

В.Г. Кузнецов, д-р техн. наук, проф., О.И. Саблин, канд. техн. наук, доц., П.В. Губский, аспирант, Е.Г. Колыхаев, аспирант

(Украина, г. Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)

АНАЛИЗ РЕЗЕРВОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ НА ПОЕЗДАХ ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Аннотация. Цель. Теоретическая и экспериментальная оценка резервов энергосбережения при использовании режима рекуперации энергии в условиях Днепропетровского метрополитена. **Методы исследований.** Оценка резервов энергосбережения выполнена экспериментально по уровню генерированной энергии в режиме реостатного торможения по отношению к расходу энергии на тягу. **Результаты.** В условиях Днепропетровского метрополитена существует резерв энергосбережения при использовании рекуперации электроэнергии, составляющий соответственно 14...34 % в прямом (на эквивалентном подъеме 8 ‰) и 38...52 % в обратном (на соответствующем спуске) направлениях. **Научная новизна и практическая ценность.** Установленные количественные и качественные показатели режимов рекуперации энергии поездов метрополитена могут быть использованы при выборе рациональных мероприятий по эффективному использованию энергии торможения поездов.

Анотация. Мета. Теоретична і експериментальна оцінка резервів енергозбереження при використанні режиму рекуперації енергії в умовах Дніпропетровського метрополітену. **Методи досліджень.** Оцінка резервів енергозбереження виконана експериментально за рівнем генерованої енергії у режимі реостатного гальмування по відношенню до витрати енергії на тягу. **Результати.** В умовах Дніпропетровського метрополітену існує резерв енергозбереження при використанні рекуперації електроенергії, що становить відповідно 14...34 % в прямому (на еквівалентному підйомі 8 ‰) і 38...52 % у зворотному (на відповідному узвозі) напрямках. **Наукова новизна і практична цінність.** Встановлені кількісні та якісні показники режимів рекуперації енергії поїздів метрополітену можуть бути використані при виборі раціональних заходів щодо ефективного використання енергії гальмування поїздів.

Abstract. Goal. Theoretical and experimental evaluation of reserves of energy saving when using energy recovery in terms of Dnipropetrovsk metro. **Research methods.** Evaluation of reserves of energy saving is carried out experimentally on the level of energy generated in the dynamic braking mode to the energy consumption for traction. **Results.** In terms of the Dnipropetrovsk metro, there is a reserve of energy saving when using the regeneration energy gap of, respectively, 14...34 % direct (in equivalent t-EME 8 ‰) and 38...52 % return (in the appropriate descending) directions. **Scientific novelty and practical value.** Established quantitative and qualitative indicators of energy recovery of metro trains can be used for selecting rational actions on the efficient use of braking energy of trains.

Ключевые слова: метрополитен, тяговая нагрузка, электропотребление, рекуперация, резерв энергосбережения.

Ключові слова: метрополітен, тягове навантаження, електроспоживання, рекуперація, резерв енергозбереження.

Keywords: underground, railway traction load, power consumption, heat recovery, the reserve of energy saving.

Введение

Расход электроэнергии на движение поездов метрополитена сегодня составляет около 75...85 % от общего энергопотребления данного вида транспорта, что является значительной составляющей себестоимости пассажирских перевозок. Учитывая, что режимы движения электропоездов метрополитена связаны с частыми ускорениями и торможениями, одним из основных резервов снижения энергоемкости метрополитена является использование рекуперации электроэнергии, которая при рациональных режимах движения позволяет на 30...50 % уменьшить потребление энергии на тягу.

Обзор литературы

Первым этапом решения задачи выбора энергосберегающих мероприятий является определение технического потенциала энергосбережения, который можно рассматривать как для отдельного i -го энергосберегающего мероприятия на k -м ($k = k \in K$) элементе (объекте) энергетической системы, так и для различных множеств таких мероприятий i , $i \in I$ [1].

