

При сравнении значений количества электроэнергии, потребленной при классическом двухпозиционном управлении и двухпозиционном с оптимальным верхним уровнем давления и ограничениями по количеству пусков видно, что при малых расходах сжатого воздуха в силу вступает ограничение, а при больших – увеличивается экономия электроэнергии. Объясняется это тем, что время цикла увеличения – снижения давления переменное. Чем выше расход сжатого воздуха, тем больше время цикла и меньше количество пусков приводного двигателя в час. Соответственно, справедливо и обратное утверждение. Следует отметить, что система управления электропотреблением при использовании оптимального верхнего уровня давления выходит за границы установленных ограничений (по количеству пусков). Она определяет такое значение верхнего предела давления, при котором наиболее полно используется допустимое количество пусков поршневой компрессорной установки в час.

В результате реализации разработанной математической модели получены оптимальные значения максимального верхнего уровня давления в пневмосистеме P_{maxopt} , соответствующего максимуму целевой функции (КПД), при различных фиксированных расходах сжатого воздуха пневмоприемниками $Q_{\text{потр}}$ в установленных ограничениях.

Для адекватной оценки полученных результатов моделирования необходимо произвести расчеты параметров электромеханической системы для различных типов воздушных поршневых компрессорных установок с асинхронным приводом с различной производительностью, рассчитанными на уровень давления в пневмосистеме до 8 атм.

Выводы. Предлагаемый вариант регулирования с «плавающим» верхним уровнем давления обеспечивает сокращение расхода электрической энергии, потребляемой рассматриваемой электромеханической системой. В сопоставлении с классическим двухпозиционным регулированием, экономия достигается в пределах 1...13 % в зависимости от значений расхода сжатого воздуха, потребляемого пневмоприемниками. Предложенный метод управления электропотреблением, заключающийся в непрерывном измерении расхода сжатого воздуха, потребляемого пневмоприемниками, на участке накачки давления в каждом цикле управления и установлении расчетного оптимального значения максимального уровня давления в пневмосистеме, соответствующего максимальному КПД комплекса, реализует оптимальные параметры режима работы электромеханической системы.

Перечень ссылок

1. Бобров А.В. Повышение энергоэффективности поршневых компрессоров. Технічна електродинаміка.-№3.-2004.-с.70-71.
2. Бобров О.В. Управление электроприводом компрессорной установки на основе определения КПД электротехнического комплекса / О.В. Бобров // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Наук.-виробн. журнал. –Кременчук: КНУ, 2011.-Вип. 4. (16). – С. 124.
3. Бобров А.В., Безкровный В.О. Допущения и ограничения в расчете КПД электромеханической системы «электрическая сеть – привод – компрессор – пневмосеть» / Бобров А.В., Безкровный В.О. // Молодь: наука та інновації 2016: 4-та Всеукраїнська науково-практична конференція. (6-7 грудня 2016 р., Дніпро): тез. Доп. / М-во освіти і науки України ; Нац. Гірн. Ун-т.; ПНЦ НАН України – Д., 2016. – С.11-8 – 11-10.
4. Бобров О.В. Результати досліджень енергоефективного режиму роботи електромеханічної системи виробництва та розподілу стислого повітря / О.В. Бобров, С.І. Випанасенко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 2. (26). – С. 85 – 90.

Рекомендовано к печати: к-том техн. наук, доц. Цыленковым Д.В.

УДК 62-83

В.А. Волков, канд. техн. наук

(Украина, Днепр, Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет")

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЯГОВЫМИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМИ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ТРАМВАЯ

Анотація. Розроблено та досліджено енергозберігаюче керування тяговими частотно-регульованими асинхронними двигунами трамвая, яке забезпечує мінімізацію загальних втрат енергії в цих двигунах при пуско-гальмівних режимах і найменше енергоспоживання трамвая в сталих режимах роботи. Отримано розрахункові аналітичні залежності для коефіцієнта корисної дії рушійного механі-

зму і статичного моменту опору тягового приводу трамвая, для загальних основних втрат енергії тягових двигунів і загального енергоспоживання трамвая. Дослідженні електромеханічні і енергетичні процеси в тягових частотно-регульованих асинхронних двигунах трамвая при сталих і пуско-гальмівних режимах.

Ключові слова: тяговий асинхронний двигун, частотне регулювання, енергозберігаюче керування, трамвай.

Аннотація. Розроблено і досліджено енергозберігаюче управління тяговими частотно-регульованими асинхронними двигателями трамвая, которое обеспечивает минимизацию общих потерь энергии в этих двигателях при пуско-тормозных режимах и наименьшее электропотребление трамвая в установившихся режимах работы. Получены расчетные аналитические зависимости для коэффициента полезного действия движущего механизма и статического момента сопротивления тягового привода трамвая, для общих основных потерь энергии тяговых двигателей и общего энергопотребления трамвая. Исследованы электромеханические и энергетические процессы в тяговых частотно-регулируемых асинхронных двигателях трамвая при установившихся и пуско-тормозных режимах.

Ключевые слова: тяговый асинхронный двигатель, частотное регулирование, энергозберігаюче управління, трамвай.

Abstract. The energy-saving control of traction frequency-regulated asynchronous engines for a tram has been developed and investigated, which minimizes the total energy losses in these engines during start-stop regimes and the lowest power consumption of the tram in steady-state operating regimes. The calculated analytical dependences are obtained for the efficiency of the driving mechanism and the static moment of resistance of the tram drive, for the main energy losses of the traction engines and the total energy consumption of the tram. The electromechanical and energy processes in the traction frequency-regulated asynchronous engines for a tram under steady-state and start-braking regimes are investigated.

Keywords: traction asynchronous engine, frequency regulation, energy-saving control, tram

Введение. Развитие в мире городского электротранспорта с начала 2000-ых годов характеризуется широким внедрением в нем в качестве тяговых двигателей частотно-регулируемого асинхронного двигателя (ЧРАД) с короткозамкнутым ротором, благодаря чему у этого привода существенно увеличиваются эксплуатационная надежность, межремонтные сроки эксплуатации и общие сроки службы (по сравнению с ранее используемыми в нем тяговыми двигателями постоянного тока). При этом до настоящего времени, по-прежнему, одним из наиболее распространенных и востребованных видов электротранспорта остается трамвай, производство которого на основе тяговых ЧРАД освоено в Германии (фирмами «Siemens», «Gothoer Waggonfabrik») [1], Италии («AnsaldoBreda», «Nubera») [2], России («Петербургский трамвайно-механический завод», «Усть-Катавский вагоностроительный завод», «Транспортные системы», «Уралтрансмаш») [3] и других странах. В связи с упомянутым широким применением трамваев с тяговыми ЧРАД становится актуальным и востребованным практикой для этих двигателей уменьшение потерь мощности и потребления ими энергии в установившихся и пуско-тормозных режимах, а для этого – разработка и исследование в данных режимах энергозберігаючого управління тяговими ЧРАД, направленного на уменьшение непроизводительных потерь энергии в трамвае.

Из анализа существующей зарубежной и отечественной научно-технической литературы выявлено, что исследованию отмеченных выше вопросов посвящены, к сожалению, только малочисленные публикации. В частности, в работе [2] рассмотрены вопросы расчета сил сопротивления движению трамвая, разработки компьютерной имитационной модели для оценки потребляемых его тяговими ЧРАД мощности и энергии от электрической подстанции в установившихся и пуско-тормозных режимах при заданных траекториях изменения скорости трамвая (но – без исследования влияния вида этих траекторий на потери мощности и энергии тяговых ЧРАД). Другие известные публикации [4, 5] посвящены исследованию энергоэффективности гибридного тягового частотно-регулируемого асинхронного привода трамвая (характеризующегося возможностью питания инвертора из контактной электрической сети либо от дополнительно установленных для этой цели аккумуляторной батареи или суперконденсаторов) и совершенствованию управления этим гибридным приводом при рекуперативном торможении. Причем указанное совершенствование управления заключается в формировании такого вида энергозберігаючих траекторий скорости трамвая (и его тяговых двигателей), при которых рекуперированная энергия при торможении накапливается в аккумуляторной батарее или суперконденсаторах данного трамвая, а дальнейшее потребление энергии в режимах тяги трамвая происходит сначала от упомянутых аккумуляторной батареи или суперконденсаторов, а только затем – из контактной электрической сети (чем обеспечивается общее снижение потребления энергии тяговими двигателями из контактной электрической сети и уменьшение потерь энергии в последней).

Таким образом, в известной научно-технической литературе ныне существует недостаток исследованных энергосберегающего управления тяговыми ЧРАД для обычного (негибридного) трамвая, а также электромеханических и энергетических процессов указанных тяговых приводов, работающих в частых режимах разгона и торможения трамвая. Актуальность же самой задачи энергосбережения обусловлена наблюдающимся в настоящее время удорожанием в мире и Украине электрической энергии. Кроме этого, применительно для Украины (обладающей с советских времен большим парком чешских трамваев марки «Tatra-T6B5» [6] с тяговыми двигателями постоянного тока) очень актуальна, практически востребована и особенно важна задача проведения для этих трамваев модернизации, связанной с заменой тяговых двигателей постоянного тока на ЧРАД. Это позволяет: во-первых, повысить энергоэффективность функционирования, эксплуатационную надежность и продлить сроки службы этих трамваев (в Киеве, Днепре, Харькове, Одессе, Львове, Запорожье и других больших городах Украины) при значительном сокращении средств на указанную модернизацию (вследствие сохранения кузова и основной части вспомогательного оборудования у этих трамваев). Во-вторых, – позволит загрузить работой украинские электротехнические предприятия и обеспечить заработной платой их инженерно-технический персонал.

Цель работы. Целью предложенной статьи является разработка энергосберегающего управления тяговыми частотно-регулируемыми асинхронными двигателями трамвая в установившихся и пуско-тормозных режимах, исследование для них электромеханических и энергетических процессов.

