

А. М. АФАНАСОВ, С. В. АРПУЛЬ, А. С. МЯСНИКОВ (ДНУЖТ)

Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 373-15-31, эл. почта: afanasof@ukr.net

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ПУСКА АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ПРИ ПИТАНИИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОТ ИОНИСТОРА

Введение

Наличие неэлектрифицированных участков в сети железных дорог Украины требует использования автономного тягового и моторвагонного подвижного состава. В настоящее время данная проблема решается за счёт эксплуатации тепловозов и дизель-поездов. Отсутствие в парке автономного подвижного состава аккумуляторных электровозов и электропоездов объясняется, в основном, высокой себестоимостью и низкими энергетическими показателями современных электрохимических источников энергии [1].

Анализ истории и перспектив развития электрохимических источников показывает, что в ближайшем будущем применение таких накопителей энергии на моторвагонном подвижном составе будет экономически целесообразным и сопоставимым по энергетическим показателям с существующим вариантом питания тягового электропривода от контактной сети [2]. При этом основной проблемой питания тягового электропривода от электрохимических источников будет оставаться ограничение мощности разряда и заряда накопителя (батарей). Режимы пуска и остановочного электрического торможения требуют отбора и возврата энергии со значениями мощности, на порядок большими, чем в установившихся режимах движения электропоезда [3]. Решением данной проблемы может быть применение в качестве дополнительного накопителя энергии ионисторов [4].

Разряд и заряд ионисторов возможен с высокими значениями мощности при незначительных потерях энергии. Плотность накопленной энергии для ионисторов значительно меньше, чем для электрохимических источников, поэтому использование только ионисторов в качестве накопителя энергии будет нецелесообразным. Наиболее рациональным будет решение использования электрохимического источника, как основного накопителя энергии, и ионистора, как дополнительного накопителя, применяемого только в режимах пуска и остановочного торможения. Использование иони-

стора в качестве накопителя электроэнергии позволит применять рекуперативное торможение на дизель-поездах с электрической передачей.

Анализ характеристик пускового режима

Проведем анализ режимов пуска автономного электропоезда на площадке при питании тягового электропривода от ионистора, для этого рассмотрим режим разгона электропоезда, характер которого графически представлен на рис. 1.

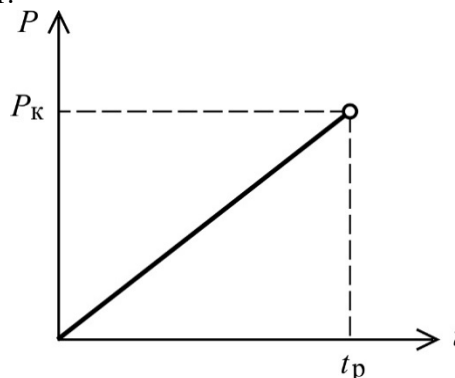


Рис. 1. Характер изменения потребляемой мощности

На рис. 1 представлен характер изменения мощности, потребляемой от ионистора тяговым электроприводом. В данном случае в течение времени разгона от нуля до значения t_p потребляемая мощность прямо пропорциональна времени. Следует отметить, что такое представление характера зависимости $P(t)$ является упрощенным. На самом деле мощность, потребляемая электроприводом при трогании с места, всегда отлична от нуля, кроме того, в реальных системах автоматического пуска электропоездов, как правило, обеспечивается стабилизация либо пускового тока, либо пускового тягового усилия (пускового ускорения), а для данных режимов зависимость $P(t)$ не прямолинейна. Но при проведении данного анализа такое упрощение характера зависимости $P(t)$ вполне допустимо. Таким образом, упрощенно зависимость $P(t)$ может быть представлена в виде

$$P = k_p t,$$

где k_p – коэффициент пропорциональности, характеризующий темп нарастания потребляемой мощности.

$$k_p = \frac{P_k}{t_p},$$

где P_k – мощность, потребляемая электроприводом в конце пуска;

t_p – время разгона электропоезда.

Учитывая то, что сила основного сопротивления движению реального электропоезда в режиме пуска составляет не более 5% от пускового значения силы тяги [3, 5], упрощенно коэффициент k_p для варианта разгона на площадке может быть представлен в виде

$$k_p = \frac{Ma^2}{\eta_{\text{эл}}},$$

где M – масса электропоезда;

a – среднее ускорение при разгоне;

$\eta_{\text{эл}}$ – среднее значение к. п. д. электропривода.