Этот потенциал может рассчитываться как в абсолютном выражении (1), так и в относительных единицах (2):

$$\Pi_{KI}^A = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left[K_j \left(w_{k_i}^B - w_{k_i}^P \right) T_{k_i} \right], \quad (1)$$

$$\Pi_{KI}^O = \frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left[K_j \left(w_{k_i}^B - w_{k_i}^P \right) T_{k_i} \right]}{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left(K_j w_{k_i}^B T_{k_i} \right)}. \quad (1)$$

где Π_{KI}^A , Π_{KI}^O – соответственно абсолютный и относительный потенциалы энергосбережения; $w_{k_i}^B$,

$w_{k_i}^P$ – потребление топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) соответственно до и после реализации энергосберегающего мероприятия в условных единицах измерения (если рассматривается экономия более одного вида ТЭР). Если рассматривается только один вид ТЭР, то в этом случае потенциал может рассчитываться в натуральных единицах; j – индекс вида ТЭР, $j \in J$; K_j – коэффициент перевода натуральных единиц измерения в условные; T_{k_i} – период времени, для которого рассчитывается снижение расходов ТЭР для соответствующего энергосберегающего мероприятия.

Специфическим для существующих систем тягового электроснабжения является наличие системного эффекта [1]. Внедрение энергосберегающих мероприятий на низших классах напряжения вызывает дополнительное снижение потерь электроэнергии на более высоких классах напряжения в питающих линиях электропередач и трансформаторах. Величина этого дополнительного эффекта будет определяться характеристиками элементов, входящих в системы электроснабжения, а также всеми связями между ними. При этом потенциал энергосбережения системы электроснабжения представляет собой совокупность потенциалов энергосбережения составных элементов и может быть рассчитан как сумма значений потенциалов отдельных элементов.

Рассмотрим вопрос о реализации потенциала энергосбережения при использовании энергии рекуперации в условиях Днепетровского метрополитена. В настоящее время эксплуатация современного энергосберегающего подвижного состава с плавным регулированием мощности открывает широкие возможности для использования режима рекуперации энергии практически до остановки транспортного средства. Решение вопроса относительно эффективности применения рекуперативного торможения, оптимального распределения, накопления или инвертирования рекуперативной энергии в метрополитенах связано с анализом режимов работы электропоездов, системы тягового электроснабжения и организации движения, что необходимо для обеспечения передачи энергии поездам, находящимся в режиме тяги.

До настоящего времени в метрополитенах Украины эксплуатируемый парк электропоездов преимущественно состоит из вагонов серии 81-717(714).5М с контактным регулированием мощности и реостатным торможением [2]. Отсутствие системы рекуперативного торможения на эксплуатируемых вагонах метрополитенов приводит к существенному увеличению общего количества потребляемой энергии на тягу за счет значительных потерь энергии в пуско-тормозных реостатах. Перспектива закупки новых вагонов для метрополитенов Украины и модернизация существующих системой рекуперации требует предварительной теоретической и экспериментальной оценки потенциала энергосбережения при использовании режимов рекуперации.

Теоретическая оценка резерва энергосбережения при использовании рекуперации энергии в системе электрической тяги осуществляется путем выполнения тяговых расчетов с решением тормозной задачи, где при известных параметрах участков, скорости начала торможения и массы поезда определяется максимальная энергия рекуперации поездов, которая может быть реализована в конкретных условиях эксплуатации. В таком случае максимальное количество энергии, которое может быть сгенерировано электропоездом при торможении для остановки, снижения или стабилизации скорости определяется уменьшением его кинетической и потенциальной энергий [3], т.е.

$$\max W_{\text{рек}} = \left(0,01073(1 + \gamma)Q(v_n^2 - v_k^2) - 2,725Q(w_0 \pm i_{\text{экр}})S \right) z_{\text{рек}}, \quad (3)$$

где Q – вес поезда; $(1 + \gamma)$ – коэффициент инерции вращающихся масс поезда; v_n , v_k – скорость соответственно в начале и конце торможения; w_0 – основное удельное сопротивление движению поезда при средней скорости на участке торможения; $i_{\text{экр}}$ – эквивалентный уклон на участке торможения; S – длина тормозного пути; $z_{\text{рек}}$ – КПД электропоезда в режиме рекуперации.

