

КОЭФФИЦИЕНТЫ МОЩНОСТИ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ТРАМВАЕВ

Введение

Данная работа является продолжением и развитием исследований [1–3] по энергетическим показателям систем и устройств электрического транспорта постоянного тока.

Трамвай, как и система электрической тяги постоянного тока магистральных железных дорог, питаются выпрямленным напряжением. Однако причины технологического характера обуславливают резкие случайные изменения во времени уже сглаженных постоянных (точнее, неизменных во времени) напряжения на токоприемнике трамвая $U(t)$ и его тягового тока $I(t)$ (рис. 1 и 2). Таким образом, трамвай, являясь по названию (по классификации) системой электрического транспорта постоянного тока, по сути таковой не является, а является системой переменного тока. Тогда при составлении энергобаланса в такой системе нельзя исходить из условия, что ее коэффициент мощности $\lambda = 1$, как это принято в настоящее время. Необходимо учитывать, что трамвай потребляет реактивную мощность, что $\lambda < 1$, вследствие чего имеют место дополнительные потери электрической энергии.

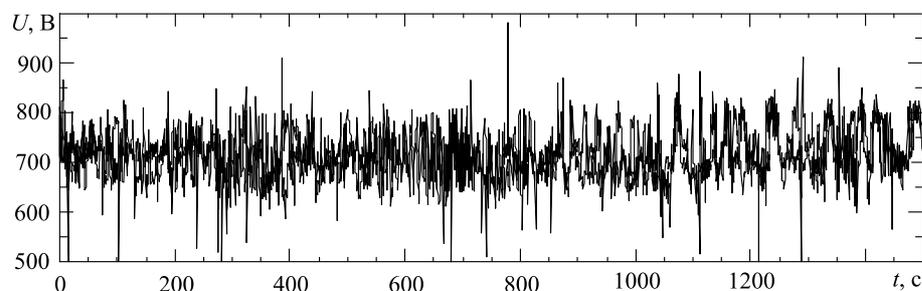
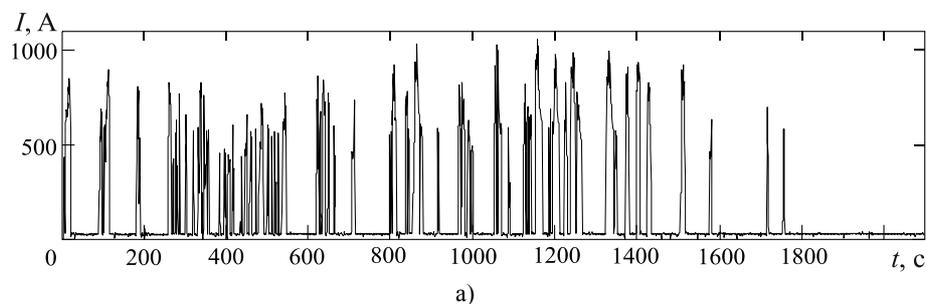
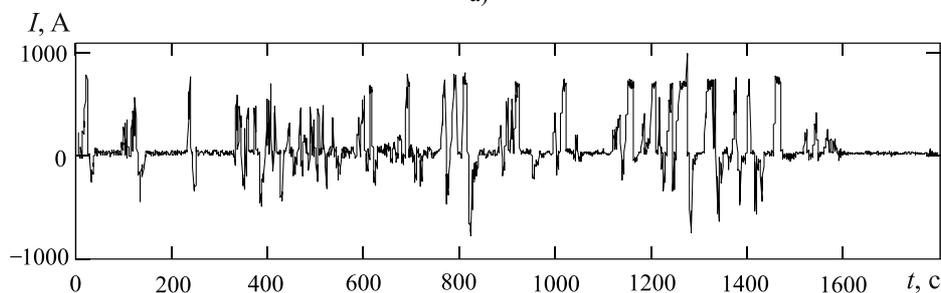


Рис. 1. Временные реализации напряжения на токоприемнике трамваев



а)



б)

Рис. 2. Реализации случайного процесса тягового тока трамваев (на 2 вагона): с реостатным регулированием [10] (а); с импульсным регулированием (реализация приведена с рекуперацией) (б)

