,max}, \quad t_{m1,2} \geq t_{m1,2}^* = 2B/v'_{m,max}, \quad (14)$$

и квазиоптимальной (вогнутой и выпуклой формы) траекторий скорости:

$$t_{p1,2} \geq t_{p1,2}^* = \frac{1}{\xi^* \sqrt{K}} \cdot \operatorname{arth} \left(\frac{\xi^* \sqrt{K} \cdot B}{v'_{p,max}} \right), \quad t_{m1,2} \geq t_{m1,2}^* = \frac{1}{\xi^* \sqrt{K}} \cdot \operatorname{arth} \left(\frac{\xi^* \sqrt{K} \cdot B}{v'_{m,max}} \right), \quad (15)$$

где коэффициент B принимает значение, равное: v_H – при первой зоне регулирования или $(v_M - v_H)$ – при второй зоне регулирования скорости. Рассчитанные из (13) – (15) для исследуемых траекторий скорости пуско-тормозных режимов трамвая (применительно к значениям его номинальной $v_H = 24.4$ км/ч = 6.77 м/с и максимальной $v_M = 50$ км/ч = 13.9 м/с скоростей) минимально возможные (исходя из допустимых значений его ускорения и замедления) длительности времен разгона t_{p1}^*, t_{p2}^* и торможения t_{m1}^*, t_{m2}^* представлены в табл.3.

Таблица 3

Результаты расчета минимально возможных (исходя из максимально допустимых ускорений и замедлений) времен t_{p1}^*, t_{p2}^* и t_{m1}^*, t_{m2}^* разгона и торможения трамвая и соответствующие им потребляемых энергий $W_{p1}^*, W_{p2}^*, W_{m1}^*, W_{m2}^*$ 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	4.55	3803.5	5.364	4.77	12548	5.555	6628.6	2.902	5.25	-1560.4	-12.21	5.50	-8075.4	-3.422
K''_y	4.55	4405.9	3.750	4.77	13043	5.124	7686.5	2.962	5.25	-2696.4	-3.238	5.50	-8628.2	-3.192
K'	4.55	3795.5	5.931	4.77	12548	5.555	6628.6	2.902	5.25	-2708.0	-3.697	5.50	-8628.2	-3.192
K''	4.55	3803.5	5.364	4.77	12535	5.413	7052.7	3.017	5.25	-2696.4	-3.238	5.50	-8628.1	-3.165
Π'	9.04	3937.8	4.188	9.50	12877	3.215	6884.0	1.709	10.44	-2517.9	-2.283	10.96	-8184.0	-1.727
Π''	9.04	4145.6	2.199	9.50	13228	2.624	8675.8	1.710	10.44	-2278.7	-1.043	10.96	-7804.7	-1.334
Л	4.52	3802.7	5.400	4.75	12551	5.579	7061.3	3.104	5.22	-2697.2	-3.258	5.48	-8628.7	-3.204

Рассчитав из зависимостей в [13] для текущих значений скорости $v(t)$ их вторые производные $v''(t)$ по времени, определим их максимальные (по модулю) значения применительно к исследуемым траекториям скорости трамвая, 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, $B \cdot (\xi^* \sqrt{K})^2$ – при разгоне и торможении для квазиоптимального вида траектории скорости [14]. Выявлено, что вычисленные максимальные абсолютные значения вторых производных скорости для параболической (вогнутой и выпуклой формы) и квазиоптимальной (вогнутой и выпуклой формы) при разгоне и торможении (с временами, равными и превышающими значения t_{p1}^*, t_{p2}^* и t_{m1}^*, t_{m2}^* из табл.3) составляют менее 0.5 м/с³ (при этом аналогично требованию к электротранспорту из [14] максимальные значения второй производной скорости для трамвая не должны превышать 2 м/с³).

На *шестом этапе* применительно к стандартному европейскому циклу городского и пригородного движения NEDC [8] (характеризуемому максимальными скоростями $v_M = 50$ км/ч движения при временах разгона t_p и торможения t_m , равных 26с) выполнены, исходя из зависимостей (1) – (4), (6), (8), (9) и (12), расчеты: механических (скорости ω ротора тягового ЧРАД и скорости v трамвая, угла α положе-

ния ротора тягового двигателя и пройденного расстояния $s = \alpha / z_p \cdot \varepsilon$ трамваем, где $z_p = 2$ – число пар полюсов тягового ЧРАД), электромеханических (электромагнитного момента M тягового двигателя, его модуля Ψ_r обобщенного вектора потокосцепления ротора и модуля i_l обобщенного вектора статорного тока) и энергетических (суммарной потребляемой мощности P_Σ всеми тяговыми ЧРАД и энергии $W_{кэс}$ трамваем из КЭС; напряжения $u_{ск}$, тока $i_{ск}$ и изменения энергии $\Delta W_{ск}$ для суперконденсатора) переходных процессов разгона и торможения трамвая с суперконденсаторным накопителем генерируемой энергии, графические зависимости которых приведены на рис. 7.