Исследования резервов снижения электропотребления на тягу при использовании на поездах рекуперативного торможения для условий Киевского метрополитена в [4], позволили определить предельные значения энергии рекуперации при торможениях. Авторами установлено, что на умеренно прямых участках возврат энергии в сеть при остановочных торможениях может достигать 60 % от затраченной энергии на тягу, а на участках со спусками возврат может в 2...3 раза превышать потребленную на разгон поезда энергию.

Однако в условиях реальной эксплуатации потенциал энергосбережения кроме параметров, входящих в выражение (3), существенно зависит от режимов тягового электропотребления в зоне рекуперации, что является случайным процессом и зависит от множества эксплуатационных и технических факторов. Вследствие этого, как правило, при торможениях реализуется энергия $W_{\text{рек}} \leq \max W_{\text{рек}}$ равная

$$W_{\text{рек}} = \max W_{\text{рек}} k_{\text{исп}}, \quad (4)$$

где $k_{\text{исп}}$ – коэффициент использования энергии рекуперации.

При отсутствии на тяговых подстанциях (ТП) устройств приема избыточной энергии рекуперации (накопителей или инверторов) величина $k_{\text{исп}}$ находится в диапазоне 0...1 и непосредственно определяется режимом напряжения на токоприемнике $U_{\text{т}}(t)$ рекуперирующего поезда

$$k_{\text{исп}}(U_{\text{т}}(t)) = \begin{cases} 1, & \text{при } U_{\text{т}}(t) < U_{\text{т}}^{\text{max}}, \\ 0, & \text{при } U_{\text{т}}(t) \geq U_{\text{т}}^{\text{max}}, \end{cases} \quad (5)$$

где $U_{\text{т}}^{\text{max}}$ – предельно допустимое напряжение на токоприемнике и в контактной сети метрополитена [5].

Промежуточные значения величины $k_{\text{исп}}$ в указанном диапазоне соответствуют случаю с ограниченным тяговым электропотреблением в зоне рекуперации, при котором имеет место избыточная (нереализованная) энергия рекуперации

$$\Delta W_{\text{рек}} = \max W_{\text{рек}} - W_{\text{рек}} = \max W_{\text{рек}} (1 - k_{\text{исп}}), \quad (6)$$

которая при отсутствии на ТП метрополитена устройств приема избыточной энергии рекуперации утилизируется в тормозных реостатах поездов, чем существенно снижается эффективность энергосбережения от рекуперации. При малых размерах и неблагоприятных графиках движения поездов (по условиям рекуперации) энергия $\Delta W_{\text{рек}}$ может достигать 30...100 % от величины $\max W_{\text{рек}}$ [6-9].

При отсутствии интеллектуальных принципов управления режимом движения поездов регулирование лишь их положений (графика движения) на участке не может гарантированно обеспечить на участках одновременного совпадения во времени процессов рекуперации и электропотребления. В таком случае даже при наличии систем рекуперации на всем парке вагонов метрополитена показатель возобновления энергии при существующих размерах и режимах движения поездов не превышает 15...20 % от значения, полученного по формуле (3) [6]. Поэтому для объективной оценки существующего потенциала рекуперации энергии метрополитенов должны применяться нечеткие или статистические методы, учитывающие их реальную структуру, размеры движения и графики электропотребления электропоездов, режимы напряжения в тяговой сети.

Частичное или полное разделение во времени процессов рекуперации и электропотребления может быть достигнуто за счет использования сверхмощных накопителей [7, 8], позволяющих полностью решить проблему использования избыточной энергии рекуперации. Кроме этого, внедрение накопителей в тяговом электроснабжении поездов позволит значительно стабилизировать тяговую нагрузку относительно системы внешнего электроснабжения и улучшить энергетические показатели электрической тяги на присоединениях к питающим сетям. При этом надо отметить, что задача оптимального расположения накопительного элемента в системе неавтономного электротранспорта на сегодня является нерешенной.