Целью данной работы является, оценить фактические значения коэффициента λ реально действующих трамваев. Но при этом учтем, что, хотя λ и является в настоящее время отчетным энергетическим

показателем, он не всегда достаточно точно характеризует энергетические процессы в системе. Поэтому в последние 8...10 лет в системах электрической тяги, подобно промышленной электроэнергетике, в качестве отчетной энергетической величины используют коэффициент реактивной мощности $tg\varphi$, который энергетически является более практическим показателем. Действительно, например, при $\lambda = 0,95$ величина $tg\varphi = 0,329$, то есть хотя λ близок к единице, но потребляемая реактивная мощность составляет почти 1/3 от активной мощности, то есть, сравнительно велика. В этой связи в данной работе дана оценка обоих коэффициентов, λ и $tg\varphi$, трамваев двух типов.

Теоретические предпосылки

Как известно [4] и согласно ДСТУ 2843-94 и ДСТУ 3120-95, для электрических цепей с детерминированными периодическими несинусоидальными электрическими величинами коэффициент мощности λ устройства (системы) определяют как отношение активной мощности P , потребляемой устройством в рассматриваемом режиме, к его полной мощности S :

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}, \quad (1)$$

а коэффициент реактивной мощности $tg\varphi$ – как отношение потребляемых реактивной Q и активной P мощностей:

$$tg\varphi = \frac{Q}{P}. \quad (2)$$

Учитывая случайный характер питающего напряжения $U(t)$ и тягового тока $I(t)$ трамваев, величины мощностей S, P, Q определяли, согласно [5], исходя из следующих соображений.

Активную мощность находили исходя из существующего общего понятия, что она равна среднему арифметическому значению за период мгновенной мощности $p(t)$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) \cdot I(t) dt. \quad (3)$$

Так как $U(t), I(t)$ – непериодические случайные функции, то найдем P как среднее арифметическое дискретных мгновенных значений мгновенной мощности за время поездки на данном участке:

$$P = \frac{\sum_{k=1}^n p_k}{n} = \frac{\sum_{k=1}^n U_k I_k}{n}. \quad (4)$$

Полную мощность S определим универсальной формулой

$$S = UI, \quad (5)$$

где U, I – действующие значения реализаций напряжения и тока за время поездки:

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n U_k^2}{n}}, \quad I = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n I_k^2}{n}}, \quad (6)$$

где в (4) и (6) p_k, U_k, I_k – дискретные значения соответственно мгновенной мощности, напряжения и тока в произвольный момент времени t_k поездки; n – общее количество точек дискретизации реализации случайных функций $p(t), U(t), I(t)$ [1, 5].

Для определения реактивной мощности Q , как известно [6], предложено много методов и этот вопрос остается дискуссионным до настоящего времени. Согласно [6, 7], наиболее перспективным подходом к определению Q является концепция Фризе [8], согласно которой

$$Q = Q_{\phi} = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad (7)$$

где Q_{ϕ} – реактивная мощность по Фризе, названная им «неактивной составляющей полной мощности».

Анализируя коэффициенты λ и $tg\varphi$, всегда подразумевают их количественную меру, которая при установившемся режиме работы устройства есть величина неизменная, поскольку определяют эти показатели по рассмотренным выше мощностям, являющимися интегральными характеристиками энергетического процесса. Поэтому выражениями (1) и (2) определяются интегральные величины λ и $tg\varphi$. В то же время, в связи с непрерывным изменением режима работы трамвая, будут изменяться потребляемые активная и полная мощности, а согласно (1) и (2) и коэффициенты мощности. Таким образом, энергоэффективность работы трамвая в эксплуатации невозможно оценить в полной мере с помощью интегральных показателей, которые в частых переходных режимах являются усредненными величинами. Поэтому для оптимального энергорегулирования в такой системе необходимо также рассматривать энергетические показатели в режиме реального времени – как мгновенные функции, соответственно $\lambda(t)$ и $tg\varphi(t)$; выполним это для $\lambda(t)$. Однако в классической электротехнике и в теории электрической тяги не предусмотрено понятия мгновенного коэффициента мощности поскольку он определяется для установившегося режима работы устройства [9]. Поэтому, в качестве примера, определим мгновенную величину коэффициента мощности исходя из общего понятия и интегрального выражения (1) в виде следующей функции

$$\lambda(t) = \frac{P(t)}{S(t)}, \quad (8)$$

где $P(t)$ и $S(t)$ – мгновенные соответственно потребляемая активная и подведенная полная мощности трамвая.