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.4.

Таблица 4

Базисные значения величин для тягового двигателя

Величина	I_l	M, M_c	Ψ	ω_l	ω	$P, \Delta P$	ΔW	R_s, R_r	L	J	t
Размерность	А	Нм	Вб	рад/с	рад/с	кВт	Дж	Ом	мГн	кг·м ²	с
Значение	126	443	1,17	100π	50π	69,52	221,3	2,913	9,27	0,00897	$0.01/\pi$

На этом же этапе определим при цикле движения NEDC суммарное электропотребление W_Σ трамваем (со схемой электропитания на рис. 1), затрачиваемое на его движение между соседними остановками (находящимися друг от друга, например, на расстоянии, равном $L_0 = 470$ м).

Данное суммарное электропотребление W_Σ трамвая находится с учетом (1) – (3), (8), (9) и (12) из приведенных в [4, 7] зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} W_\Sigma &= W_{кэс} + W_{усть}, \quad W_{усть} = P_{\Sigma.усть} \cdot t_{усть}, \quad t_{усть} = \frac{[L_0 - (s_p + s_m)]}{v_{усть}}, \quad \chi_o = \frac{2}{k_r \cdot L_m} (X \cdot Y)^{0.5}, \\ P_{\Sigma.усть} &= n \cdot (M_{с.дв} \cdot \omega_{усть} + \Delta P_{дв} + \Delta P_{мод}) / \eta_{сн} + P_{сн}, \quad \Delta P_{дв} = \Delta P_{эм} + d \cdot \omega_{усть}^2, \quad \Delta P_{эм} = |M_{с.дв}| \cdot \chi_o, \\ \omega_l &= \frac{1}{2\tau} (1 - \sqrt{1 - 4 \cdot \tau \cdot \omega_{усть}}), \quad \tau = R_r M_c / \Psi_{rn}^2, \quad X = R_s + 0.005 \cdot \frac{P_{дв.н}}{\eta_n} + k_r^2 \left(R_r + \frac{\Delta P_{ст.н} L_{\sigma}^2 \omega_l^2}{\Psi_{тн}^2} \right), \\ Y &= R_s + 0.005 \cdot P_{дв.н} / \eta_n + \Delta P_{ст.н} L_{\sigma}^2 \omega_l^2 / \Psi_{тн}^2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где W_p и W_m – электропотребление трамвая в режимах разгона и торможения; $P_{\Sigma.усть}$ и $W_{усть}$ – суммарное потребление соответственно мощности и энергии в установившемся режиме работы трамвая; R_s и R_r – активные сопротивления фазных соответственно статорной и роторной обмоток тягового ЧРАД; $\omega_{усть}$ и ω_l – соответственно установившееся значение скорости и соответствующее ему значение угловой частоты статора тягового двигателя; L_m и L_{σ} – индуктивности соответственно намагничивания и рассеяния ротора тягового ЧРАД; k_r – коэффициент связи ротора двигателя; $\Delta P_{эм}$ и $\Delta P_{ст.н}$ – соответственно текущее значение магнитных потерь мощности и номинальные потери мощности в стали тягового ЧРАД; $v_{усть}$ и $t_{усть}$ – соответственно значения установившейся скорости трамвая и длительности времени режима работы с установившейся скоростью; $P_{дв.н}$ и η_n – номинальные значения соответственно мощности и КПД тягового ЧРАД; $\eta_{сн} = \eta_{дс1} \cdot \eta_u$ – КПД силового преобразователя; τ , X , Y – расчетные коэффициенты. Результаты расчетов представлены в табл.5.

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

$$w = W_\Sigma \cdot W_0 / (3600 \cdot m \cdot L_0) \quad \text{Втч/т·км}, \quad (17)$$

где $m = 26.8$ т и $L_0 = 0.47$ км – соответственно масса полного трамвая и расстояние между соседними остановками; W_Σ – суммарное потребление энергии между соседними остановками (удаленными друг от друга на указанное расстояние). Результаты выполненных расчетов приведены в табл.5.