Возврат избыточной рекуперативной энергии через ТП метрополитена в питающую сеть 6 (10) кВ требует использования на ТП инверторов, а эффективность данного мероприятия существенно зависит от режимов нагрузок данной сети в точках подключения ТП. Учитывая, что энергия рекуперации электропоездов носит кратковременный характер, ее непосредственная передача в первичную энергосистему может вносить в нее значительные искажения и ухудшать работу нетяговых потребителей [9, 10].

Таким образом, потенциал энергосбережения в метрополитенах при использовании рекуперации электроэнергии зависит от многих, в том числе случайных, факторов, среди которых можно выделить [11]:

- степень комплектации парка вагонов метрополитена системой рекуперации;
- уклоны участков обращения и степень неоднородности расстояний между остановками;
- графики движения поездов;
- управление режимом движения поездов;
- режим напряжения на вводах ТП;
- наличие в системе тягового электроснабжения накопителей или инверторов электроэнергии.

Цель работы

Теоретическая и экспериментальная оценка резервов энергосбережения от использования рекуперации электроэнергии в условиях Днепропетровского метрополитена.

Основной материал

Оценка потенциала энергосбережения в метрополитене при использовании режима рекуперации энергии на базе Днепропетровского метрополитена была выполнена экспериментально, для чего были определены показатели расхода и генерации энергии соответственно в режимах тяги и электрического торможения. В связи с тем, что эксплуатируемый парк вагонов метрополитена 81-717(714).5М не оборудован системой рекуперации, оценка потенциала энергосбережения была выполнена по генерируемой энергии поездами при реостатном торможении по отношению ее к расходу на тягу.

На действующем участке метрополитена общей протяженностью 7,8 км с 6 станциями и средним уклоном 8 ‰ был выполнен ряд экспериментальных поездок в штатном режиме, согласно разработанным режимным картам движения электропоездов и в ускоренном режиме, соответствующем увеличенным размерам движения в перспективе. В штатном режиме время движения и средняя скорость между конечными пунктами составляли соответственно 11 мин. и 43 км/ч, а в ускоренном режиме 8 мин и 60 км/ч.

С помощью измерительного комплекса cDAQ-9174 National Instruments были измерены с частотой дискретизации 2 кГц напряжение на токоприемнике $U(t)$ и ток вагона в режиме тяги $I(t)$, напряжение на группе двигателей $U_{дв}(t)$ и их генераторный ток $I_r(t)$ в режиме реостатного торможения, а также скорость движения электропоезда $v(t)$, состоящего из 5 вагонов. Принципиальная схема подключения бесконтактных разъемных датчиков напряжений и токов LEM к силовой цепи вагона приведена на рис. 1.

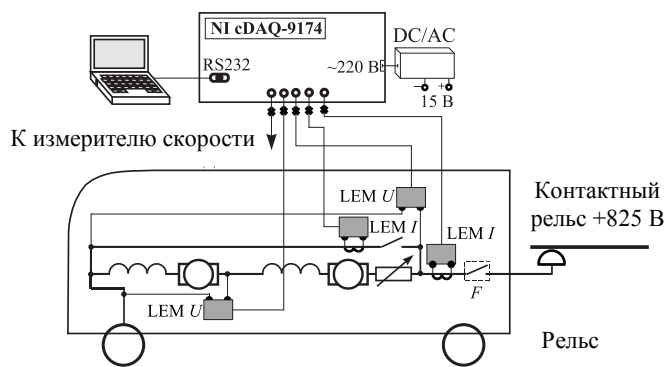


Рис. 1 Принципиальная схема подключения измерительных приборов к силовой цепи вагона электропоезда

В связи с тем, что эксплуатируемый парк вагонов Днепропетровского метрополитена не оборудован системой рекуперативного торможения, оценка показателей эффективности рекуперации была выполнена по уровню генерации поездами энергии при реостатом торможении. Для режима реостатного торможения на электропоездах используется мостовая схема с самовозбуждением и перекрестной схеме питания обмоток возбуждения тяговых электродвигателей. Схема подсоединения датчиков LEM для измерения параметров генерации энергии в режиме реостатного торможения вагона приведена на рис. 2.