Для получения функций $P(t)$ и $S(t)$ запишем интегральное выражение коэффициента мощности трамвая за произвольный период времени T его работы через значения мгновенных величин напряжения и тока

$$\lambda = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T U(t)I(t)dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t)dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t)dt}}. \quad (9)$$

Реализации функций $U(t)$ и $I(t)$ в этом выражении на рассматриваемом промежутке времени T дискретизируем на N равных интервалов $\Delta T = T_{n+1} - T_n$, а в пределах интервала ΔT , в свою очередь, разделим $U(t)$ и $I(t)$ на M равных интервалов $\Delta t = t_{m+1} - t_m$ (рис. 3). Таким образом, получаем что $T = N\Delta T$, а $\Delta T = M\Delta t$, тогда квантованные функции напряжения и тока содержат $N \cdot M$ значений.

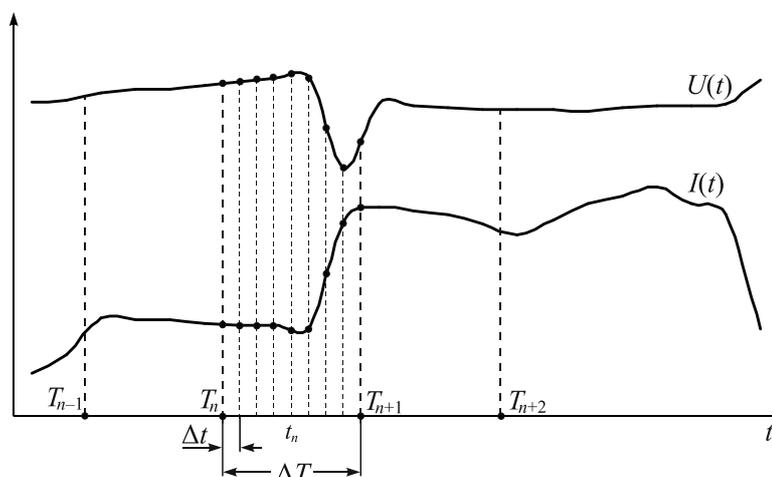


Рис. 3. К определению мгновенного коэффициента мощности

Далее введем ранжированную переменную $n = 1, 2, \dots, N$, и в результате на N участках времени T определим N значений активной P_n и полной S_n мощностей по M значениям напряжения и тока, т.е. через интервалы времени $T_n = \Delta T, 2\Delta T, \dots, N\Delta T$. Тем самым определим неизменные значения мощностей и, соответственно, коэффициент мощности в пределах каждого участка ΔT . Тогда для интервала времени ΔT (рис. 3) можно записать значение коэффициента мощности как интегральной величины в виде:

$$\lambda(\Delta T) = \frac{\frac{1}{\Delta T} \int_{T_n}^{T_n+\Delta T} U(t)I(t)dt}{\sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{T_n}^{T_n+\Delta T} U^2(t)dt} \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{T_n}^{T_n+\Delta T} I^2(t)dt}} \approx \frac{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M U_m I_m \Delta t}{\sqrt{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M U_m^2 \Delta t} \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M I_m^2 \Delta t}}, \quad (10)$$

где в числителе приведена потребляемая активная мощность на интервале времени ΔT , а в знаменателе – полная мощность за тот же интервал. Если определить предел выражения (10) при $\Delta T \rightarrow 0$ и $\Delta t \rightarrow 0$ (а, соответственно, $N \rightarrow \infty$ и $M \rightarrow \infty$), причем $\Delta t \ll \Delta T$, то есть, величина Δt – малая более высокого порядка, чем ΔT , тогда (10) будет стремиться к значению λ в данный момент времени t , то есть, к мгновенной величине коэффициента мощности $\lambda(t)$:

$$\lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ \Delta T \rightarrow 0}} \frac{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M U_m I_m \Delta t}{\sqrt{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M U_m^2 \Delta t} \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \sum_{m=1}^M I_m^2 \Delta t}} \rightarrow \lambda(t). \quad (11)$$

Поскольку в пределах каждого из интервалов ΔT величины P, S и соответственно λ неизменны, то выражение (11) позволяет отслеживать их изменение на остальных возможных отрезках времени ΔT , т.е. получать функции $P(t), S(t)$ и, в результате, $\lambda(t)$. В силу случайности процессов $U(t)$ и $I(t)$ трамвая функция изменения $\lambda(t)$ также будет случайной.