Исходные допущения:

- принято идеализированное представление короткозамкнутого трехфазного ЧРАД, дополненное учетом потерь мощности в стали этого двигателя [7];
- полагается применение векторного типа системы автоматического управления (САУ) электроприводом, в которой обеспечивается раздельное регулирование намагничивающей I_{Ix} и активной I_{Iy} проекций обобщенного вектора статорного тока \bar{I}_I (образованного основными гармоническими составляющими фазных статорных токов) двигателя на оси вращающейся ортогональной координатной системы «х-у», связанной вещественной осью «х» с обобщенным вектором потокосцепления ротора $\bar{\Psi}_r$ ЧРАД;
- пренебрегаем свободными (затухающими) составляющими статорных токов в режимах разгона и торможения (что является на практике возможным с учетом упомянутого использования векторных САУ из-за их высокого быстродействия и точности) [7];
- объектом исследования являются энергетические и электромеханические процессы для тягового ЧРАД одновагонного трамвая (содержащего четыре идентичных тяговых двигателя) с предложенным энергосберегающим управлением при режимах разгона и электрического торможения (с рекуперацией энергии в контактную электрическую сеть) или равномерного движения (с характеристиками макета трамвая из табл.1) [6];
- распределение суммарных значений статического момента сопротивления и тягового момента привода между четырьмя тяговыми двигателями трамвая полагается равномерным;
- принималось отсутствие проскальзывания между движущимися колесами трамвая и рельсами;
- параметры ЧРАД (у которого активные сопротивления были приведены к температуре 115 °С) полагались неизменными (представлены в табл.1);
- рассматривались только основные составляющие общих потерь мощности и энергии ЧРАД, вызванные основными (первыми) гармоническими составляющими фазных статорных токов [7];
- математические зависимости и последующие расчеты выполнены в общепринятой для машин переменного тока относительной системе единиц [7] (в которой номинальные значения частоты статора ω_{Ih} и синхронной скорости ротора ω_n , как известно, одинаковы между собой и равны 1 о.е., а наибольшее значение ω_m скорости для рассматриваемого ЧРАД, согласно табл.1, равно $4000/1500 = 2,667$ о.е.);
- в тяговом электроприводе при режимах разгона и торможения посредством САУ реализовывались две зоны регулирования: в первой зоне (при $0 \leq \omega \leq \omega_n$) – при постоянстве модуля потокосцепления ротора Ψ_r , равном его номинальному значению Ψ_{rn} , а во второй (при $\omega_n \leq \omega \leq \omega_m$) – при постоянстве соотношения: $\omega_I \cdot \Psi_r = \omega_{Ih} \cdot \Psi_{rn} = const$ [7] (что обеспечивает наибольшую достигаемую перегрузочную способность двигателя по электромагнитному моменту в этих режимах).

Таблица 1

Номинальные параметры двигателя и макета трамвая

Название параметра, единицы измерения	Значение
1	2
I Двигатель АТМ 225 М4У2	

1	2
- 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»)	
- масса порожнего вагона, т	18,4
- номинальная вместимость вагона, чел.	120
- максимальная скорость трамвая, км/ч	65
- максимальное ускорение порожнего вагона при разгоне и торможении, м/с ²	1,8
- среднее замедление пустого вагона при аварийном торможении, м/с ²	2,3
- 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
- преодолеваемый уклон подъема при максимальной нагрузке, %	8
- площадь фронтальной проекции, м ²	7,3
- коэффициент аэродинамического сопротивления	0,70
- КПД силового преобразователя, %	95
- максимальная мощность потребления собственных нужд по время движения, кВт	1

На **первом этапе** определим силы сопротивления движению трамвая, а также приведенные к валу двигателя статический момент сопротивления и момент инерции тягового привода трамвая.

Результирующая сила F_c сопротивления движению трамвая равняется сумме сил от действия трения качения F_k , аэродинамического сопротивления F_a и действия уклона F_y рельсового пути [8, 9, 10]:

$$\left. \begin{aligned} F_c = F_k + F_a + F_y = mg \left(\mu \sqrt{1 - i^2} + i \right) + 0.5 C_a \rho_e S_{\phi} v^2, \quad i = \sin \alpha, \\ F_k = \mu \cdot mg, \quad F_a = 0.5 C_a \rho_e S_{\phi} v^2, \quad F_y = mg \cdot i, \quad \mu = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где m [кг] – масса трамвая; i и α – соответственно крутизна уклона и угол уклона рельсового пути; v [м/с] – скорость трамвая; $\mu = 1.03 \cdot 10^{-3}$ – общий удельный коэффициент трения (где $\mu_1 = 0.45 \cdot 10^{-3}$ – удельное сопротивление от трения качения колесной пары по рельсу; $\mu_2 = 0.1 \cdot 10^{-3}$ – удельное сопротивление от трения скольжения колесной пары по рельсу; $\mu_3 = 0.15 \cdot 10^{-3}$ – удельное сопротивление, учитывающее влияние вагона; $\mu_4 = 0.33 \cdot 10^{-3}$ – удельное сопротивление от ударов колесной пары на стыках рельсов); $C_a = 0.70$ – коэффициент аэродинамического сопротивления; $\rho_e = 1.226$ кг/м³ – плотность воздуха (при температуре 15 °С); $S_{\phi} = 7.3$ м² – площадь фронтальной проекции трамвая; $g = 9.81$ м/с² – ускорение свободного падения; силы F_c , F_k , F_a и F_y – вычисляются в ньютонах [Н].

Баланс между суммарной полезной мощностью $P_{\text{пов}\Sigma}$ [Вт] = $n \cdot P_{\text{пов}} = M_c \cdot \omega$, развиваемой всеми идентичными между собой тяговыми двигателями трамвая, и механической мощностью P_m [Вт] = $F_c \cdot v$, создаваемой движущимися с равномерной скоростью v [м/с] трамваем, характеризуется для двигательного и генераторного режимов работы его тяговых двигателей соотношениями соответственно:

$$P_m = \eta_{\text{мд}} \cdot P_{\text{пов}\Sigma} \quad \text{или} \quad P_{\text{пов}\Sigma} = P_m \cdot \eta_{\text{мг}}, \quad (2)$$

где $\eta_{мд}$ и $\eta_{мг}$ – значения коэффициента полезного действия (КПД) движущего механизма трамвая соответственно в двигательном и генераторном (тормозном) режимах; M_c [Нм] – суммарный приведенный к валу тягового двигателя статический момент сопротивления тягового привода трамвая; ω [рад/с] – угловая частота вращения (скорость) для всех ($n=4$) тяговых двигателей (с одинаковой номинальной механической мощностью $P_{дв.н}$); $P_{дв}$ [Вт] – текущая механическая мощность на валу одного тягового ЧРАД.

Подставив значения вышеперечисленных параметров в (2), определим в относительной системе единиц (о.е.) значения суммарного приведенного к валу тягового двигателя статического момента сопротивления M_c для двигательного

$$M_c[\text{о.е.}] = \frac{P_M}{\omega \cdot \eta_{мд} \cdot M_{\delta}} = \frac{F_c \cdot v}{\omega \cdot \eta_{мд} \cdot M_{\delta}} = \frac{F_c}{\varepsilon \cdot \eta_{мд} \cdot M_{\delta}} = n \cdot M_{c.дв} \quad (3)$$

и генераторного

$$M_c[\text{о.е.}] = \frac{P_M \cdot \eta_{мг}}{\omega \cdot M_{\delta}} = \frac{F_c \cdot v \cdot \eta_{мг}}{\omega \cdot M_{\delta}} = \frac{F_c \cdot \eta_{мг}}{\varepsilon \cdot M_{\delta}} = n \cdot M_{c.дв} \quad (4)$$

режимов работы, где $M_{c.дв}$ [о.е.] – значение статического момента сопротивления, приложенного к валу каждого одного тягового двигателя; ε [рад/м] – соотношение между собой соответствующих друг другу угловой скорости ω [рад/с] ЧРАД и скорости v [м/с] поступательно движущегося трамвая:

$$\varepsilon [\text{рад/м}] = \omega / v. \quad (5)$$

Исходя из приведенных в [8] численных табличных данных об относительных значениях потерь мощности $\Delta P_M / n \cdot P_{дв.н}$ в движущем механизме трамвая в функции развиваемой при этом всеми тяговыми двигателями относительной суммарной полезной мощности $P_{дв\Sigma} / n \cdot \Delta P_{дв.н}$, найдем для двигательного режима значение КПД $\eta_{мд}$ движущего механизма в функции относительной механической мощности $P_M / n \cdot P_{дв.н}$ трамвая в виде:

$$\eta_{мд} = \frac{P_M}{P_M + \Delta P_M} = \frac{I}{I + \Delta P_M / P_M} = I - \frac{\Delta P_M}{P_{дв.\Sigma}} = I - \frac{\Delta P_M / n \cdot P_{дв.н}}{P_{дв.\Sigma} / n \cdot P_{дв.н}}, \quad \frac{\Delta P_M}{n \cdot P_{дв.н}} = \eta_{мд} \cdot \frac{P_{дв.\Sigma}}{n \cdot P_{дв.н}}. \quad (6)$$

Соответствующий табличным данным график КПД $\eta_{мд} = f(P_M / P_{дв.\Sigma})$ изображен на рис.1 жирными точками.

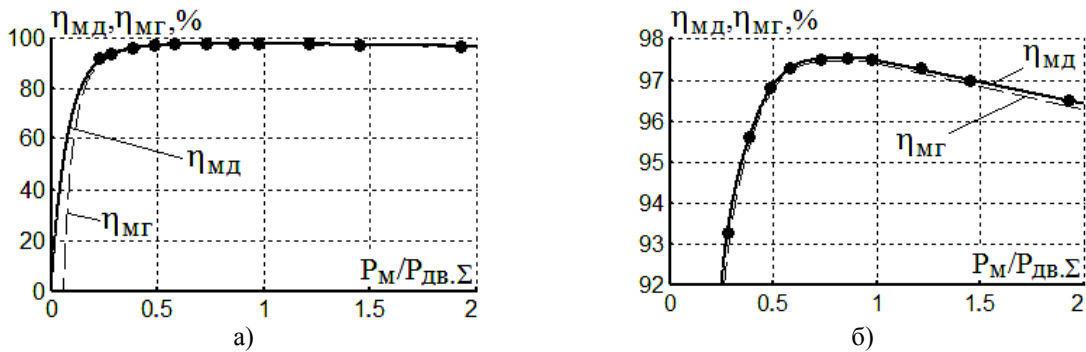


Рис. 1 Зависимости КПД движущего механизма трамвая для двигательного ($\eta_{мд}$) и генераторного ($\eta_{мг}$) режимов работы его тяговых двигателей от отношения мощностей $P_M / P_{дв.н}$ (а – полный график; б – фрагмент полного графика при $\eta_{мг} \geq 92\%$; точками показаны табличные значения КПД)

По вычисленным из (6) табличным значениям осуществлена интерполяция изменения КПД $\eta_{мд}$ движущего механизма трамвая в двигательном режиме следующими аналитическими соотношениями:

$$\eta_{м\delta} = \begin{cases} 95.81 \cdot \{1 - 0.012 \cdot \text{sh}[12.8 \cdot (0.4 - \tau)]\} & \text{при } 0 \leq \tau < 0.4; \\ 97.53 - 37.46 \cdot |0.88 - \tau|^{4.2} & \text{при } 0.4 \leq \tau \leq 1; \\ 98.53 - 1.056 \cdot \tau & \text{при } \tau > 1, \quad \text{где } \tau = P_{м}/n \cdot P_{\delta\text{в.н}}. \end{cases} \quad (7)$$

Соответствующий этой интерполяции график $\eta_{м\delta}$ показан на рис.1 сплошной линией (при этом погрешность при предложенной аналитической интерполяции не превышает $\pm 0.1\%$).