До NI cDAQ-9174

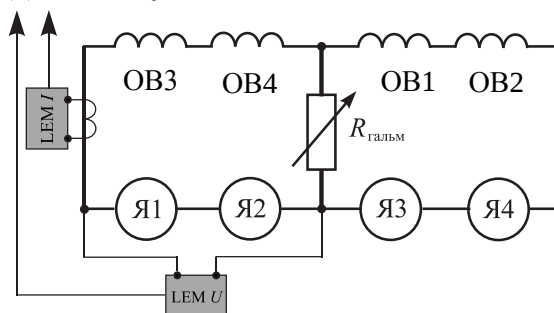
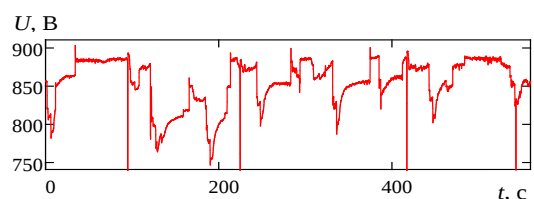
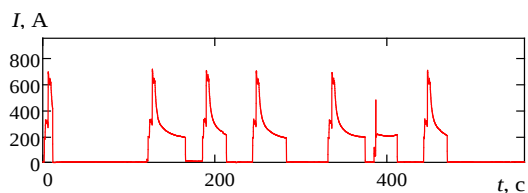


Рис. 2. Схема измерения параметров генерации энергии в цепи тяговых электродвигателей при реостатном торможении вагона

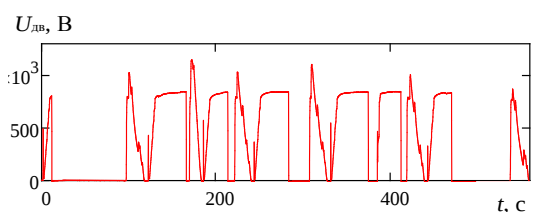
На рис. 3 и 4 представлены временные диаграммы, полученные при синхронизированных измерениях параметров потребления и генерации энергии вагоном электропоезда 81-717(714).5М в ускоренном режиме движения и согласно режимной карте в направлении ст. «Вокзальная» (средний спуск участка 8 ‰).



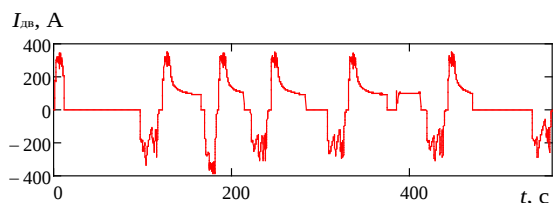
а)



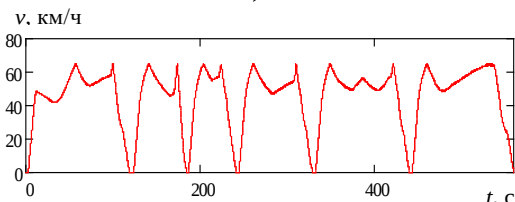
б)



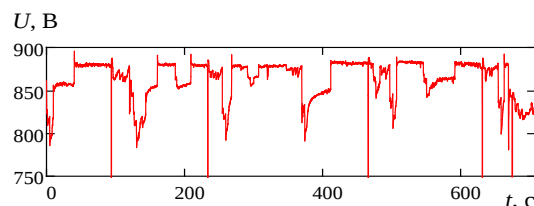
в)



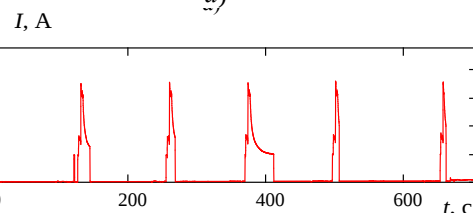
з)