Методика экспериментальных исследований

Для определения мощностей P, S, Q по формулам (4), (5), (7) было получено 6 реализаций напряжения $U(t)$ и тока $I(t)$ трамваев типа Т-3Д с плавным регулированием мощности, эксплуатируемых на линиях горэлектротранспорта Днепропетровска, а также, в целях анализа, использованы 4 осциллограммы $U(t)$ и $I(t)$ трамвая Т-3 с реостатным регулированием напряжения, приведенные в [10]. Качественное и количественное сравнение реализаций $U(t)$ и $I(t)$ трамваев, полученных в работе и взятых из [10], свидетельствует об одинаковом характере их изменения. Продолжительность каждой из реализаций случайных процессов напряжения и тока составила 30 мин. Измерение реализаций $U(t)$ и $I(t)$ трамвая Т-3Д в данной работе, а также в [10] осуществляли путем подключения портативного персонального компьютера (ПК) (рис. 4) к портам контрольно-измерительной системы трамвая, состоящей из датчиков напряжения и тока, подключенных к силовым шинам тяговой цепи вагона, а также аналого-цифрового преобразователя и устройства сопряжения (адаптера) с внешними устройствами.

На рис. 4 показаны датчик тока (LEM(I)), включенный последовательно с силовой цепью трамвая, и датчик напряжения (LEM(U)), включенный параллельно, где силовая цепь трамвая условно обозначена переменным резистором R (для трамвая с реостатным регулированием) или силовым (IGBT) транзистором VS (для тиристорного трамвая с плавным регулированием). В качестве датчиков использовали индукционные датчики фирмы LEM, работа которых основана на эффекте Холла. Вырабатываемый в них сигнал пропорционален реальной измеряемой электрической величине, который после аналого-цифрового преобразователя (А/С) через адаптер в режиме реального времени выводится на внешнее устройство (ПК), где записывался с необходимой частотой дискретизации.

Каждую из полученных реализаций обрабатывали с временным интервалом дискретизации Δt , найденным согласно с теоремой Котельникова [11]:

$$\Delta t \leq \frac{0,5}{f_b},$$

где f_b – максимальная (верхняя) частота спектра исследуемых функций $U(t)$ и $I(t)$.

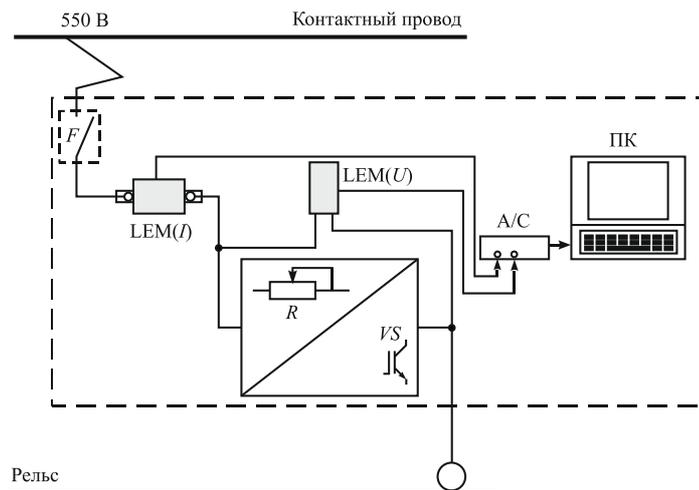


Рис. 4. Принципиальная блок-схема для мониторинга случайных процессов $U(t)$ и $I(t)$ в силовой цепи трамваев [10]

Результаты численных расчетов коэффициентов

Пользуясь экспериментально полученными реализациями тяговых напряжения $U(t)$ и тока $I(t)$, были рассчитаны по формулам (4) – (7) мощности P, Q, S , а затем по выражениям (1), (2) и (11) и коэффициенты $\lambda, tg\varphi$ и $\lambda(t)$.