Суммарная энергия, потреблённая из ионистора за время разгона

$$\Delta A_c = \int_0^{t_p} P dt = \frac{1}{2} k_p t_p^2. \quad (1)$$

Эта же энергия может быть представлена в виде

$$\Delta A_c = \Pi_0 - \Pi_k, \quad (2)$$

где Π_0 и Π_k – потенциальные энергии ионистора в начале и конце разгона соответственно.

$$\Pi_0 = \frac{CU_0^2}{2}, \quad (3)$$

$$\Pi_k = \frac{CU_k^2}{2}, \quad (4)$$

где U_0 и U_k – напряжения на ионисторе в начале и конце разгона соответственно;

C – емкость конденсатора.

Объединив формулы (1) – (4), после преобразования получим выражение для определения напряжения на конденсаторе в конце разгона в виде

$$U_k = \sqrt{U_0^2 - \frac{k_p}{C} t_p^2}. \quad (5)$$

Выражение (5) может быть преобразовано к виду

$$U_k = U_0 \sqrt{1 - \alpha t_p^2}, \quad (6)$$

где α – параметр, который для заданного значения U_0 может рассматриваться как постоянный коэффициент.

$$\alpha = \frac{k_p}{CU_0^2}.$$

Время полного разряда (максимальное время разряда) ионистора до значения $U_k = 0$ может быть определено из выражения (6) как

$$t_{pm} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}}.$$

Тогда выражение (6) может быть представлено в виде зависимости относительных параметров:

$$\frac{U_k}{U_0} = f\left(\frac{t_p}{t_{pm}}\right),$$

$$\frac{U_k}{U_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{t_p}{t_{pm}}\right)^2}.$$

Время разряда ионистора до значения $U_k = 0,5U_0$, при котором расходуется 75% всей запасенной энергии, определяется как

$$t_{p1/2} = \frac{\sqrt{3}}{2} t_{pm} \approx 0,87 t_{pm}.$$

Результаты расчета относительных параметров, характеризующих изменение напряжения на ионисторе по мере разгона электропоезда, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета характера изменения напряжения на ионисторе по мере разгона электропоезда

t_p / t_{pm}	0	0,25	0,5	0,75	0,9	1
U_k / U_0	1	0,97	0,87	0,66	0,44	0

График зависимости $\frac{U_K}{U_0} = f\left(\frac{t_p}{t_{pm}}\right)$ пред-

ставлен на рис. 2.

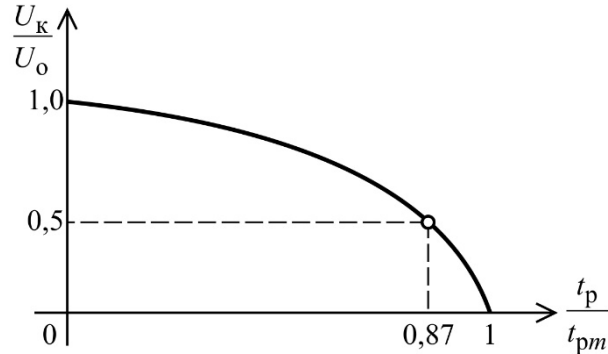


Рис. 2. Характер изменения напряжения на ионисторе

Главной особенностью режима пуска электропоезда с питанием электропривода от предварительно заряженного ионистора заключается в том, что по мере разгона требуется плавное повышение напряжения питания тяговых двигателей, а напряжение на ионисторе снижается.

Такой характер изменения напряжений на источнике и потребителе электроэнергии требует применения специального преобразователя [6]. Наиболее рациональным будет соотношение между номинальным напряжением электропривода U_H и начальным напряжением на ионисторе U_0

$$U_H = k_H U_0 = (0,5; 1) U_0.$$

Схемное решение преобразователя напряжения

Точное определение оптимального значения отношения k_H является предметом отдельного исследования. Тем не менее, очевидно, что при принятом выше подходе к выбору значения k_H требуется преобразователь, который в начале пуска будет обеспечивать преобразование мощности с понижением напряжения, а в конце пуска – с повышением. Один из вариантов схемного решения такого преобразования представлен на рис. 3.