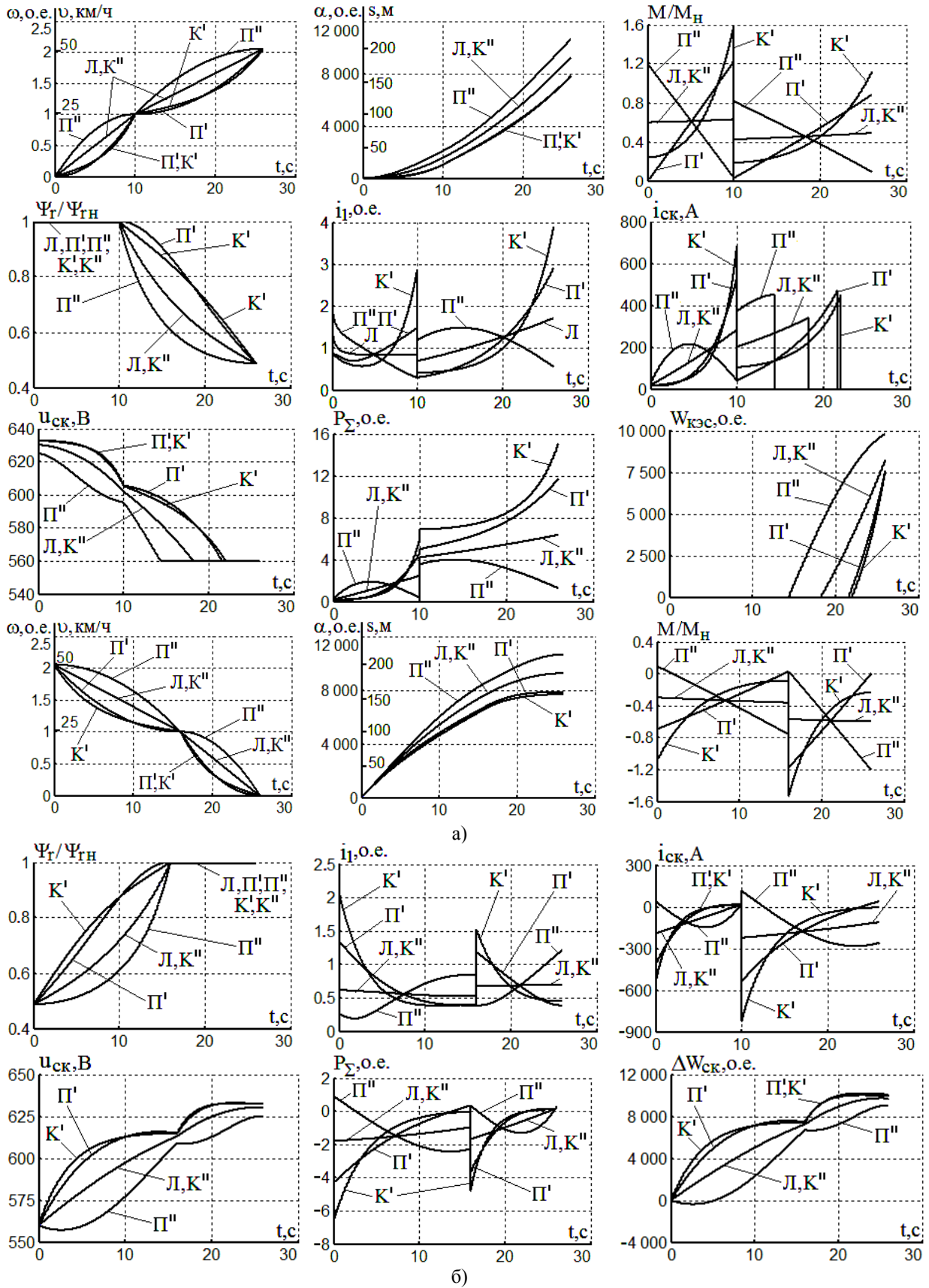


Рис. 7 Электромеханические и энергетические процессы для разгона (а) и торможения (б) трамвая при цикле движения NEDC для параболических вогнутой (Π') и выпуклой (Π''), квазиоптимальной вогнутой ($К'$), квазиоптимальной выпуклой ($К''$) и линейной ($Л$) тахограмм