Как вытекает из анализа полученных для трамваев типа Т-3Д и Т-3 регистрограмм и осциллограмм, представленных в частности на рис. 1 и 2, напряжение на токоприемнике $U(t)$ и тяговой ток $I(t)$ трамваев характеризуются значительными непрерывными колебаниями во времени. Анализ показывает, что при необходимом номинальном напряжении в тяговом режиме $U_{ном} = 550 В$ фактические его значения изменяются в пределах 500...850 В у реостатного и 510...980 – тиристорного (с рекуперацией) трамваев. Тяговой ток при эксплуатации изменяется в диапазоне от величины тока холостого хода (тока вспомогательных машин) при выбеге до 1050 А. По сравнению с напряжением и током электровозов реализации $U(t)$ и $I(t)$ трамваев имеют более колебательный характер. Это объясняется тем, что весь период работы электровоз с поездом является более инерционной системой, скорость его движения при управлении изменяется медленнее, чем у трамвая, а, соответственно, более плавно изменяются и потребляемые токи, и напряжение на токоприемнике. У трамвая же частые ускорения и замедления – разгоны и торможения – необходимы на коротких участках между остановками. Кроме этого, режим управления в условиях городского движения делает трамвай для тяговой сети более динамичной, резко переменной нагрузкой. Отметим также, что у троллейбусов в условиях осложненного хаотичного движения автотранспорта, тяговая нагрузка еще более изменчива.

Вероятностные характеристики напряжения и тока приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип трамвая	Вероятностные характеристики напряжения и тока							
	Вероятностные характеристики							
	$m_U,$ В	$m_I,$ А	$\sigma_U,$ В	$\sigma_I,$ А	$M_{0U},$ В	$M_{0I},$ А	$M_{eU},$ В	$M_{eI},$ А
Реостатный	718	409	50	307	733	26	711	472
Тиристорный	713	255	48	245	722	44	711	155

Коэффициент мощности λ и коэффициент реактивной мощности $tg\varphi$, рассчитанные по реализациям случайных функций напряжения и тока, являются случайными величинами. Они зависят от многих факторов, основные из которых: профиль участка пути, весовая нагрузка пассажиров, режим управления, т. е. квалификация водителя трамвая и др. Результаты расчетов мощностей и коэффициентов λ и $tg\varphi$ для одной реализации режима работы реостатного трамвая и трамвая с импульсным регулированием приведены в табл. 2, из которой вытекает, что для всех исследованных квазиустановившихся режимов работы обоих типов трамваев, во-первых, коэффициент мощности λ заметно меньше нормативного значения, равного 0,92 ... 0,95, и составляет 0,308 ... 0,825, а коэффициент $tg\varphi$ существенно превышает нормативное значение 0,25 и заключен в диапазоне 3,09 ... 0,686. Во-вторых, в режиме с выбегам и без

рекуперации λ трамваев равен 0,562, то есть меньше, а $tg\varphi$ равен 1,473, то есть больше, чем у электро-возов ДЕ1 и ВЛ8, для которых λ и $tg\varphi$ соответственно составили: 0,75 ... 0,87; 0,882 ... 0,56 (для ДЕ1) и 0,58 ... 0,71; 1,519 ... 0,992 (для ВЛ8). В-третьих, выбеги и режим рекуперации существенно снижают λ до 0,308 и повышают $tg\varphi$ до 3,09; собственно в режиме рекуперации $\lambda = 0,466$, а $tg\varphi = 1,93$.

Таблица 2

Результаты расчетов мощностей и коэффициентов λ и $tg\varphi$ в квазиустановившихся режимах работы трамваев

Энергетические величины		U , В	I , А	P , кВт	S , кВА	Q_{ϕ} , квар	λ	$tg\varphi$	
Тип трамвая	С реостатным регулированием	С выбегам	714	312	116,1	222,8	190,2	0,521	1,638
		Без выбегов	699	512	281,7	357,9	220,8	0,787	0,784
	С импульсным регулированием	Без рекуперации, с выбегам	706	269	106,7	190,0	157,2	0,562	1,473
		Без рекуперации и выбегов	697	345	198,3	240,5	136,1	0,825	0,686
		С рекуперацией и выбегам	711	254	55,6	180,6	171,8	0,308	3,090