С учетом второго соотношения из (2) найдем в генераторном режиме работы значение КПД $\eta_{мг}$ движущего механизма трамвая из соотношений:

$$\eta_{мг} = P_{\delta\text{в}\Sigma} / P_{м} = (|P_{м}| - \Delta P_{м}) / |P_{м}| = 1 - \Delta P_{м} / |P_{м}|. \quad (8)$$

Определив из первого выражения в (6) соотношение:

$$\Delta P_{м} / |P_{м}| = (1 / \eta_{м\delta}) - 1 \quad (9)$$

и подставив его в последнее соотношение из (8), получим зависимость, связывающую между собой значения КПД движущего механизма трамвая в двигательном $\eta_{м\delta}$ и генераторном $\eta_{мг}$ режимах:

$$\eta_{мг} = 2 - 1 / \eta_{м\delta}, \quad 0 \leq \eta_{мг} \leq 1. \quad (10)$$

Зависимость (10) позволяет, в свою очередь, с учетом интерполяции из (7) для значения КПД $\eta_{м\delta}$ рассчитать зависимость КПД $\eta_{мг}$ движущего механизма трамвая в генераторном режиме, построенную на рис.1 и показанную пунктирной линией. При этом, согласно (8), генераторный режим работы трамвая характеризуется условиями: $F_c, P_{м} < 0$ и $|P_{м}| > \Delta P_{м}$; при невыполнении хотя бы одного из этих условий происходит двигательный режим работы трамвая (со значением КПД $\eta_{м\delta}$ движущего механизма).

Подставив из (1) в (3) и (4) окончательное выражение для силы F_c и исходя из соотношений (7) и (10) для КПД $\eta_{м}$, преобразуем выражения из (3) и (4) для приведенного значения статического момента сопротивления M_c трамвая к виду:

$$\left. \begin{aligned} M_c &= \frac{1}{\eta_{м}} \cdot (M_{co} + q \cdot \omega^2), \quad M_{co} = \frac{mg \left(\mu \sqrt{1 - i^2} + i \right)}{\varepsilon \cdot M_{\delta}}, \quad q = \frac{C_a \rho_{\phi} S_{\phi} \omega_{\delta}^2}{2 \cdot \varepsilon^3 \cdot M_{\delta}}, \\ \eta_{м} &= \begin{cases} \eta_{м\delta} & \text{для двигательного режима,} \\ (\eta_{мг})^{-1} & \text{для генераторного режима} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

в котором величины: M_c, M_{co}, q и ω представлены в принятой системе относительных единиц; ω_{δ} [рад/с] и M_{δ} [Нм] – базисные значения соответственно скорости ротора и электромагнитного момента тягового ЧРАД; величины m и ε приведены соответственно в [кг] и [рад/м].

Рассчитанные из (11) нагрузочные характеристики $M_c / n \cdot M_{\delta\text{в.н}} = f(\omega, i)$ тягового привода трамвая показаны на рис. 2. На этом же рисунке штрих-пунктиром изображены нагрузочные характеристики, соответствующие одно-, двух- и трехкратным значениям номинальной мощности тягового двигателя.

Найдем массу трамвая при номинальной вместимости в нем пассажиров (равной 120 чел.):

$$m = m_{\text{пор}} + 70 \cdot 120 = 18400 + 8400 = 26800 \text{ кг}, \quad (12)$$

которую в дальнейшем будем использовать при проводимых расчетах (где $m_{\text{пор}} = 18400$ – масса порожнего одновагонного трамвая; 70 кг – средняя масса одного человека).

Исходя из известных зависимостей для вычисления кинетической энергии W_k [Дж] трамвая предс-

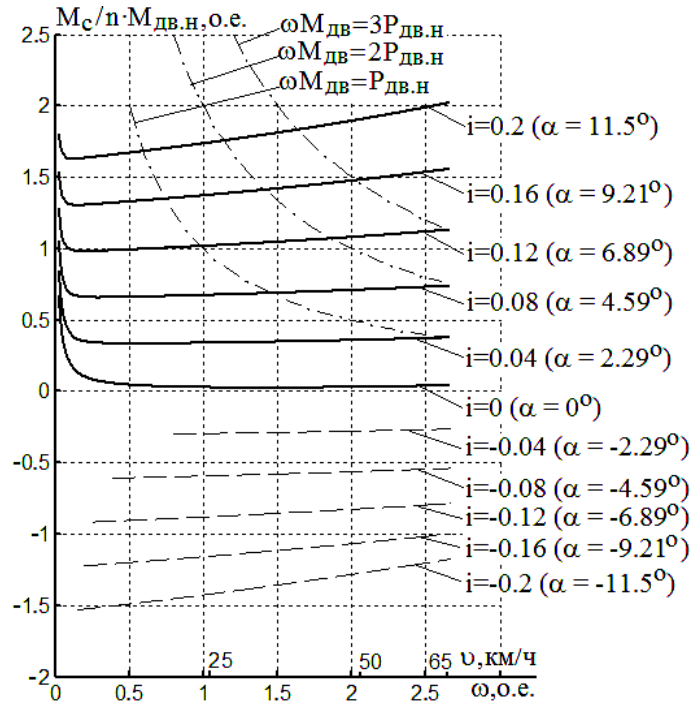


Рис.2 Нагрузочные характеристики тягового двигателя при варьировании его скорости ω (или скорости v трамвая) и разных значениях уклона i рельсового пути

$$W_{\kappa\Sigma} = 0.5 \cdot (1 + \gamma) \cdot m \cdot v^2 = 0.5 \cdot J \cdot \omega^2, \quad (13)$$

тавленнных соответственно через массу m [кг] трамвая (движущегося поступательно со скоростью v [м/с]) или через приведенный (к вращающемуся с угловой скоростью ω [рад/с] валу тягового двигателя) момент инерции J [кг м²] тягового привода, определим значение последнего в виде:

$$J = (1 + \gamma) \cdot m \cdot v^2 / \omega^2 = (1 + \gamma) \cdot m / \varepsilon^2, \quad (14)$$

где γ – коэффициент, учитывающий в транспортном средстве соотношение между собой значений кинетических энергий вращательно и поступательно движущихся масс (для трамвая примем $\gamma = 0,1$) [8].

При этом статический момент сопротивления $M_{c.дв}$ и приведенный (к валу двигателя) момент инерции J_I для каждого одного (из четырех) тягового двигателя вычисляются из соотношений:

$$M_{c.дв} = M_c / n \text{ и } J_I = J / n. \quad (15)$$

Для перевода момента инерции J тягового привода из абсолютных в относительные единицы следует полученное из (14) значение разделить на базисное значение для момента инерции.

На **втором этапе** рассмотрим аналитические зависимости для расчета общих основных потерь мощности (ООПМ) $\Delta P_{эм}$ и общих основных потерь энергии (ООПЭ) для ЧРАД в режимах разгона и торможения, а также энергосберегающее управление тяговыми двигателями трамвая в указанных режимах.

Принимая во внимание упомянутое используемое двухзонное регулирование скорости ЧРАД, считаем для этого двигателя значение ООПМ в виде:

$$\Delta P_{дв} = \begin{cases} \Delta P_{дв.1} - \text{при } 0 \leq \omega \leq \omega_n \text{ (зона 1)}, \\ \Delta P_{дв.2} - \text{при } \omega_n < \omega \leq \omega_m \text{ (зона 2)}, \end{cases} \quad (16)$$

где значения текущих потерь мощности $\Delta P_{дв.1}$ и $\Delta P_{дв.2}$ этого двигателя, соответствующие зонам 1 и 2 регулирования, вычисляются (в относительной системе единиц) из соотношений [7]:

$$\Delta P_{\text{об.1}} = a_1 + b \cdot \left(\frac{M_c + J \cdot \omega'}{n} \right)^2 + c \left(\frac{\Psi_m}{\Psi_{mн}} \right)^2 \omega_1^\lambda + d \cdot \omega^2 \approx a_1 + b \cdot \left(\frac{M_c + J \cdot \omega'}{n} \right)^2 + c \cdot \omega^\lambda + d \cdot \omega^2 \quad (17)$$

$$\Delta P_{\text{об.2}} = a_2 \left(\frac{\Psi_{rн} - T_r \Psi_{rн}}{\omega_1} - \frac{T_r \Psi_{rн}}{\omega_1^2} \omega_1' \right)^2 + b \omega_1^2 \left(\frac{M_c + J \cdot \omega'}{n} \right)^2 + c (\Psi_m / \Psi_{mн})^2 \omega_1^\lambda + d \cdot \omega^2. \quad (18)$$

В выражениях (17) и (18) используются обозначения: ω и ω_1 – соответственно скорость ротора и угловая частота статора двигателя; ω' – производная скорости ротора по текущему времени; $\lambda = 1.3$ – коэффициент, учитывающий изменение потерь мощности в стали ЧРАД от частоты статора ω_1 ; Ψ_m и $\Psi_{mн}$ – соответственно текущее и номинальные значения модуля обобщенного вектора магнитного потока в воздушном зазоре двигателя. Постоянные коэффициенты a_1, a_2, b, c, d вычисляются в виде::

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= (\Psi_{rн} / L_m)^2 \cdot (R_s + 0.005 P_n / \eta_n), & a_2 &= (R_s + 0.005 P_{\text{об.н}} / \eta_n) / L_m^2, \\ b &= (R_s + k_r^2 R_r + 0.005 P_{\text{об.н}} / \eta_n) / k_r^2 \Psi_{rн}^2, & c &= \Delta P_{\text{ст.н}}, & d &= \Delta P_{\text{мех.н}} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где: R_s и R_r – фазные активные сопротивления соответственно статорной и роторной обмоток; L_m и k_r – соответственно индуктивность намагничивания и коэффициент связи ротора; $P_{\text{об.н}}$ и η_n – номинальные значения соответственно полезной мощности на валу и КПД тягового двигателя; $\Delta P_{\text{ст.н}}$ и $\Delta P_{\text{мех.н}}$ – номинальные значения соответственно потерь мощности в стали и механических потерь двигателя.