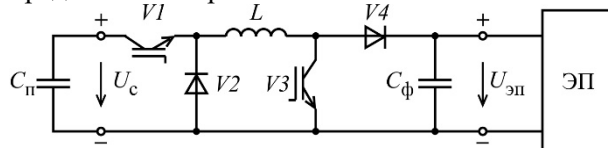


Рис. 3. Схема преобразователя напряжения

В начале пуска преобразователь работает как понижающий конвертор напряжения за счет импульсного регулирования с использо-

ванием электронного ключа V1 (IGBT транзистор) [6]. Когда требуемое напряжение на электроприводе $U_{эп}$ становится выше напряжения на ионисторе $U_с$, преобразователь начинает работать как повышающий конвертор напряжения за счёт импульсного регулирования с использованием электронного ключа V3 (IGBT транзистор) [6].

Качественно характеры изменения напряжений $U_с$ и $U_{эп}$ представлены на рис. 4.

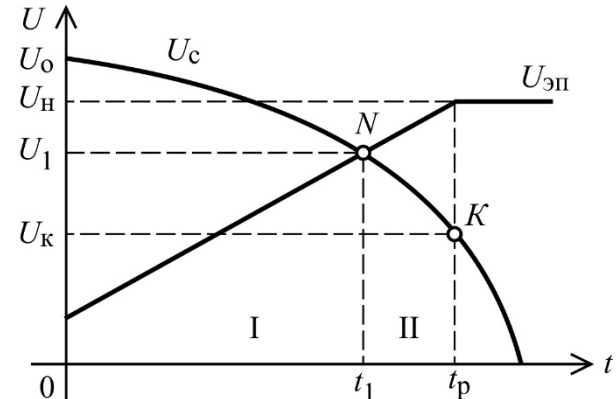


Рис. 4. Характеры изменения напряжений на ионисторе и электроприводе

Условно процесс пуска можно разделить на две зоны регулирования. В зоне I (рис. 4) преобразователь работает как понижающий конвертор напряжения. Для этой зоны коэффициент передачи напряжения k_{U1} меньше единицы.

$$k_{U1} = \frac{U_{эп}}{U_с} < 1.$$

В зоне II (рис. 4) преобразователь работает как повышающий конвертор напряжения. Для этой зоны регулирования коэффициент передачи напряжения k_{U2} больше единицы.

$$k_{U2} = \frac{U_{эп}}{U_с} > 1.$$

При $t = t_1$ характеристики $U_с(t)$ и $U_{эп}(t)$ пересекаются (точка N на рис. 4). В момент времени t_1 напряжения $U_с$ и $U_{эп}$ равны между собой

$$U_с = U_{эп} = U_1.$$

В данный момент времени необходимо переключение работы преобразователя с режима понижения напряжения на режим повышения.

В первой зоне регулирования коэффициент передачи напряжения определяется как

$$k_{U1} = \lambda_1,$$

где λ_1 – коэффициент заполнения импульсов ключа $V1$ [6].

Во второй зоне регулирования коэффициент передачи напряжения определяется как [6]

$$k_{U2} = \frac{1}{1 - \lambda_2},$$

где λ_2 – коэффициент заполнения импульсов ключа $V3$.

Оценка массы ионистора

Энергетический баланс для режима пуска можно представить в виде [3]

$$\Delta A_c \cdot \eta_{\text{ЭП}} = K + A_w, \quad (7)$$

где ΔA_c – энергия, потребленная из конденсатора за время пуска;

$\eta_{\text{ЭП}}$ – среднее значение к. п. д. электропривода;

K – кинетическая энергия электропоезда в конце пуска;

A_w – работа, затраченная за время пуска на преодоление сил сопротивления движению.

Нетрудно убедиться в том, что

$$\frac{A_w}{K} = \frac{w_0}{1000a},$$

где a – ускорение при пуске, м/с²;

w_0 – среднее удельное сопротивление движению за время пуска, Н/т [5].

Введем обозначение $k_w = \frac{A_w}{K}$ и запишем выражение (7) в виде

$$\Delta A_c \cdot \eta_{\text{ЭП}} = (1 + k_w)K. \quad (8)$$

Степень использования энергии предварительно заряженного ионистора может быть оценена коэффициентом степени разряда

$$k_A = \frac{\Delta A_c}{A_c},$$

где A_c – начальная энергия заряженного ионистора.

Тогда выражение (8) можно записать в виде

$$k_A \cdot \eta_{\text{ЭП}} \cdot \Delta A_c = (1 + k_w)K. \quad (9)$$

Проведём оценку массы ионистора, представив его полную энергию A_c в виде

$$A_c = a_c \cdot m_c, \quad (10)$$

где a_c – удельная плотность энергии конденсатора;

m_c – масса ионистора.