Меньшая величина коэффициента мощности трамваев, по сравнению с λ электро-возов (и большее значение $tg\varphi$) объясняется более интенсивным характером колебаний тягового тока трамвая вследствие большей нестационарности электропотребления. Как показали расчеты, превалирующее влияние на интегральные величины λ , $tg\varphi$ оказывает явно выраженный резкопеременный случайный характер тягового тока, что обусловлено технологическими факторами эксплуатации трамваев. Влияние изменения напряжения на токоприемнике даже в пределах, указанных в таблице 1, менее заметно. В предположении постоянства напряжения на токоприемнике за время поездки для реализаций тягового тока был рассчитан коэффициент мощности, в результате его значения увеличивались на 3...4 %.

Выше выполнен анализ значений λ и $tg\varphi$ в квазиустановившихся режимах работы трамваев. Более резкие динамичные колебания указанных коэффициентов наблюдаются в переходные режимы, точнее при сбросе нагрузки и последующем пуске трамвая, что четко прослеживается в поведении зависимости мгновенных значений коэффициента мощности $\lambda(t)$, полученных на основании формулы (11) и представленных на рис.5, б. Из рис. 5 также следует, что мгновенное значение коэффициента мощности значительно снижается в те моменты, когда происходит резкое изменение потребляемого тока (нарастание или убывание), т. е. в моменты искажения формы тягового тока и соответственно напряжения на токоприемнике.

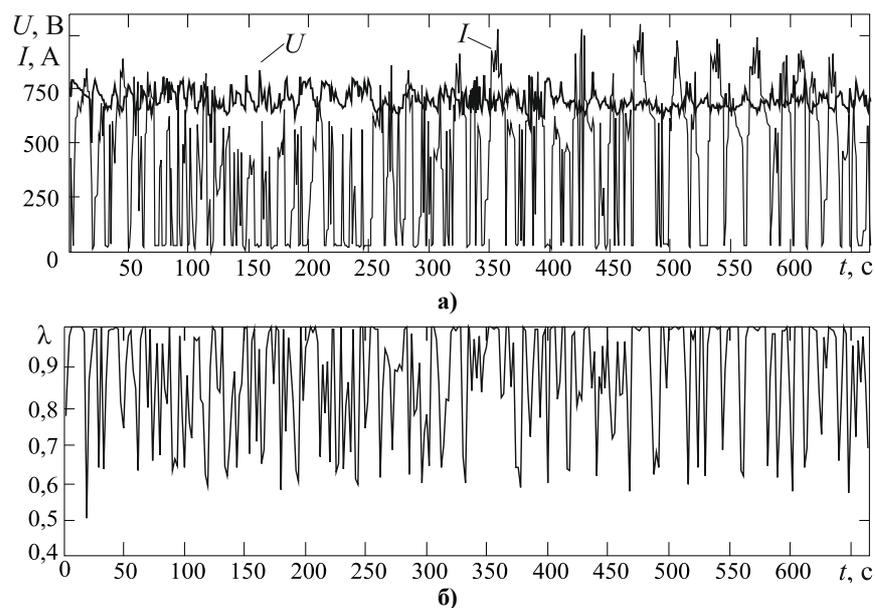


Рис. 5. Реализации напряжения на токоприемнике $U(t)$ и тягового тока $I(t)$ реостатного трамвая (а) и соответствующий им график реализации мгновенного коэффициента мощности $\lambda(t)$ (б) согласно (11)

В заключение заметим, что низкие значения коэффициента мощности λ и большие значения коэффициента $tg\varphi$ свидетельствуют о повышенном потреблении неактивной мощности трамваем. Следствием этого является дополнительная нагрузка электрооборудования трамвая и тяговой сети реактивным током, а в результате, и увеличенный расход электроэнергии на тягу. Поэтому, вне всякого сомнения, и в этой системе электрического транспорта необходимо применение различных мероприятий по компенсации реактивной мощности трамваев.