Суммарные значения ООПЭ $\Delta W_{p\Sigma}, \Delta W_{m\Sigma}$ для всех тяговых двигателей и значения ООПЭ $\Delta W_p, \Delta W_m$ для одного тягового двигателя при разгоне и торможении трамвая, общие времена разгона t_p и торможения t_m тяговых двигателей определяются из зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{p\Sigma} &= \Delta W_{p\Sigma 1} + \Delta W_{p\Sigma 2}, & \Delta W_{p\Sigma 1} &= n \cdot \Delta W_{p1}, & \Delta W_{m\Sigma} &= \Delta W_{m\Sigma 1} + \Delta W_{m\Sigma 2}, & \Delta W_{m\Sigma 1} &= n \cdot \Delta W_{m1}, \\ \Delta W_{p\Sigma 2} &= n \cdot \Delta W_{p2}, & \Delta W_{m\Sigma 2} &= n \cdot \Delta W_{m2}, & \Delta W_p &= \Delta W_{p1} + \Delta W_{p2}, & \Delta W_m &= \Delta W_{m1} + \Delta W_{m2}, \\ \Delta W_{p1} &= \int_0^{t_{p1}} \Delta P_{\text{об.1}} dt, & \Delta W_{p2} &= \int_0^{t_{p2}} \Delta P_{\text{об.2}} dt, & \Delta W_{m1} &= \int_0^{t_{m1}} \Delta P_{\text{об.1}} dt, & \Delta W_{m2} &= \int_0^{t_{m2}} \Delta P_{\text{об.2}} dt, \\ \Delta W_{p,m\Sigma} &= \Delta W_{p\Sigma} + \Delta W_{m\Sigma}, & t_p &= t_{p1} + t_{p2}, & t_m &= t_{m1} + t_{m2} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где ΔW_{p1} и ΔW_{p2} – значения ООПЭ для одного ЧРАД при разгоне, соответствующие 1-ой и 2-ой зонам регулирования скорости; ΔW_{m1} и ΔW_{m2} – значения ООПЭ этого двигателя при торможении, соответствующие 1-ой и 2-ой зонам регулирования скорости; t_{p1} и t_{m1} – длительности времен разгона и торможения для первой зоны регулирования скорости (при $0 \leq \omega \leq \omega_n$); t_{p2} и t_{m2} – длительности времен разгона и торможения для второй зоны регулирования (при $\omega_n < \omega \leq \omega_m$); t – текущее время, которое условимся отсчитывать от начала, на протяжении и в пределах рассматриваемых зон регулирования скорости и режимов разгона ($0 \leq t \leq t_{p1}$ и $0 < t \leq t_{p2}$) или торможения ($0 \leq t \leq t_{m1}$ и $0 \leq t < t_{m2}$) ЧРАД.

Из теории вариационного исчисления известно, что при минимизации значений интегралов из (20) (что является условием минимизации ООПЭ в ЧРАД при разгоне и торможении) подынтегральные функции $\Delta P_{\text{об.1}}$ и $\Delta P_{\text{об.2}}$ из (17) и (18) соответствуют уравнению Эйлера [11]:

$$\frac{\partial^2(\Delta P_{\text{об}})}{\partial \omega' \cdot \partial \omega'} \omega'' + \frac{\partial^2(\Delta P_{\text{об}})}{\partial \omega \cdot \partial \omega'} \omega' + \frac{\partial^2(\Delta P_{\text{об}})}{\partial \omega \cdot \partial t} - \frac{\partial(\Delta P_{\text{об}})}{\partial \omega} = 0, \quad (21)$$

где ω'' – вторая производная скорости ω двигателя по текущему времени t .

Подставив значение для статического момента сопротивления M_c из (11) в окончательное выражение из (17), а затем полученное выражение – в уравнение (21), преобразуем последнее к виду:

$$\omega'' = K_I \cdot \omega + \left(\frac{2q^2}{J^2}\right) \omega^3 + \left(\frac{\lambda \cdot c \cdot n^2}{2b^2 J^2}\right) \omega^{\lambda-1}, \quad \text{где } K_I = (2bqM_{co} + d \cdot n^2) / bJ^2, \quad (22)$$

соответствующему режимам разгона и торможения ЧРАД в первой зоне регулирования скорости.

Вследствие нелинейного вида полученного дифференциального уравнения (22) оно не имеет точного аналитического решения. Как показали проведенные исследования численных решений этого уравнения, полученных методом Рунге-Кутты, они могут быть интерполированы (с относительным среднеквадратичным отклонением менее 0,7 %) траекториями скорости, названными «квазиоптимальными»:

$$\omega = \omega_n \cdot \frac{sh(\xi^* \sqrt{K_I} \cdot t)}{sh(\xi^* \sqrt{K_I} \cdot t_{p1})}, \quad \omega = \omega_n \frac{sh[\xi^* \sqrt{K_I} \cdot (t_{m1} - t)]}{sh(\xi^* \sqrt{K_I} \cdot t_{m1})} - \quad (23)$$

вогнутой или

$$\omega = \omega_n \cdot \left\{ I - \frac{sh[\xi^* \sqrt{K_I} \cdot (t_{p1} - t)]}{sh(\xi^* \sqrt{K_I} \cdot t_{p1})} \right\}, \quad \omega = \omega_n \left\{ I - \frac{sh(\xi^* \sqrt{K_I} \cdot t)}{sh(\xi^* \sqrt{K_I} \cdot t_{m1})} \right\} - \quad (24)$$

выпуклой формы.

Аналогично (после подстановки значения для момента сопротивления M_c из (11) в выражение (18), а затем полученного выражения – в уравнение (21) Эйлера) уравнение (21) было преобразовано к виду:

$$\omega'' \approx K_2 / \omega, \quad \text{где } K_2 = n^2 \cdot d \cdot \Psi_{rn}^2 / bJ^2 \quad (25)$$

и получены квазиоптимальные траектории скорости для второй зоны регулирования ЧРАД:

$$\omega = \omega_n + (\omega_m - \omega_n) \cdot \frac{sh(\xi^* \sqrt{K_2} \cdot t)}{sh(\xi^* \sqrt{K_2} \cdot t_{p2})}, \quad \omega = \omega_n + (\omega_m - \omega_n) \cdot \frac{sh[\xi^* \sqrt{K_2} \cdot (t_{m2} - t)]}{sh(\xi^* \sqrt{K_2} \cdot t_{m2})} - \quad (26)$$

вогнутой или

$$\omega = \omega_n + (\omega_m - \omega_n) \cdot \left\{ I - \frac{sh[\xi^* \sqrt{K_2} \cdot (t_{p2} - t)]}{sh(\xi^* \sqrt{K_2} \cdot t_{p2})} \right\}, \quad \omega = \omega_n + (\omega_m - \omega_n) \cdot \left\{ I - \frac{sh(\xi^* \sqrt{K_2} \cdot t)}{sh(\xi^* \sqrt{K_2} \cdot t_{m2})} \right\} - \quad (27)$$

выпуклой формы.

Причем первые зависимости из выражений (23), (24) и (26), (27) соответствуют разгону, а вторые – торможению ЧРАД. После подстановки выражений (23), (24) и (26), (27) в зависимости (17) и (18) были рассчитаны из (20) значения ООПЭ: $\Delta W_{p\Sigma 1}$, $\Delta W_{m\Sigma 1}$ – при варьировании времен разгона t_{p1} и торможения t_{m1} в первой зоне скоростей трамвая (для скорости $v_n = 24.4$ км/ч); $\Delta W_{p\Sigma 2}$, $\Delta W_{m\Sigma 2}$ – при варьировании времен разгона t_{p2} и торможения t_{m2} во второй зоне скоростей трамвая (для скорости $v_m = 50$ км/ч), – которые изображены в виде графиков на рис.3 и рис.4. Причем в зависимостях (23), (24) и (26), (27) значение поправочного коэффициента ξ^* соответствует всегда минимально возможному значению ООПЭ для ЧРАД, найденному из интегральных зависимостей в (20) при любых конкретных значениях времен разгона t_{p1} , t_{p2} и торможения t_{m1} , t_{m2} для первой и второй зон регулирования скорости. Рассчитанные значения для коэффициента ξ^* приведены в виде графиков на рис.5.

Для тяговых ЧРАД трамвая были вычислены для сравнения из (20) суммарные значения ООПЭ $\Delta W_{p\Sigma 1}$, $\Delta W_{p\Sigma 2}$ и $\Delta W_{m\Sigma 1}$, $\Delta W_{m\Sigma 2}$ при разгоне и торможении применительно к параболического вида (вогнутой и выпуклой формы) и линейного вида тахограммам (ТГ). На рис.3 и рис.4 и последующих рисунках и таблицах условимся обозначать величины, относящиеся к квазиоптимальным траекториям ско-

рости вогнутой и выпуклой формы – соответственно K' и K'' ; к параболическим траекториям скорости вогнутой и выпуклой формы – соответственно Π' и Π'' ; к линейной траектории скорости – L .

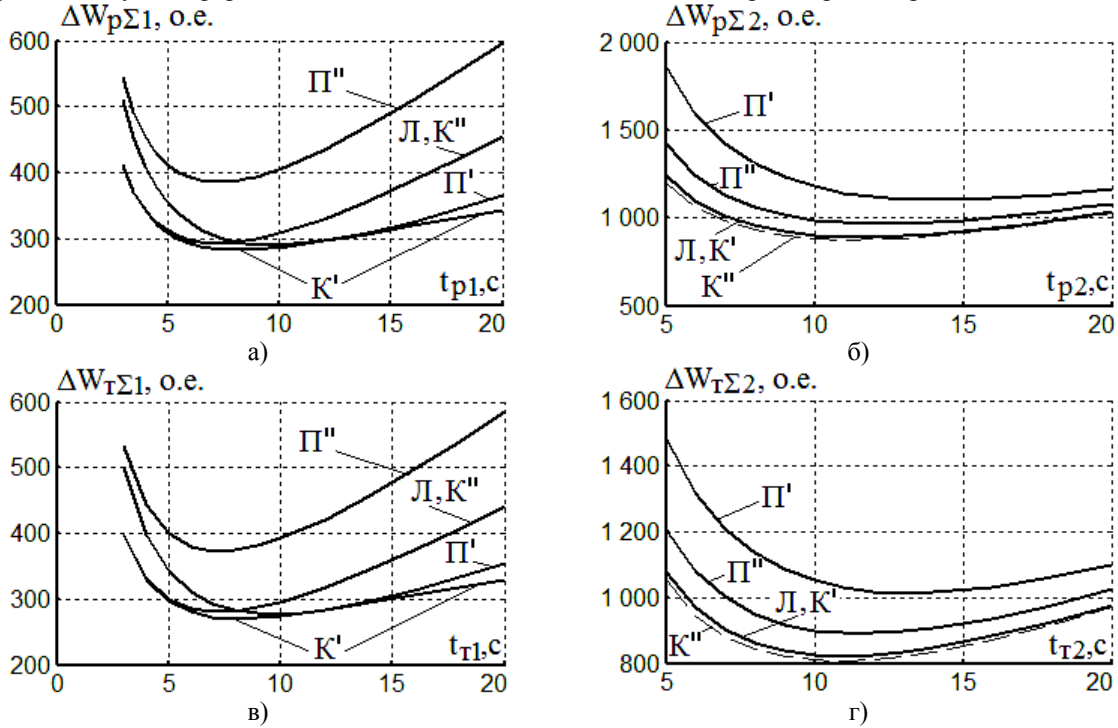


Рис.3 Зависимости суммарных ОПЭ $\Delta W_{p\Sigma 1}$, $\Delta W_{p\Sigma 2}$ при разгоне (а, б) и $\Delta W_{m\Sigma 1}$, $\Delta W_{m\Sigma 2}$ и торможении (в,г) для тяговых ЧРАД трамвая (для $i=0$, $v_n = 24.4$ км/ч и $v_m = 50$ км/ч) в первой (а,в) и второй (б,г) зонах регулирования при варьировании времен разгона t_{p1} , t_{p2} и торможения t_{m1} , t_{m2} для: K' и K'' – квазиоптимальных соответственно вогнутой и выпуклой, Π' и Π'' – параболических соответственно вогнутой и выпуклой, L – линейной тахограмм