Результаты расчета удельного расхода w энергии и суммарного электропотребления W_{Σ} трамвая за время движения (с циклом NEDC) между остановками ($L_o = 470$ м, $v_m = 50$ км/ч) для разных видов ($K'_y, K''_y, K', K'', \Pi', \Pi'', \text{Л}$) его тахограмм с временами разгона и торможения:

$$t_{p1} = t_{m1} = 10 \text{ с и } t_{p2} = t_{m2} = 16 \text{ с}$$

Вид	$\eta_{ск.р}$	$\eta_{ск.т}$	$u_{ск.м}$	$t_{уст}$	s_p	s_m	$s_{уст}$	W_p	W_m	$W_{кэс}$	$P_{кэс}$	W_{ζ}	$W_{уст}$	W_{Σ}	w
Г	%	%	В	с	м	м	м	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	Вт·ч/т·км
K'_y	99.5	95.3	625.6	10.3	199.1	128.3	142.6	17807	-8746	7797	1.017	-9759	3211	11008	53.72
K''_y	98.4	99.3	630.2	0.47	264.5	199.1	6.46	20204	-9763	9938	1.055	-9785	147	10085	49.22
K'	99.4	98.4	632.7	9.76	169.0	165.4	135.6	17522	-10083	7567	1.115	-10163	3043	10610	51.78
K''	99.5	99.3	630.2	5.17	199.1	199.1	71.8	17807	-9763	8234	1.074	-9785	1612	9846	48.05
Π'	99.4	98.8	632.9	9.53	168.8	168.8	132.4	17505	-10202	7521	1.109	-10309	2971	10492	51.20
Π''	99.4	100	624.9	0.81	229.4	229.4	11.2	18571	-9385	9808	1.148	-9447	253	10061	49.10
Л	99.5	99.3	630.2	5.17	199.1	199.1	71.8	17807	-9763	8234	1.074	-9785	1612	9846	48.05

На седьмом этапе оценим запас хода трамвая на горизонтальном участке дороги при исчезновении напряжения в контактной сети ($u_{кэс} = 0$) и питании инвертора АИН-ШИМ (при закрытых транзисторах в преобразователе напряжения «dc/dc1» [11, 12] в схеме на рис. 1) от первоначально заряженного (до его заданного напряжения $U_{ск}^* = 560$ В) суперконденсатора СК. 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 $U_{ск}^* = 560$ В до $U_{ск.min} = 0.7U_{ск}^* = 392$ В); и, 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 17.1 км/ч для трамвая [4]) и соответствует значению $\omega = 0.7\omega_{In} = 0.7$ 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 Ψ_{rn} потокосцепления ротора [4, 7]).

Вычислим начальное значение энергии заряженного суперконденсатора:

$$W_{ск}^* = 0.5C_{ск} \cdot (U_{ск}^*)^2 / 3600 = 1.516 \text{ кВтч}, \quad (18)$$

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

$$\Delta W_{ск} = \frac{0.5C_{ск}}{3600} \left[(U_{ск}^*)^2 - U_{ск.min}^2 \right] = 0.773 \text{ кВтч}, \quad (19)$$

где 3600 – переводной коэффициент из кДж в кВтч.

Исходя из энергетического баланса, составленного применительно к движению трамвая на упомянутой пониженной скорости $v_m = 0.7v_n$ после исчезновения напряжения КЭС (на протяжении длительности времени, пока напряжение на суперконденсаторе не уменьшится до значения $0.7U_{ск}^*$):

$$\Delta W_{ск} = w \cdot m \cdot s, \quad (20)$$

определим запас хода (пробег) трамвая при этом движении из зависимости:

$$s \approx \Delta W_{ск} / w \cdot m, \quad (21)$$

где $\Delta W_{ск}$ – вычисленное из (18) значение отдаваемой энергии СК в этом режиме; w – здесь удельный расход энергии трамвая, соответствующий его разгону до пониженной скорости $v_m = 0.7v_n = 17.1$ км/ч, установившемуся движению на этой скорости и последующему торможению до остановленного состояния (при преодолении того же расстояния между соседними остановками, равного 470 м). Применительно к полной массе $m = 26.8$ т трамвая и для пуско-тормозных режимов с линейной формой тахограмм

рассчитанный из (17) удельный расход w энергии трамваем при движении с упомянутой пониженной скоростью составляет 28.72 Вт·ч/т·км, а вычисленный из (21) запас хода s примерно равен 1000 м.