Кинетическая энергия электропоезда в конце пуска

$$K = \frac{M v_k^2}{2}, \quad (11)$$

где v_k – скорость электропоезда в конце пуска.

Объединив формулы (9)-(11), после преобразования получим выражение для массы ионистора, приведенной к массе электропоезда (приведенной массы ионистора), в виде

$$k_m = \frac{m_c}{M} = \frac{k_w \cdot v_k^2}{2 \cdot a_c \cdot \eta_{\text{ЭП}} \cdot k_A}. \quad (12)$$

В табл. 2 приведены результаты расчета зависимости $k_m(v_k)$, полученные по формуле (12). Значение $\eta_{\text{ЭП}}$ при расчётах принято $\eta_{\text{ЭП}} = 0,9$. Значение k_A принято $k_A = 0,75$. Значение k_w принято $k_w = 1,05$. Это значение k_w соответствует реальным условиям пуска современных электропоездов ($w_0 = 30 \div 50 \frac{\text{Н}}{\text{т}}$;

$a = 0,7 \div 1 \text{ м/с}^2$). Значение a_c принято равным $4 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, что соответствует реальным значениям удельной плотности энергии современных ионисторов [4]. График зависимости $k_m(v_k)$ представлен на рис. 5.

Таблица 2

Результаты расчета зависимости $k_m(v)$

$v_k, \text{ м/с}$	0	5	10	15	20	30	40
$k_m, \%$	0	0,05	0,2	0,44	0,77	1,75	3,12

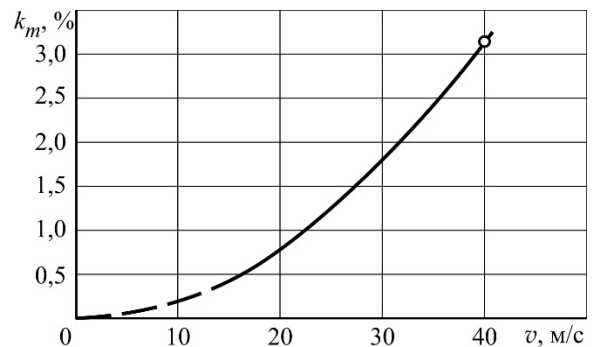


Рис. 5. График зависимости $k_m(v_k)$

Как видно из табл. 2 и рис. 5, для обеспечения пуска электропоезда до скорости 40 м/с (144 км/ч) при питании электропривода от ионистора с плотностью энергии $4 \cdot 10^4$ Дж/кг требуется повышение нагрузки на ось электропоезда не более, чем на 3,1 %. Необходимая общая масса ионисторов на один вагон электропоезда массой 80 т [2] для данных характеристик пуска составляет приблизительно 2,5 т. Для случая пуска электропоезда до скорости 30 м/с (108 км/ч) необходимая общая масса ионисторов на один вагон электропоезда массой 80 т составляет приблизительно 1,4 т.

Выводы

Применение ионисторов является эффективным решением проблемы обеспечения вы-

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Скундин, А. М. Литий-ионные аккумуляторы нового поколения / А.М. Скундин // XIX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: тезисы докладов, Т. 4. – Волгоград: ВГТУ, 2011. – С. 45.
2. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам [Текст] / под ред. А. И. Тищенко. Т. 1. – М.: Транспорт, 1976. – 432 с.
3. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
4. Ragone, D. Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles, SAE Technical Paper 680453, 1968, doi: 10.4271/680453.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
6. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. трансп / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.

Поступила в печать 01.12.2012.

Внутренний рецензент Гетьман Г. К.

Внешний рецензент Денисюк С. П.

Рассмотрены вопросы использования на неэлектрифицированных участках железных дорог Украины автономных электропоездов. Обоснована необходимость применения на таких электропоездах, наряду с электрохимическими источниками, ионисторов. Предложено использовать ионистор в качестве дополнительного накопителя, питающего электропривод при пуске электропоезда и потребляющего энергию в режиме электрического торможения. Приведены результаты расчета зависимости напряжения на ионисторе от времени разгона электропоезда, рассмотрены вопросы выбора рационального соотношения номинальных напряжений на ионисторе и электроприводе. Предложена принципиальная электрическая схема преобразователя, обеспечивающего частотное регулирование напряжения с коэффициентами передачи как меньше, так и больше единицы. Проведен анализ режимов пуска автономного электропоезда при питании тягового электропривода от ионистора, выполнен оценочный расчет его массы. Результаты расчета показывают, что применение ионисторов для питания тягового электропривода автономного электропоезда в режиме пуска увеличивает нагрузку на ось подвижного состава в допустимых пределах.