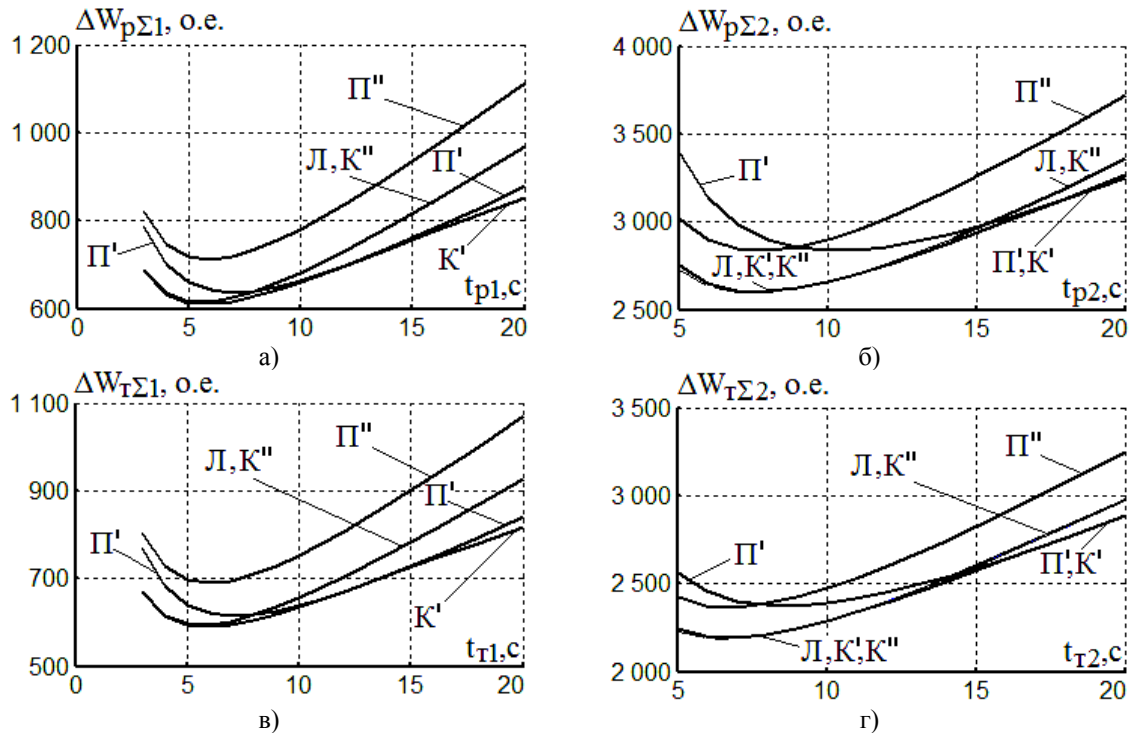


Рис.4 Зависимости суммарных ОПЭ $\Delta W_{p\Sigma 1}$, $\Delta W_{p\Sigma 2}$ при разгоне (а, б) и $\Delta W_{m\Sigma 1}$, $\Delta W_{m\Sigma 2}$ и торможении (в,г) для тяговых ЧРАД трамвая (для $v_n = 24.4$ км/ч и $v_m = 50$ км/ч) в первой (а,в) и второй (б,г) зонах регулирования при варьировании времен разгона t_{p1} , t_{p2} (для $i=0.08$) и тор-

можения t_{m1}, t_{m2} (для $i = -0.08$) для: K' и K'' – квазиоптимальных соответственно вогнутой и выпуклой, Π' и Π'' – параболических соответственно вогнутой и выпуклой, L – линейной тахограмм

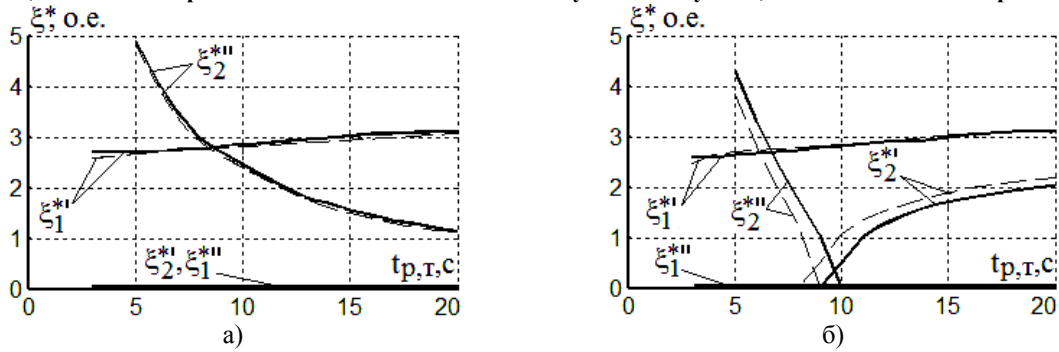


Рис.5 Зависимости $\xi^*(t_p), \xi^*(t_m)$ для квазиоптимальных тахограмм вогнутой и выпуклой (показаны одним и двумя штрихами соответственно) формы при первой и второй зонах регулирования (показаны индексами 1 и 2 соответственно) для значений уклона: а – $i = 0$, б – $i = 0.08$ (разгон) и $i = -0.08$ (торможение), изображенные: сплошной линией – для разгона, пунктиром – для торможения

По результатам выполненных расчетов представлены в табл.2 (для $i = 0$) и табл.3 (для $i = \pm 0.08$) значения оптимальных времен разгона t_{p1}^o, t_{p2}^o и торможения t_{m1}^o, t_{m2}^o в первой и второй зонах и соответствующие им оптимальные (минимальные) суммарные значения ООПЭ $\Delta W_{p\Sigma 1}^o, \Delta W_{p\Sigma 2}^o$ и $\Delta W_{m\Sigma 1}^o, \Delta W_{m\Sigma 2}^o$ для всех тяговых ЧРАД трамвая при рассматриваемых различных траекториях скорости (в табл.2 – для скорости $v_n = 24.4$ км/ч, в табл.3 – для скорости $v_m = 50$ км/ч), а также значения удельных потерь энергии $\Delta p_{p1}, \Delta p_{p2}$ и $\Delta p_{m1}, \Delta p_{m2}$ для ЧРАД при перемещениях α_{p1}, α_{p2} и α_{m1}, α_{m2} его ротора в режимах разгона и торможения в зонах регулирования 1 и 2, вычисленные в виде:

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_{p1} &= \Delta W_{p\Sigma 1}^o / \alpha_{p1}, \quad \Delta p_{m1} = \Delta W_{m\Sigma 1}^o / \alpha_{m1}, \quad \Delta p_{p\Sigma} = \Delta W_{p\Sigma}^o / \alpha_p, \quad \Delta p_{p,m\Sigma} = \Delta W_{p,m\Sigma}^o / (\alpha_p + \alpha_m), \\ \Delta p_{p2} &= \Delta W_{p\Sigma 2}^o / \alpha_{p2}, \quad \Delta p_{m2} = \Delta W_{m\Sigma 2}^o / \alpha_{m2}, \quad \Delta p_{m\Sigma} = \Delta W_{m\Sigma}^o / \alpha_m, \quad \Delta W_{p,m\Sigma}^o = \Delta W_{p\Sigma}^o + \Delta W_{m\Sigma}^o, \\ \alpha_{p1} &= \int_0^{t_{p1}^o} \omega \cdot dt, \quad \alpha_{m1} = \int_0^{t_{m1}^o} \omega \cdot dt, \quad \alpha_{p2} = \int_0^{t_{p2}^o} \omega \cdot dt, \quad \alpha_{m2} = \int_0^{t_{m2}^o} \omega \cdot dt, \\ \alpha_p &= \alpha_{p1} + \alpha_{p2}, \quad \alpha_m = \alpha_{m1} + \alpha_{m2}, \quad t_p^o = t_{p1}^o + t_{p2}^o, \quad t_m^o = t_{m1}^o + t_{m2}^o, \end{aligned} \right\} (28)$$

где t_p^o и t_m^o – общие оптимальные времена разгона и торможения трамвая; α_p и α_m – результирующие положения вала тягового ЧРАД соответственно при разгоне и торможении.

В табл.4 приведены результаты расчета (при $i = 0, v_m = 50$ км/ч) оптимальных значений общих времен разгона t_p^o и торможения t_m^o и соответствующих им суммарных значений ООПЭ $\Delta W_{p\Sigma}^o, \Delta W_{m\Sigma}^o$ и $\Delta W_{p,m}^o$ для всех тяговых ЧРАД трамвая в пуско-тормозных режимах применительно к рассмотренным видам (K', K'', Π', Π'' и L) тахограмм, а также – дополнительно для комбинированной (из участков K' и K'') квазиоптимальной тахограммы. Согласно табл.4 наименьшие значения суммарных удельных ООПЭ $\Delta p_{p,m\Sigma}$ тяговых ЧРАД присущи для: параболического Π'' и квазиоптимального K'' вида выпуклой формы и линейной L тахограмм (которые далее обозначим при пуско-тормозных режимах энергосберегающими управлениями 1, 2 и 3 соответственно), а также для – комбинированной тахограммы, состоящей из участков квазиоптимальных тахограмм вогнутой K' и выпуклой K'' формы (обозначим ее управлением 4). Формы тахограмм, соответствующих энергосберегающим управлениям 1, 2, 3 и 4, изображены на рис.6, а входящие в них участки (из ранее рассмотренных тахограмм) показаны в табл.5.