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

- от нуля до заданного значения $U_{СК}^* = 560$ В:
$$\tau_{31} = \frac{C_{СК} U_{СК}^*}{I_{СК}} = \frac{34.8 \cdot 560}{100} = 195 \text{ (с)} ;$$

- от напряжения $U_{СК.min} = 392$ В до напряжения $U_{СК}^* = 560$ В:

$$\tau_{32} = \frac{C_{СК} (U_{СК}^* - U_{СК.min})}{I_{СК}} = \frac{34.8 \cdot (560 - 392)}{100} = 58.5 \text{ (с)}.$$

Аналогично из последних двух соотношений получим, что при увеличении зарядного тока $I_{СК}$ до 250 А времена заряда τ_{31} и τ_{32} сокращаются в 2.5 раза и становятся равными соответственно 78 с и 23 с.

Также оценим в ночное (нерабочее) время (когда трамвай отключен от КЭС и выключены все его электропотребители) происходящее уменьшение напряжения $u_{СК}$ на суперконденсаторе, вызванное его разрядом от протекания в нем тока утечки [9]. Задаввшись длительностью ночного (нерабочего для трамвая) интервала времени, равным $\tau_{нр} = 6$ ч, вычислим из соотношений [14]:

$$U_{СК.min} \approx U_{СК}^* \cdot e^{-\tau_{нр} / T_{СК}} \quad \text{и} \quad T_{СК} = r_{ум} C_{СК} \quad (22)$$

значение напряжения $U_{СК.min}$ для этого разряженного (после ночи) суперконденсатора: $U_{СК.min} = 313$ В, где $T_{СК} = 10.3$ ч – электромагнитная постоянная времени разряда суперконденсатора. Далее из формулы (19) рассчитаем соответствующие данному разряду ежесуточные потери энергии $\Delta W_{СК} = 1.042$ 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 для каждого трамвая.

Из публикации [5] 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 $\delta = 23\%$ от общей потребляемой энергии. С учетом этого рассчитаем годовой размер ожидаемой экономии электроэнергии, приходящейся на один трамвай и достигаемой за счет применения суперконденсаторного накопителя энергии:

$$\mathcal{E}_2 = \Delta W \cdot 15 \cdot 18 \cdot 365 \cdot W_{\delta} / 3600 = 17750 \text{ кВтч}, \quad \Delta W \approx W_{кэс} [1 / (1 - \delta) - 1] = 9807.5 \cdot 0.2987 = 2930 \text{ о.е.},$$

где ΔW – экономия энергии при одном пуско-тормозном режиме трамвая (на примере параболической тахограммы вида П" согласно табл.5, для которой $W_{кэс} = 9808$ о.е.); 15 – среднее количество этих режимов в час; 18 – количество рабочих часов для трамвая в сутки; 365 – число рабочих дней в году; W_{δ} – базисное значение энергии из табл.4; 3600 – переводной коэффициент энергии из кДж в кВт·ч.

ВЫВОДЫ

1. По результатам проведенной в пуско-тормозных режимах оптимизации электропотребления трамвая, снабженного тяговым ЧРАД и суперконденсаторным накопителем энергии, установлено, что в первой и второй зонах регулирования скорости наименьшее (согласно рис. 5, табл.3 и табл.5) потребление энергии из контактной электрической сети достигается при использовании квазиоптимальной K' тахограммы вогнутой формы, а наименьшее удельное потребление энергии – при применении квазиоптимальной K'_y вогнутой формы и параболической P' вогнутой формы тахограмм. Квазиоптимальные тахограммы рассчитываются аналогично [13] в виде временных функций гиперболического синуса (содержащих в аргументе поправочный коэффициент ξ^* , значения которого согласно рис. 6 зависят от длительностей времен разгона и торможения трамвая).

2. Выявлен «U»-образный вид зависимостей (показанных на рис. 4 и рис. 5) потребления W_{p1} , W_{p2} , $W_{кэс}$ и генерации W_{m1} , W_{m2} энергии трамваем от длительности времен 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 длительностей времен 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 трамвая по допустимым значениям его ускорения и замедления, указанные оптимальные времена на практике оказываются нереализуемыми.

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

5. Полученные аналитические зависимости (6) – (12), (16) позволяют рассчитать для пуско-тормозных и установившихся режимов трамвая потребление, генерацию и потери электроэнергии в схеме электропитания на рис. 1, снабженной суперконденсаторным накопителем энергии.