Ключевые слова: автономный электропоезд, электропривод, ионистор, плотность энергии, импульсное регулирование напряжения.

REFERENCES

1. Skundin A. M. *Lityi-ionnye akkumulyatory novogo pokoleniya* [Lithium ion batteries of new generation]. *Tezisy dokladov*. Volgograd. Publishing house of VSTU, 2011, p. 45.
2. Tishchenko A. I. *Spravochnik po elektropodvizhnomu sostavu, teplovozam i dizel-poezdam* [Handbook of electric rolling stock, locomotives and diesel trains]. Moscow, Transport Publ., 1976. Vol. 1. 432 p.
3. Rozenfeld V. Ye., Isaev I. P., Sidorov N. N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Moscow, Transport Publ., 1983. 328 p.
4. Ragone, D. Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles, SAE Technical Paper 680453, 1968, doi: 10.4271/680453.
5. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* [Rules of traction calculations for train work]. Moscow, Transport Publ., 1985. 287 p.
6. Burkov A. T. *Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli* [Electronic technics and converters]. Moscow, Transport Publ., 1999. 464 p.

УДК 621.333.024:621.316.73

А. М. АФАНАСОВ, С. В. АРПУЛЬ, А. С. М'ЯСНИКОВ (ДНУЗТ)

Кафедра «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 373-15-31, ел. пошта: afanasof@ukr.net

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ ПУСКУ АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ПРИ ЖИВЛЕННІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВІД ІОНІСТОРА

Розглянуті питання використання на неелектрифікованих ділянках залізниць України автономних електропоїздів. Обґрунтовано необхідність застосування на таких електропоїздах, разом з електрохімічними джерелами, іоністорів. Запропоновано використовувати іоністор у якості допоміжного накопичувача, який живить електропривод при пуску електропоїзда та споживає енергію в режимі електричного гальмування. Приведено результати розрахунку залежності напруги на іоністорі від часу розгону електропоїзда, розглянуті питання вибору раціонального співвідношення номінальних напруг на іоністорі та електроприводі. Запропонована принципова електрична схема перетворювача, який забезпечує частотне регулювання напруги з коефіцієнтами передачі як менше, так і більше одиниці. Наведений аналіз режимів пуску автономного електропоїзда при живленні тягового електропривода від іоністора, виконаний оцінювальний розрахунок його маси. Результати розрахунку показують, що застосування іоністорів для живлення тягового електропривода автономного електропоїзда в режимі пуску збільшує навантаження на вісь рухомого складу в припустимих межах.

Ключові слова: автономний електропоїзд, електропривод, іоністор, щільність енергії, імпульсне регулювання напруги.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.333.024:621.316.73

A. M. AFANASOV, S. V. ARPUL, A. S. MYASNIKOV (DNURT)

Department of electrorolling stock of railways. Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician Lazaryana, str. Lazaryana, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 373-15-31, e-mail: afanasof@ukr.net

THE ANALYSIS REGIMES AT THE START OF AUTONOMOUS ELECTRIC POWER FROM THE ELECTRIC TRACTION IONISTOR

The questions used on non-electrified areas of railways of Ukraine of autonomous electric trains. The necessity for the use of electric trains, together with electrochemical sources, ionistors. Ionistor proposed to use as an additional storage device, electric power supply during start-up of electric trains and power consumption of electric braking. The results of the calculation of voltage on the ionistor of the acceleration time of electric trains, the issues of selecting a rational correlation rated voltage for ionistor and the electromotive. A basic circuit diagram of an inverter which provides a frequency voltage regulation with transfer coefficients either smaller or greater than unity. An analysis of regimes start autonomous electric power train in the traction electromotive of the ionistor, made a rough calculation of its mass. The calculation results show that the use of ionistor s to power the traction electric drive train in autonomous electric start mode increases the load on the axle of the rolling stock in an acceptable range.

Keywords: Autonomous electric train, electromotive, ionistor, energy density, pulse voltage regulation.

Internal reviewer *Getman G. K.*External reviewer *Denisyuk S. P.*