На **третьем этапе** для оптимальных времен разгона и торможения из табл.2 и табл.3 (при $v_m = 50$ км/ч) рассчитаны из зависимостей (6), (13), (18) – (20), (22), (25), (26) и (28), (29) электромеханические (скорость ω и положения α_p и α_m вала двигателя при разгоне и торможении, скорость v трамвая) и

энергетические (общие основные потери мощности $\Delta P_{ов}$ и энергии ΔW_p , ΔW_m в ЧРАД) переходные процессы которые показаны на рис.7. Также на данном рисунке изображены переходные процессы для

Таблица 2

Оптимальные времена $t_{p1}^o, t_{p2}^o, t_{m1}^o, t_{m2}^o$ и ООПЭ $\Delta W_{p\Sigma 1}^o, \Delta W_{p\Sigma 2}^o, \Delta W_{m\Sigma 1}^o, \Delta W_{m\Sigma 2}^o$, удельные потери $\Delta p_{p1}, \Delta p_{p2}, \Delta p_{m1}, \Delta p_{m2}$ энергии при разгоне и торможении тяговых ЧРАД трамвая (при $m = 26.8$ т, $i = 0$, $v_n = 24.4$ км/ч, $v_m = 50$ км/ч) для различных видов тахограмм

Обозначение ТГ	Разгон						Торможение					
	t_{p1}^o	$\Delta W_{p\Sigma 1}^o$	Δp_{p1}	t_{p2}^o	$\Delta W_{p\Sigma 2}^o$	Δp_{p2}	t_{m1}^o	$\Delta W_{m\Sigma 1}^o$	Δp_{m1}	t_{m2}^o	$\Delta W_{m\Sigma 2}^o$	Δp_{m2}
Ед.изм.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.
K'	8,1	70,676	0.0660	11,5	223,24	0.0405	8,1	67,579	0.2792	11,6	222,73	0.0371
K''	7,2	73,120	0.0647	11,2	219,06	0.0393	7,2	70,025	0.0619	10,6	201,86	0.0495
Π'	9,8	72,456	0.0706	14,3	275,55	0.0454	9,8	69,358	0.0676	13,2	253,45	0.0453
Π''	7,3	96,373	0.0639	12,3	241,57	0.0368	7,3	93,269	0.0610	11,6	222,73	0.0360
L	7,2	73,120	0.0647	11,5	223,24	0.0405	7,2	70,025	0.0619	10,9	205,64	0.0394

Таблица 3

Оптимальные времена $t_{p1}^o, t_{p2}^o, t_{m1}^o, t_{m2}^o$ и ООПЭ $\Delta W_{p\Sigma 1}^o, \Delta W_{p\Sigma 2}^o, \Delta W_{m\Sigma 1}^o, \Delta W_{m\Sigma 2}^o$, удельные потери $\Delta p_{p1}, \Delta p_{p2}, \Delta p_{m1}, \Delta p_{m2}$ энергии при разгоне и торможении тяговых ЧРАД трамвая (при $m = 26.8$ т, $i = \pm 0.08$, $v_n = 24.4$ км/ч, $v_m = 50$ км/ч) для различных видов тахограмм

Обозначение ТГ	Разгон (при $i = 0.08$)						Торможение (при $i = -0.08$)					
	t_{p1}^o	$\Delta W_{p\Sigma 1}^o$	Δp_{p1}	t_{p2}^o	$\Delta W_{p\Sigma 2}^o$	Δp_{p2}	t_{m1}^o	$\Delta W_{m\Sigma 1}^o$	Δp_{m1}	t_{m2}^o	$\Delta W_{m\Sigma 2}^o$	Δp_{m2}
Ед.изм.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.	с	о.е.	о.е.
K'	5,7	152,62	0.1859	7,7	650,43	0.1764	5,84	147,51	0.8548	6,7	548,06	0.1708
K''	5,5	153,67	0.1780	7,4	649,00	0.1797	5,7	148,58	0.1660	6,5	547,10	0.1727
Π'	7	159,29	0.2174	10,3	709,03	0.1624	7,1	153,98	0.2072	8,6	593,66	0.1628
Π''	5,9	177,84	0.1440	7,7	709,07	0.1725	6	172,41	0.1373	6,7	591,72	0.1654
L	5,5	153,67	0.1780	7,7	650,43	0.1764	5,7	148,58	0.1660	6,7	548,06	0.1708

Таблица 4

Оптимальные значения общих времен разгона t_p^o и торможения t_m^o и суммарных $\Delta W_{p\Sigma}^o, \Delta W_{m\Sigma}^o, \Delta W_{p,m\Sigma}^o$ и суммарных удельных $\Delta p_{p\Sigma}, \Delta p_{m\Sigma}, \Delta p_{p,m\Sigma}$ ООПЭ тяговых двигателей трамвая в режимах разгона и торможения (при $i = 0, v_m = 50$ км/ч)

Управление	Вид ТГ	Обозначение величин							
		t_p^o	t_m^o	$\Delta W_{p\Sigma}^o$	$\Delta W_{m\Sigma}^o$	$\Delta W_{p,m\Sigma}^o$	$\Delta p_{p\Sigma}$	$\Delta p_{m\Sigma}$	$\Delta p_{p,m\Sigma}$
Един. измер.		с	с	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.
	K'	19.6	19.7	293.92	321.58	615.5	0.1065	0.3163	0.4228
1	K''	18.4	17.8	292.18	272.00	564.18	0.1039	0.1002	0.2041
	Π'	24.1	23	348.01	322.81	670.82	0.1161	0.1129	0.2290
2	Π''	19.5	18.9	337.95	316.00	653.95	0.1007	0.0970	0.1977
3	L	18.7	18.1	296.36	275.66	572.02	0.1052	0.1013	0.2065
4	K', K''	19.3	18.8	289.74	269.44	559.18	0.1052	0.1016	0.2068

электромагнитного момента $M_{\delta\epsilon}$ и положения s_p и s_m трамвая при разгоне и торможении, модуля обобщенных векторов статорного тока I_I ЧРАД, вычисленных из зависимостей [7]:

$$\left. \begin{aligned} M_{\delta\epsilon} &= (M_c + J\omega')/n, & I_I &= (I_{Ix}^2 + I_{Iy}^2)^{0.5}, & I_{Ix} &= (\Psi_r + T_r \cdot \Psi_r')/L_m, \\ s_p[M] &= \epsilon \cdot \alpha_p/z_p, & s_m[M] &= \epsilon \cdot \alpha_m/z_p, & I_{Iy} &= M_{\delta\epsilon}/k_r \Psi_r \end{aligned} \right\}, \quad (29)$$

где I_{Ix} , I_{Iy} – намагничивающая и активная проекции обобщенного вектора статорного тока \bar{I}_I ; T_r и L_m – электромагнитная постоянная времени ротора и индуктивность намагничивания двигателя; z_p – число пар полюсов тягового ЧРАД ($z_p = 2$).

Таблица 5
Обозначение составных частей тахограмм при энергосберегающих управлениях 1,2,3 и 4

Вид управления	Интервалы времени			
	t_{p1}^o	t_{p2}^o	t_{m1}^o	t_{m2}^o
1	K''	K''	K''	K''
2	Π''	Π''	Π''	Π''
3	L	L	L	L
4	K'	K''	K'	K''

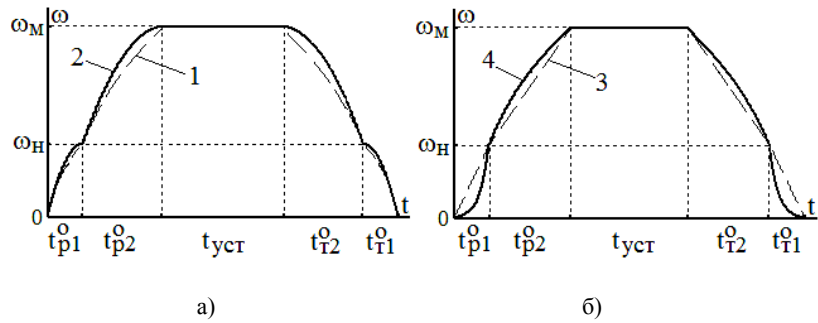


Рис. 6 Формы тахограмм при энергосберегающих управлениях: а – для управления 1 и 2; б – для управления 3 и 4

При этом аналогично соотношению из (3) и согласно [8] сила тяги F_m и поступательное движение трамвая описываются зависимостями

$$F_m = n \cdot M_{\delta\epsilon} \cdot \epsilon \cdot \eta_{мд} \cdot M_{\delta} \quad \text{и} \quad F_m - F_c = m \cdot (1 + \gamma) \cdot v', \quad (30)$$

в которых F_m и F_c – силы соответственно тяги и сопротивления движению, [Н]; v' [м/с²] – первая производная скорости трамвая по времени.

Условием работы тягового привода без буксования является не превышение силой тяги F_m ее предельного значения $F_{пред}$, равного силе сцепления:

$$|F_m| \leq F_{пред} = \begin{cases} mg \cdot k_{cц} & \text{– при разгоне,} \\ 0.8 \cdot mg \cdot k_{cц} & \text{– при рекуперативном торможении,} \end{cases} \quad (31)$$

где $k_{cц}$ – коэффициент сцепления колес трамвая с металлическим рельсом (при нормальных погодных условиях принимает значение: $k_{cц} = 0.15$) [8].

С учетом соотношений из (30) и (31) условием работы тягового привода трамвая без буксования может быть также не превышение моментом двигателя $M_{\delta\epsilon}$ предельного для него значения $M_{пред}$:

$$|M_{\delta\epsilon}| \leq M_{пред} = \begin{cases} \frac{mg \cdot k_{cц}}{n \epsilon \eta_{мд} M_{\delta}} & \text{– при разгоне,} \\ \frac{0.8 \cdot mg \cdot k_{cц}}{n \epsilon \eta_{мд} M_{\delta}} & \text{– при рекуперативном торможении,} \end{cases} \quad \tau = \frac{v \cdot [F_c + (1 + \gamma) \cdot m v']}{n \cdot P_{\delta\epsilon,н}}, \quad (32)$$

где значение КПД $\eta_{мд}$ движущего механизма трамвая находится при параметре τ , вычисляемом из (32).

Как свидетельствуют проведенные расчеты для массы $m = 26.8$ [т] трамвая, предельные значения момента $M_{пред}$ составляют $2.3M_{дв.н}$ при трогании и $1.3M_{дв.н}$ при последующем разгоне или $1.8M_{дв.н}$ на заключительной стадии рекуперативного торможения и $1.04M_{дв.н}$ на предшествующих этому скоростях при данном торможении. Согласно рис.7 развиваемые при разгоне и торможении трамвая текущие значения электромагнитного момента $M_{дв}$ двигателя не превышают указанных для него предельных значений $M_{пред}$, что обеспечивает функционирование тяговых двигателей трамвая при рассмотренных траекториях скорости в пуско-тормозных режимах без буксования. Для перехода при оценке электромеханических и энергетических процессов от относительных к абсолютным значениям следует полученные в относительных единицах значения умножить на базисные значения, приведенные для ЧРАД в табл.6.

На **четвертом этапе** рассмотрим энергосберегающее управление тяговыми ЧРАД трамвая при его движении с равномерной скоростью ($v = const$) и при неизменном уклоне ($i = const$) рельсового пути. С учетом соотношений из (11) этому, очевидно, соответствуют постоянные значения угловой скорости $\omega = const$ и момента сопротивления $M_c = const$ двигателя.

Для установившихся режимов ЧРАД известно оптимальное (минимально возможное) соотношение

Таблица 6

Базисные значения для величин двигателя

Величина	I_l	M, M_c	Ψ	ω_l	ω	$P, \Delta P$	$W, \Delta W$	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	$0.01/\pi$

χ_o между основными электромагнитными потерями мощности $\Delta P_{эм}$ и абсолютным значением $|M_{дв}|$ развиваемого электромагнитного момента $M_{дв}$ этого двигателя [7]:

$$\chi_o = \frac{2}{k_r L_m} (X \cdot Y)^{0.5} = \frac{\Delta P_{эм}}{|M_{дв}|} = \min, \quad (33)$$

где параметры X и Y рассчитываются в виде:

$$X = R_s + 0.005 \frac{P_n}{\eta_n} + k_r^2 \left(R_r + \frac{\Delta P_{ст.н} L_{ст}^2 \omega_l^2}{\Psi_{тн}^2} \right) \quad \text{и} \quad Y = R_s + 0.005 P_n / \eta_n + \Delta P_{ст.н} L_m^2 \omega_l^{1.3} / \Psi_{тн}^2, \quad (34)$$

где $L_{ст}$ – индуктивность рассеяния ротора тягового двигателя.