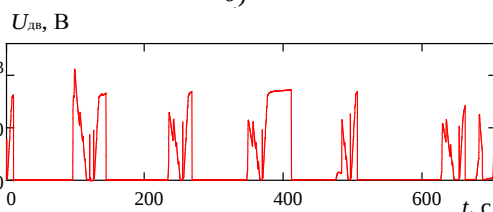
д)



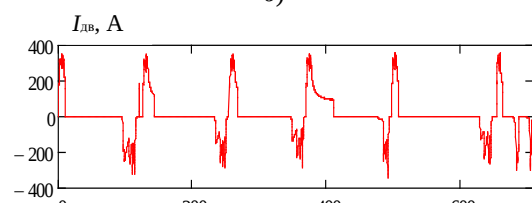
а)



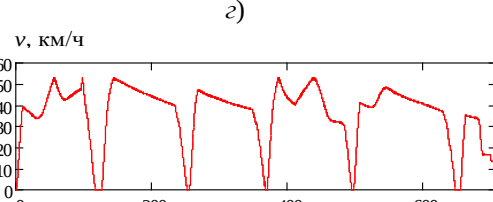
б)



в)



з)



д)

Рис. 3 – Параметры электропотребления, генерации и движения поезда в ускоренном режиме

Рис. 4 – Параметры электропотребления, генерации и движения поезда по режимной карте

а – напряжение на токоприемнике $U(t)$, б – тяговый ток $I(t)$, в – напряжение группы двигателей $U_{дв}(t)$, з – ток группы двигателей $I_{дв}(t)$, д – скорость движения поезда $v(t)$

Поскольку на вагонах 81-717(714).5М отсутствуют счетчики электроэнергии (учет энергии на тягу поездов производится только по вводам ТП) то расход и потенциал рекуперации энергии были определены по результатам полученных осциллограмм в режиме тяги и электрического (реостатного) торможения поезда за время электропотребления (рекуперации) T по выражениям

$$W_{\text{тяги}} = m \int_0^T U(t) I(t) dt, \quad W_{\text{рек}} = m \sum_{i=1}^n \int_{t_{\text{н}i}}^{t_{\text{к}i}} 2U_{\text{дв}}(t) I_{\text{г}}(t) dt, \quad (7)$$

где m – число вагонов в электропоезде; $t_{\text{н}i}$, $t_{\text{к}i}$ – соответственно моменты начала и окончания электрического торможения; n – количество остановок.

В качестве показателя потенциала рекуперации электроэнергии электропоездов был принят коэффициент рекуперации, равный отношению генерируемой при электрическом торможении энергии к ее общему расходу, т.е.

$$k_{\text{рек}} = W_{\text{рек}} / W_{\text{тяг}} \quad (8)$$

Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица

Направление	Режим движения поезда							
	Согласно режимной карте				Ускоренный			
	$W_{\text{тяг}}$, кВт·ч	$W_{\text{рек}}$, кВт·ч	$k_{\text{рек}}$	$v_{\text{ср}}$, км/ч	$W_{\text{тяг}}$, кВт·ч	$W_{\text{рек}}$, кВт·ч	$k_{\text{рек}}$	$v_{\text{ср}}$, км/ч
Вокзальная-Коммунарковская	36,52	5,25	0,144	40	56,12	18,95	0,338	46
Коммунарковская-Вокзальная	26,44	10,15	0,384	36	43,15	22,27	0,516	45

Необходимо отметить, что хотя и в ускоренном режиме потенциал рекуперации электроэнергии превышает потенциал при движении согласно режимной карты, однако удельное электропотребление на тягу в ускоренном режиме на 19,24 % в направлении ст. «Коммунарковская» и на 36,46 % в направлении ст. «Вокзальная» превышает удельное электропотребление при движении согласно режимной карты. Это объясняется тем, что средняя скорость в ускоренном режиме на 30 % выше и на соответствующий процент время хода по участку меньше.