6. Проведенные исследования переходных и установившихся режимов работы трамвая с суперконденсаторным накопителем энергии подтверждают возможность их практической реализации (поскольку согласно рис. 7 все электромеханические и энергетические параметры трамвая, тягового двигателя и суперконденсатора находятся в пределах для них допустимых значений), а также свидетельствуют (из табл. 5) о значениях КПД суперконденсатора, равных (98.4 – 99.5) %, и удельном расходе энергии трамваем, равном (48 – 54) Вт·ч/т·км для исследуемых траекторий скорости.

7. Из результатов исследования суммарного электропотребления W_{Σ} трамваем для европейского цикла движения NEDC следует, что согласно табл.5 переход в пуско-тормозных режимах от параболического вида выпуклой и вогнутой формы траекторий к линейной форме траектории скорости позволяет уменьшить удельный расход энергии трамвая на (2 – 6) %.

8. Согласно рис. 4, рис. 5 и табл.5 переход от длительностей времен разгона и торможения, соответствующих циклу NEDC, к минимально возможным (исходя из допустимых максимальных ускорений и замедлений трамвая) их значениям из табл.3, позволяет для параболической выпуклой формы траектории скорости уменьшить на 11.5 % электропотребление трамвая в пуско-тормозных режимах.

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

Список литературы

1. Интернет портал «ГЭТ Электротранспорт Санкт-Петербурга», https://www.electrotrans.spb.ru/podvizhnoy_sostav (07.03.2019)
2. Сайт «Харьков транспортный» http://gortransport.kharkov.ua/ps_models/50/ (23.10.2018)
3. Edstrand J. Calculation method for powering a tramway network / J. Edstrand. – Goteborg, Sweden, 2012. – 101 p.
4. Волков В.А. Энергосберегающее управление тяговыми частотно-регулируемыми асинхронными двигателями трамвая / В.А. Волков // Гірнична електромеханіка та автоматика. – Днепр: НТУ «Дніпровська політехніка». – 2018. – №100. – С. 52 – 69.
5. Xiao Zh. Integrated Optimization of Speed Profiles and Power Split for a Tram with Hybrid Energy Storage Systems on a Signalized Route / Zh. Xiao, P. Sun, Q. Wang, Y. Zhu, X. Feng. – Chengdu, China, 2018. – PP. 1– 21.
6. Fernandez L.M. Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single dc/dc converter for a tramway / L.M. Fernandez, P. Garcia, C.A. Garcia, F. Jurado. – Spain, 2011. – 2183 – 2191.
7. Пивняк Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г.Г. Пивняк, А.В. Волков. – Днепропетровск: НГУ, 2006. – 470с.
8. Интернет портал «ЭкоТехника», <https://ecotechnica.com.ua/stati/1854-zapas-khoda-elektromobilya-ezdovye-tsikly-nedc-epa-wltc-i-jc08-kakoj-pravilnee.html> (07.03.2019)
9. Интернет портал «Maxwell», http://www.maxwell.com/images/documents/160VModule_DS_3000246_6.pdf (07.03.2019)

10. Singh Th. P. Comparative Performance Investigation of Battery and Ultracapacitor for Electric Vehicle Applications / Th. P. Singh, S.Y. Kumar // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, no. 20, pp. 10197 – 10204.
11. Gopikrishnan M. Battery/ultra Capacitor Hybrid Energy Storage System for Electric, Hybrid and Plug-in Hybrid Electric Vehicles / M. Gopikrishnan // Middle-East Journal of Scientific Research.–2014.–pp.1122 –1126.
12. Michalczuk M. A lithium battery and ultracapacitor hybrid energy source for an urban electric vehicle / M. Michalczuk, L. M. Grzesiak, B. Ufnalski // Przegląd Elektrotechniczny. – 2012. – pp. 158 – 162.
13. Волков В.А. Энергосберегающее управление тяговым частотно-регулируемым асинхронным двигателем троллейбуса / В.А. Волков // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук. – 2018. – № 4 (44). – С. 38 – 52. DOI: [10.30929/2072-2052.2018.4.44.38-52](https://doi.org/10.30929/2072-2052.2018.4.44.38-52)
14. Волков В.А. Оптимизация электропотребления троллейбуса с тяговым частотно-регулируемым асинхронным двигателем и суперконденсаторным накопителем генерируемой энергии / В.А. Волков // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2019. – Вип. 1(45) – С. 8 – 24.
15. Thakur A. A Voltage and State of Charge Control Technique for Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Standalone Photovoltaic Application/ A. Thakur, L. M. Saini // IEEE. – 2015.–pp. 1–6.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.