В указанном оптимальном режиме, реализующем минимизацию основных электромагнитных $\Delta P_{эм}$ и общих $\Delta P_{дв}$ потерь мощности двигателя, эти потери мощности рассчитываются с учетом (33) в виде:

$$\Delta P_{эм} = \chi_o |M_{дв}| = \frac{2|M_{дв}|}{k_r L_m} \left(\frac{X}{Y} \right)^{0.5} \quad \text{и} \quad \Delta P_{дв} = \Delta P_{эм} + d \cdot \omega^2. \quad (35)$$

Применительно к трамваю представляет интерес минимизация его удельной потребляемой общей энергии p_Σ при перемещении вала тяговых ЧРАД в установившихся (с равномерной скоростью $\omega = const$ и длительностью времени t_{ycm}) режимах движения:

$$p_\Sigma = \frac{P_\Sigma \cdot t_{ycm}}{\alpha} = \frac{P_\Sigma \cdot t_{ycm}}{\omega \cdot t_{ycm}} = \frac{P_\Sigma}{\omega} = \min \quad \text{и} \quad P_\Sigma = [M_c \cdot \omega + n \cdot (\Delta P_{дв} + \Delta P_{мод})] / \eta_{сн} + P_{сн}, \quad (36)$$

где P_Σ – общая потребляемая мощность трамвая в установившемся режиме движения со скоростью $v = const$; α – перемещение вала тягового двигателя за время этого установившегося движения; $\Delta P_{мод} \approx \tau_m \cdot \Delta P_{дв.н}$ – модуляционные потери мощности одного тягового ЧРАД, вызванные высокочастотными гармониками его фазных статорных токов (где $\Delta P_{дв.н}$ – номинальные потери мощности тяго-

вого двигателя; $\tau_m \approx 0.03$); $P_{сн}$ – активная мощность потребления собственных нужд трамвая (затрачиваемая на питание бортового компьютера, сигнализации, освещения и др.). Заметим, что при отсутствии проскальзывания движущих колес трамвая относительно рельсов перемещение α вала ЧРАД прямо пропорционально перемещению s трамвая: $s[M] = \varepsilon \cdot \alpha / z_p$.

Из (36) рассчитаны применительно к установившимся режимам работы трамвая и показаны на рис.8 характеристики удельной потребляемой (показанной пунктиром) или генерируемой (изображенной пунктиром) энергии $p_{\Sigma} = P_{\Sigma} / \omega$ трамваем при изменении значения его скорости v , скорости ω тягового двигателя и при различных значениях i уклона рельсового пути. Согласно рис.8 минимальные значения удельной потребляемой энергии p_{Σ} достигаются при определенных энергосберегающих значениях скорости v^* и ω^* трамвая или тягового ЧРАД (эти значения на данном рисунке изображены только для характеристики с уклоном $i=0$, где $v^* = 34,6$ км/ч, $\omega^* = 1.42$ о.е.).

Задавшись расстоянием L_o между соседними остановками трамвая и исходя из ранее рассмотренных зависимостей для суммарных значений ООПЭ $\Delta W_{p\Sigma}$ и $\Delta W_{m\Sigma}$ всех тяговых двигателей трамвая, модуляционных потерь мощности ΔP_{mod} и электромагнитного момента $M_{ов}$ тягового ЧРАД, с учетом второго выражения из (35) определим из следующих соотношений:

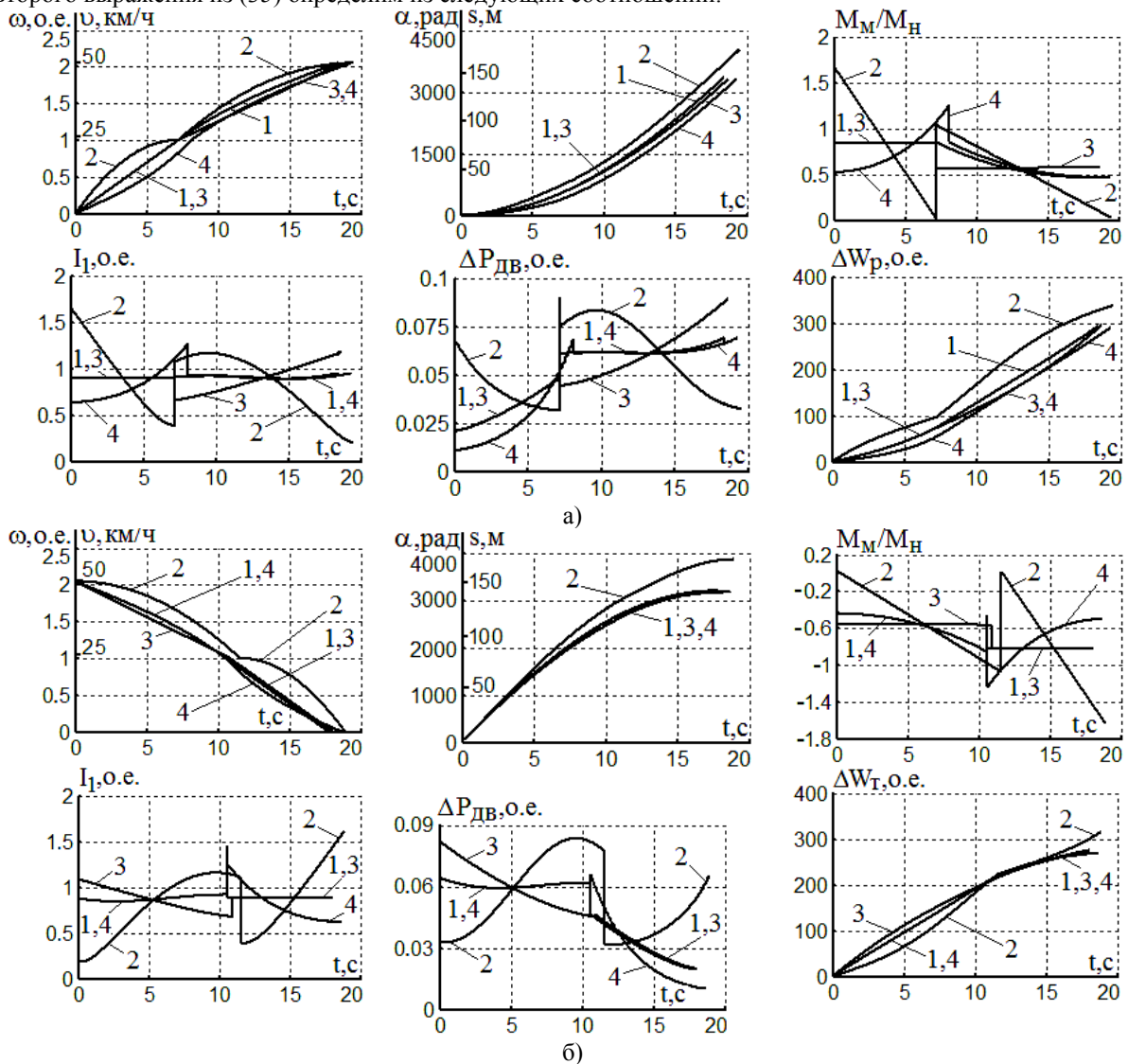


Рис.7 Электромеханические и энергетические переходные процессы (для $m = 26.8$ т, $v_m = 50$ км/ч, $i = 0$) при разгоне (а) и торможении (б) тягового ЧРАД трамвая (при оптимальных временах пуска-тормозных режимов для управлений 1, 2, 3 и 4 соответственно)

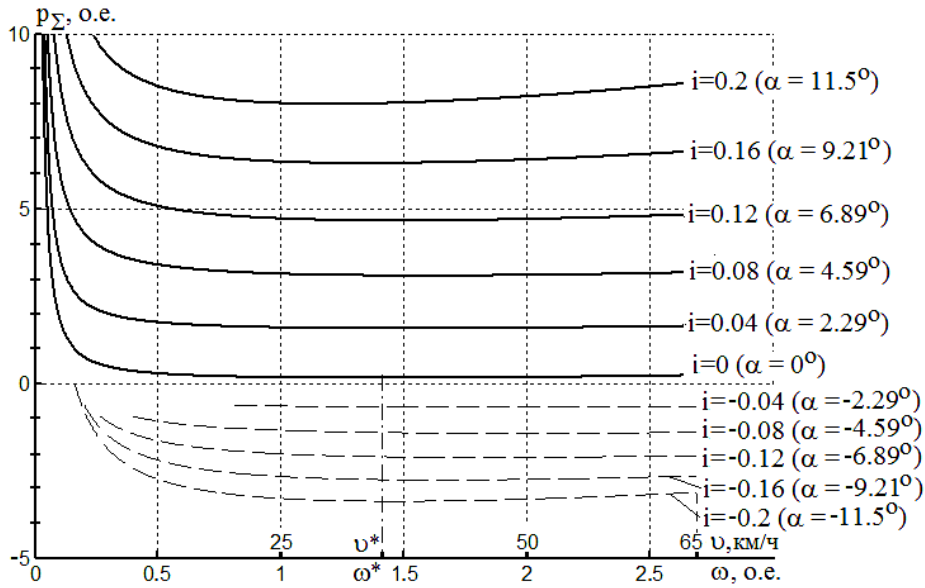


Рис.8 Удельные потребление (показанное сплошной линией) и генерация (изображенная пунктиром) энергии трамвая в оптимальном установившемся режиме

Таблица 7

Результаты расчета суммарных ООПЭ тяговых двигателей за время движения трамвая между остановками ($L_o = 400$ м, $i = 0$) при разных установившихся скоростях v_m для управления 1, 2, 3 и

4

v_m км/ч	Управление	t_p^o с	t_m^o с	t_{ycm} с	s_p м	s_m м	s_{ycm} м	$\Delta W_{p\Sigma}$ о.е.	$\Delta W_{m\Sigma}$ о.е.	ΔW_{ycm} о.е.	ΔW_{Σ} о.е.
24,4	1	7.2	7.2	44.6	48.74	48.75	302.51	73.12	70.02	336.1	479.2
	2	7.2	7.3	39.7	64.99	65.90	269.11	96.38	93.27	299.2	488.9
	3	7.2	7.2	44.6	48.74	48.75	302.51	73.12	70.02	336.1	479.2
	4	8.1	7.2	45.4	46.20	46.00	307.8	70.68	67.59	342.1	480.4
35	1	11.7	10.6	30.2	54.2	52.5	293.3	140.8	134.9	383.1	658.8
	2	11.2	11.1	27.5	67.2	65.9	266.9	172.0	165.5	348.9	686.4
	3	10.8	10.6	30.2	53.9	52.2	293.9	141.3	135.3	383.1	659.7
	4	10.8	10.6	30.4	53.0	51.2	295.8	138.4	132.5	385.6	656.5
50	1	18.4	17.8	7.1	144.7	156.5	98.8	292.2	272.0	294.0	858.2
	2	19.5	18.9	4.28	174.1	166.5	59.4	338.0	316.0	148.9	802.9
	3	18.7	18.1	8.63	143.1	137.0	119.9	296.4	275.6	300.2	872.2
	4	19.3	18.8	8.63	143.4	136.7	119.9	289.7	269.4	300.2	859.3