На сегодня в Днепровском метрополитене размеры движения в зависимости от рабочего времени составляют 1-2,5 пары поездов, что почти исключает совпадение во времени режимов их электропотребления и электрического торможения на участках. При таких размерах и организации движения поездов энергия торможения поездов практически не может быть повторно использована на тягу даже при наличии современной системы рекуперации на эксплуатируемых вагонах.

Одним из решений задачи повышения эффективности использования энергии рекуперации в тяговой сети является разработка такого графика движения поездов (ГДП), при котором осуществляется пропуск заданных размеров движения с наибольшим показателем $k_{\text{исп}}$, т.е. обеспечение напряжения на токоприемниках поездов при рекуперации в области допустимых значений.

Для выбора рационального расположения тяговых нагрузок на ГДП по использованию энергии рекуперации в тяговой сети следует рассмотреть ряд реально возможных вариантов графиков. Варианты графиков рассматриваются между смежными тяговыми подстанциями (ТП) в пределах периода следования расчетного поезда. Принцип повышения эффективности использования энергии рекуперации в тяговой сети метрополитенов путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок представлен на рис. 5.

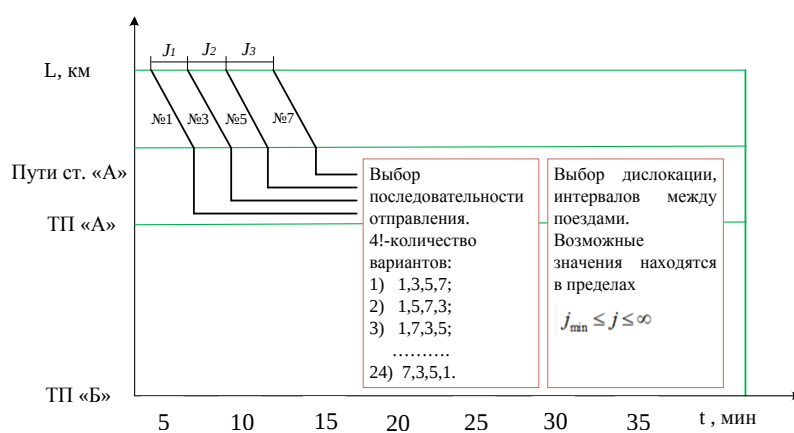


Рис. 5. Принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок

Одним из вариантов повышения эффективности использования энергии рекуперации в тяговой сети метрополитенов за счет оптимизации ГДП может быть выбор рациональных интервалов между поездами [12]. Для постановки данной задачи необходимо ввести обозначения на ГДП в общем виде (рис. 6).

Время пропуска пакета T в общем виде определяется выражением

$$T = \Delta t_1 + J_1 + J_2 + (t_4 - t_3), \quad (9)$$

где Δt_1 – задержка времени отправления первого поезда в пакете, мин;

J_1, J_2 – межпоездные интервалы, мин;

$(t_4 - t_3)$ – время хода последнего поезда в пакете, мин.

Учитывая принятое ограничение, получаем уравнение, определяющее независимые параметры

ГДП:

$$\Delta t_1 + J_1 + J_2 = T - (t_4 - t_3) = \text{const}. \quad (10)$$

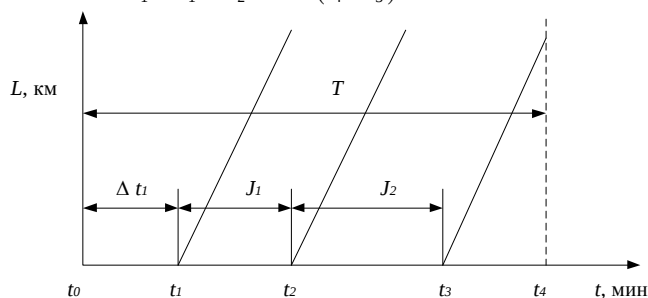


Рис. 6. Расчетная схема параметров графика движения поездов

Для обеспечения адекватного режима моделирования влияния параметров транспортного потока в метрополитене на эффективность использования энергии рекуперации поездов необходимо поддерживать сумму интервалов между поездами при их различных комбинациях постоянной, что практически невозможно при данных размерах движения на действующем участке.