Выводы

1. Система «трамвай», классифицируясь как система электрического транспорта постоянного тока, является по сути системой переменных напряжения и тока.
2. Резко несинусоидальный случайный характер изменения тяговых напряжения и тока (особенно тока) обуславливают очень низкие значения коэффициента мощности и очень высокие значения коэффициента реактивной мощности трамвая.
3. Особенно отрицательное влияние на указанные энергетические коэффициенты оказывают режимы: сброс нагрузки; выбег; последующее резкое наращивание тягового тока; рекуперация.
4. Для улучшения энергетических характеристик трамвая необходимы разработка и применение мероприятий по уменьшению его реактивной мощности, потребление которой вызвано причинами технологического характера.

Список литературы

1. Костин Н. А. Коэффициент мощности электроподвижного состава постоянного тока / Н. А. Костин, О. И. Саблин // *Электротехніка і Електромеханіка*. – 2005, № 1. – С. 97 – 100.
2. Костин Н. А., Шейкина О. Г. Коэффициент реактивной мощности электрического транспорта постоянного тока // *Технічна електродинаміка*. Темат. вип. Силовая электроника и энергоэффективность. Часть 4, 2008. – С. 72 – 75.
3. Саблін О. І., Нікітенко А. В. Вплив рекуперації та вибігу електрорухомого складу на його енергетичні показники // *Електрифікація транспорту*. Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2011, № 2. С. 44 – 46.
4. Костін М. О., Шейкіна О. Г. Теоретичні основи електротехніки. Том 1. Підручник. Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2006. – 336 с.
5. Костін М. О.. Методи визначення потужностей в системах зі стохастичними електроенергетичними процесами // *Технічна електродинаміка*. Частина 6, 2006. – С. 6 – 8.
6. Тонкаль В. Е., Новосельцев А. В., Денисюк С. П., Жуйков В. Я., Стрелков В. Т., Яценко Ю. А. Баланс энергий в электрических цепях. – Киев: Наук. думка, 1992. – 312 с.
7. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Современная концепция реактивной мощности // *Вестник Приазовского государственного университета*. Мариуполь. – 1995, № 1. – С. 192 – 197.
8. S. Fryze. Wirk – Blind – und Schein – leistung in elektrischen stromkreisen min nichtsinusformigen Verf af von Strom und Spannung // *Elektrotechn. Z.* – 1932. – 25. – S. 596 – 599; 26. – S. 625 – 627; 29. – S. 700 – 702.
9. Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н. Теория электрической тяги. Учебник. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
10. Czuchra W. Ocena energochlonnosci tramwajow z napędem asynchronicznym / W. Czuchra, J. Prusak, W. Zajac // 7th International Conference «Moder Electric transport in Integrated XXI st Century Europe», Poland, Warsaw, 2005. – P. 160 – 164.
11. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / И. С. Гоноровский. – М.: Сов. радио, 1977. – 608 с.

КОЭФФИЦИЕНТЫ МОЩНОСТИ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ТРАМВАЕВ / Костин Н.А., Саблин О.И., Шейкина О.Г., Никитенко А.В./ *Гірничя електромеханіка та автоматика*: Наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 91 – С. 124-131

В статье на основе полученных реализаций тягового напряжения и тока трамваев типа Т-3Д с плавным регулированием мощности, выполнены расчеты активной, реактивной и полной мощностей, с помощью которых были определены фактические значения коэффициента мощности и коэффициента реактивной мощности реально действующих трамваев с реостатным и импульсным регулированием.

КОЕФІЦІЄНТИ ПОТУЖНОСТІ І РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТРАМВАЇВ / Костін М.О., Саблін О.І., Шейкіна О.Г., Нікітенко А.В./ Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 91 – С. 124-131

В статті на основі отриманих реалізацій тягової напруги та струму трамваїв типу Т-3Д з плавним регулюванням потужності виконано чисельні розрахунки активної, реактивної та повної потужностей, що дозволило визначити фактичні значення коефіцієнта потужності і коефіцієнта реактивної потужності реально діючих трамваїв з реостатним та імпульсним регулюванням.

COEFFICIENTS OF POWER AND REACTIVE POWER OF TRAMS / Kostin M. O., Sablin O. I., Sheikina O. G., Nikitenko A. V. / Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 91 – С. 124-131

In the paper the numerical calculations of active, reactive and total powers are done using the voltage-current records of the trams T-3D with smooth regulation of running power. It allows to define the power coefficients and the coefficient of reactive power for the trams with rheostatic and pulse control.