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_{p\Sigma} + \Delta W_{m\Sigma} + \Delta W_{ycm}; \quad \Delta W_{ycm} = n \cdot \Delta P_{\partial\delta} \cdot t_{ycm},$$

$$W_{\Sigma} = W_{p\Sigma} + W_{m\Sigma} + W_{ycm}; \quad W_{p\Sigma} = \int_0^{t_p} \frac{n}{\eta_{cn}} (\omega \cdot M_{\partial\delta} + \Delta P_{mod}) \cdot dt + \frac{\Delta W_{p\Sigma}}{\eta_{cn}} + P_{cn} \cdot t_p; \quad s_p = \frac{\alpha_p}{\varepsilon}, \quad s_m = \frac{\alpha_m}{\varepsilon}; \quad (37)$$

$$W_{m\Sigma} = \int_0^{t_m} \frac{n}{\eta_{cn}} (\omega \cdot M_{\partial\delta} + \Delta P_{mod}) \cdot dt + \frac{\Delta W_{m\Sigma}}{\eta_{cn}} + P_{cn} \cdot t_m; \quad W_{ycm} = P_{\Sigma} \cdot t_{ycm}; \quad t_{ycm} = [L_o - (s_p + s_m)] / v$$

суммарное значение ООПЭ ΔW_{Σ} и общее потребление энергии W_{Σ} трамваем при прохождении им упомянутой дистанции L_o между соседними остановками. Результаты выполненных расчетов (при режимах разгона и торможения: оптимальных времен t_p^o и t_m^o , пройденных в пуско-тормозных режимах расстояний трамваем s_p и s_m , потребляемой энергии $W_{p\Sigma}$ и $W_{m\Sigma}$; при установившемся режиме движения со скоростью $v = const$: времени t_{ycm} этого движения и пройденного при этом расстоянии s_{ycm} , ООПЭ ΔW_{ycm} в данном режиме; суммарных ООПЭ ΔW_{Σ} трамваем в установившихся и пуско-тормозных режимах) представлены применительно к управлениям 1, 2, 3 и 4 в табл.7. Как показали выполненные рас-

четы, удельный расход электроэнергии трамвая (при $m = 26.8$ т, $v_m = 50$ км/ч, $i = 0$) для всех рассмотренных видов энергосберегающего управления не превышает 80 Вт·ч/т·км.

На *пятом этапе* приведем расчет ожидаемой годовой экономии \mathcal{E}_2 , приходящийся на один моторный вагон трамвая и достигаемой за счет уменьшения непроизводительных потерь энергии в тяговых двигателях при переходе к оптимальным длительностям их времен разгона и торможения:

$$\mathcal{E}_2 = (\Delta W_9 \cdot \Delta W_6 \cdot 12 \cdot 16 \cdot 365) / 3600 = 2585 \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

где $\Delta W_9 = \Delta W_{p,m\Sigma} - \Delta W_{p,m\Sigma}^0 \approx 600$ о.е. – суммарное снижение потерь электроэнергии (согласно табл.3) при одном разгоне и одном торможении (то есть, при одном пуско-тормозном режиме) в тяговых двигателях одновагонного трамвая; $\Delta W_6 = 0.2213$ кДж – базисное значение энергии (согласно табл.6); 12 – количество пуско-тормозных режимов в час; количество рабочих часов трамвая; 16 – количество часов работы трамвая в сутки; 365 – количество рабочих дней в году; 3600 – количество кДж в 1 кВт·ч.

ВЫВОДЫ

1. Разработанные и исследованные виды энергосберегающего управления тяговыми ЧРАД трамвая (основанные при пуско-тормозных режимах на применении предложенных в табл.5 квазиоптимальных тахограмм с изломом на границе первой и второй зон регулирования скорости этих двигателей и использовании оптимальных длительностей времен разгона и торможения, а в установившихся режимах – на применении оптимального управления ЧРАД по минимуму электромагнитных потерь мощности в нем, позволяют минимизировать согласно табл.7 суммарные основные потери энергии тяговых двигателей трамвая при его движении на дистанции между соседними остановками.

2. Полученные аналитические зависимости (7) и (10) обеспечивают расчет текущего значения КПД движущего механизма трамвая в функции развиваемой им механической мощности и с учетом двигательного или генераторного режимов работы, что позволяет определить из (11) и (30) уточненные значения статического момента сопротивления тягового привода и создаваемой им силы тяги.

3. Для пуско-тормозных режимов согласно рис.3 и рис.4 установлен «U»-образный вид зависимости суммарных ООПЭ $W_{p\Sigma 1}$, $W_{p\Sigma 2}$ и $W_{m\Sigma 1}$, $W_{m\Sigma 2}$ для тяговых ЧРАД трамвая от длительности их времен разгона t_{p1} , t_{p2} и торможения t_{m1} , t_{m2} в первой и второй зонах регулирования скорости. Выявлено,

что при переходе к оптимальным значениям общих времен разгона t_p^0 и торможения t_m^0 обеспечивается согласно табл.4 уменьшение суммарных ООПЭ $\Delta W_{p,m}$ в пуско-тормозных режимах на 1,3 – 2 раза. При этом важной особенностью тягового привода трамвая является то, что большая часть (от 50 до 100 %) его общего времени функционирования приходится на пуско-тормозные режимы.

4. Разработанные квазиоптимальная выпуклой формы (соответствующая управлению 1) и комбинированная квазиоптимальная (соответствующая управлению 4) тахограммы, показанные на рис.6, наряду со своими высокими (согласно табл.4 и табл.7) энергосберегающими свойствами, позволяют обеспечить более плавный пуск и торможение трамвая (в сравнении с параболическим управлением 2) и уменьшить при этом (согласно рис.7) максимальные текущие значения электромагнитного момента тяговых ЧРАД (что увеличивает запас по сцеплению движущих колес трамвая с рельсом и уменьшает перегрузочную способность силового преобразователя по току). При этом выявлено, что в первой зоне регулирования квазиоптимальная вогнутой формы или линейная тахограммы близко совпадают между собой, что упрощает реализацию комбинированного квазиоптимального управления.

5. Установлено, что при оптимальных значениях длительностей времен разгона t_{p1}^0 , t_{p2}^0 , t_p^0 и торможения t_{m1}^0 , t_{m2}^0 , t_m^0 наименьшие согласно табл.4 соотношения Δp_p , Δp_m , $\Delta p_{p,m}$ между суммарными ООПЭ всех тяговых двигателей и перемещением вала тягового ЧРАД присущи параболического и квазиоптимального вида выпуклой формы тахограммам.

6. Проведенные исследования переходных электромеханических и энергетических процессов тягового ЧРАД трамвая при разгоне и торможении (иллюстрируемые временными диаграммами на рис.7) свидетельствуют об их практической реализуемости, так как их текущие значения находятся в диапазоне допустимых для них рабочих значений.

7. Использование для установившихся режимов движения трамвая предложенного энергосберегающего значения v^* скорости (определяемого из построенных графических зависимостей на рис.8) позволяет уменьшить на (7 – 33) % энергопотребление трамвая в этих режимах.

8. Разработанное и исследованное энергосберегающее управление при пуско-тормозных и установившихся режимах трамвая предназначено для снижения в нем непроизводительных потерь энергии и рекомендуется для применения как в существующих трамваях, оснащенных тяговыми ЧРАД, так и при проектировании и создании отечественного украинского трамвая с указанным типом тягового двигателя.

Список литературы

1. Фирма «Siemens» <https://www.siemens.com/global/en/home/products/mobility/rail-solutions/rolling-stock/trams-and-light-rail.html> (23.10.2018)
2. Edstrand J. Calculation method for powering a tramway network / J. Edstrand. – Goteborg, Sweden, 2012. – 101 p.
3. ГЭТ Электротранспорт Санкт-Петербурга https://www.electrotrans.spb.ru/podvizhnoy_sostav (23.10.2018)
4. 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.
5. 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.
6. Сайт «Харьков транспортный» http://gortransport.kharkov.ua/ps_models/50/ (23.10.2018)
7. Пивняк Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Г.Г. Пивняк, А.В. Волков. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470с.
8. Розенфельд В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, Е.П. Исаев, Н.Н. Сидоров: Учебник для вузов ж/д транспорта. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 328с.
9. Атаманов Ю.Е. Теория подвижного состава городского электрического транспорта / Ю.Е. Атаманов, В.Н. Плющ. – Минск, Беларусь, 2012. – 236с.
10. Клепиков В.Б. Энергоэффективность рекуперативных режимов электромобилей / В.Б. Клепиков, А.В. Семиков // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 6, С. 36 – 42.
11. Андреева Е.А. Вариационное исчисление и методы оптимизации / Е.А. Андреева, В.М. Цирулева. – М.: Высш.шк., 2006. – 584 с.

Рекомендовано к печати: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.

УДК 62-83

Н.Н. Казачковский, канд. техн. наук

(Украина, Днепр, Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет")

СОПОСТАВЛЕНИЕ ЗАКОНОВ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ALTIVAR 21

Анотація. Експериментально досліджені вихідні напруга та струм, споживана перетворювачем частоти (ПЧ) активна потужність залежно від моменту двигуна та вихідної частоти ПЧ за різних законів частотного керування асинхронним двигуном. Доведено, що енергоощадний закон частотного керування (закон мінімального струму) внаслідок зменшення напруги на статорі двигуна та статорного струму забезпечує найменший рівень споживання перетворювачем частоти активної потужності.

Ключові слова: перетворювач частоти, асинхронний двигун, статор, активна потужність, закон мінімального струму

Аннотация. Экспериментально исследованы выходные напряжение и ток, потребляемая преобразователем частоты (ПЧ) активная мощность в зависимости от момента двигателя и выходной частоты ПЧ при различных законах частотного управления асинхронным двигателем. Доказано, что энергосберегающий закон частотного управления (закон минимального тока) вследствие уменьшения напряжения на статоре двигателя и статорного тока обеспечивает наименьший уровень потребления преобразователем частоты активной мощности.

Ключевые слова: преобразователь частоты, асинхронный двигатель, статор, активная мощность, закон минимального тока

Abstract. The output voltage and current consumed by the frequency converter (inverter) are experimentally investigated, depending on the engine moment and the frequency of the IF on the basis of different laws of frequency control of the induction motor. It is proved that the energy saving law of frequency control (the law of minimum current) due to the reduction of the voltage on the stator of the engine and stator current provides the lowest level of consumption of the converter of active power.

Keywords: frequency converter, asynchronous motor, stator, active power, law of minimum current