Таким образом, при внедрении системы рекуперативного торможения на подвижном составе Днепропетровского метрополитена, повышение эффективности использования энергии рекуперации при существующих низких размерах движения поездов может быть эффективно реализовано за счет оптимизации ГДП по рассмотренным критериям. В таком случае необходимо использование на ТП метрополитена инверторов или накопителей энергии, что требует соответствующего технико-экономического обоснования.

Выводы.

В условиях Днепропетровского метрополитена существует значительный резерв энергосбережения от применения рекуперации энергии, который составляет соответственно 14...34 % в прямом (на подъеме 8 %) и 38...52 % в обратном (на соответствующем спуске) направлениях, т.е. в среднем 26...43 % от электропотребления на тягу поездов. На сегодня этот резерв не может быть реализован в связи с отсутствием систем рекуперативного торможения на эксплуатируемом парке подвижного состава метрополитена и технических средств эффективного хранения (распределения) рекуперативной энергии при малых размерах движения поездов (1-2,5 пары поездов).

Список литературы

1. Кузнецов В. Г., Костюковский Б. А. Оценка потенциала энергосбережения систем тягового электроснабжения постоянного тока / В. Г. Кузнецов, Б. А. Костюковский // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2012. – № 26. – С. 109-116.
2. Руководство по эксплуатации вагонов метрополитенов моделей 81.714.5 и 81.717.5 / Акционерное общество «Метровагонмаш». – М.: Транспорт, 1993. – 447 с.
3. Быков Е. И. Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование / Е. И. Быков. – М.: Транспорт, 1983. – 447 с.
4. Сулим А.А. Обоснование места установки емкостных накопителей энергии в системах тягового электроснабжения метрополитена / А.А. Сулим. – Научно-производственный журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». – Кременчуг.: КНУ им. М. Остроградского, 2013. Вып. № 2/2013 (22), ч. 2. – С. 282-285.
5. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений: ГОСТ 6962-75 – [Действует с 1977-01-01] – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 3 с.
6. Сопов В.И. Способы повышения эффективности использования энергии электрического торможения подвижного состава // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2012. – URL:<http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43>.
7. Шевлюгин М.В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии: автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук: 05.14.02 / М.В. Шевлюгин; МГУПС. – Москва, 2014. – 49 с.
8. Сулим А.А., Сичев С.Д., Распопин В.Р. Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена / А.А. Сулим, С.Д. Сичев, В.Р. Распопин. – Материалы X междунаучной конференции «Энергоэффективность и энергосбережение в транспорте и строительстве», 2014. – С. 10-12.

технической конф. молодых ученых и специалистов «Электромеханические и энергетические системы, методы моделирования и оптимизации». КНУ им. М. Остроградского. – Кременчуг, 2012. – С. 344.

9. Саблин О. И. Анализ качества рекуперированной электроэнергии в системе электрического транспорта / О. И. Саблин // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков, 2013. – Вип. 38. – С. 186-189.
10. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О.І. Саблін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 6/8 (72). – С. 9-13.
11. Szelaґ A., Maciolek T., Drazek Z., Patoka M. Aspekty efektywności i energooszczędności w procesie modernizacji układów zasilania trakcji tramwajowej // Pojazdy szynowe. Kwartalnik naukowo-techniczny poświęcony zagadnieniom konstrukcji, budowy i badań taboru szynowego. № 3, 2011. P.34-42.
12. Кузнецов В. Г., Калашников К.А. Разработка научных принципов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока путем регулирования транспортного потока / В. Г. Кузнецов, К.А. Калашников // Электрификация транспорта. – 2014. – № 8. – С. 104-109.