

УДК 621.333.024:621.316.73

А. М. АФАНАСОВ – д.т.н., проф., Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, afanasof@ukr.net
С. В. АРПУЛЬ – к.т.н., доц., Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, arpul@ukr.net
Р. Н. ДЕМЧУК – инженер, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, demchuk_rm@ukr.net

ПУСКОВЫЕ РЕЖИМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА С БОРТОВЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

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 электропоездов 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 (батареи). Режимы пуска и остановочного электрического торможения требуют отбора и возврата энергии со значениями мощности, на порядок большими, чем в установленных 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 ионистора в качестве накопителя электроэнергии позволит применять рекуперативное торможение на дизель-поездах с электрической передачей.

Анализ энергетических процессов в интервале пуска

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.

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 упрощённым.

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

$$k_p = \frac{Ma^2}{\eta_{эп}},$$

где M – масса электропоезда; a – среднее ускорение при разгоне; $\eta_{эп}$ – 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

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

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

$$\Pi_o = \frac{CU_o^2}{2}; \quad (3)$$

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

где U_o 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

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

Выражение (5) может быть преобразовано к виду

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

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

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

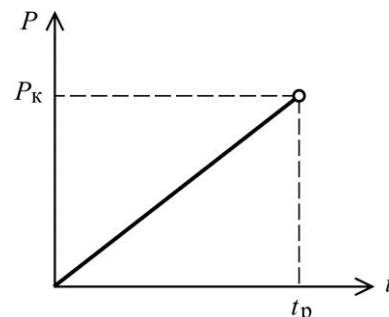


Рис. 1. График потребляемой мощности в интервале пуска

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:

$$\frac{U_k}{U_o} = f\left(\frac{t_p}{t_{pm}}\right);$$

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

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

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

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

Таблица 1

Характер изменения напряжения на ионисторе в интервале пуска						
t_p / t_{pm}	0	0,25	0,5	0,75	0,9	1
U_k / U_o	1	0,97	0,87	0,66	0,44	0

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

ставлен на рис. 2.

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.

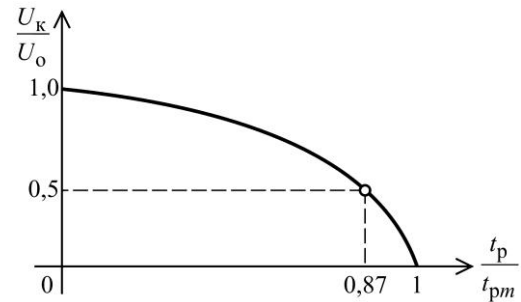


Рис. 2. График напряжения на ионисторе в интервале пуска

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

$$U_n = k_n U_o = (0,5; 1) U_o.$$

Тяговый преобразователь

Точное определение оптимального значения отношения k_n является предметом отдельного исследования. Тем не менее, очевидно, что при принятом выше подходе к выбору значения k_n 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.

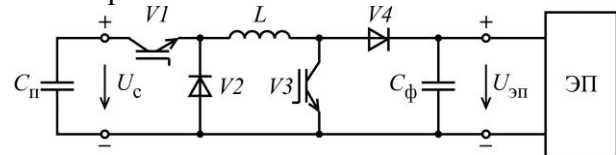


Рис. 3. Схема преобразователя напряжения

В начале пуска преобразователь работает как понижающий конвертор напряжения за счет импульсного регулирования с использованием электронного ключа V1 (IGBT транзистор) [6]. Когда требуемое напряжение на электроприводе $U_{эп}$ становится выше напряжения на ионисторе U_c ,

преобразователь начинает работать как повышающий конвертор напряжения за счёт импульсного регулирования с использованием электронного ключа $V3$ ($IGBT$ транзистор) [6].

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

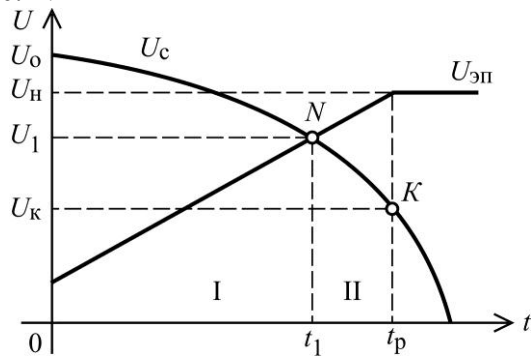


Рис. 4. Характеры изменения напряжений на ионисторе и электроприводе

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_{v1} меньше единицы.

$$k_{v1} = \frac{U_{эп}}{U_c} < 1.$$

В зоне II (рис. 4) преобразователь работает как повышающий конвертор напряжения. Для этой зоны регулирования коэффициент передачи напряжения k_{v2} больше единицы.

$$k_{v2} = \frac{U_{эп}}{U_c} > 1.$$

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

$$U_c = U_{эп} = U_1.$$

В данный момент времени необходимо переключение работы преобразователя с

режима понижения напряжения на режим повышения.

В первой зоне регулирования коэффициент передачи напряжения определяется как

$$k_{v1} = \lambda_1,$$

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

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

$$k_{v2} = \frac{1}{1 - \lambda_2},$$

где λ_2 – коэффициент заполнения импульсов ключа $V3$.

Определение массогабаритных показателей накопителя энергии

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

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

где ΔA_c – энергия, потребленная из конденсатора за время пуска; $\eta_{эп}$ – 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/с^2 ; 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

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

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

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

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 (пусковая скорость).

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

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

В табл. 2 приведены результаты расчета зависимости $k_m(v_k)$, полученные по формуле (12). Значение $\eta_{\text{эл}}$ при расчётах принято $\eta_{\text{эл}} = 0,9$. 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 ($w_0 = 30 \div 50$ Н/т; $a = 0,7 \div 1$ м/с²). Значение a_c принято равным $4 \cdot 10^4$ Дж/кг, что соответствует реальным значениям

удельной плотности энергии современных ионисторов [4]. График зависимости $k_m(v_k)$ представлен на рис. 5.

Таблица 2

Зависимость приведенной массы от
пусковой скорости

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

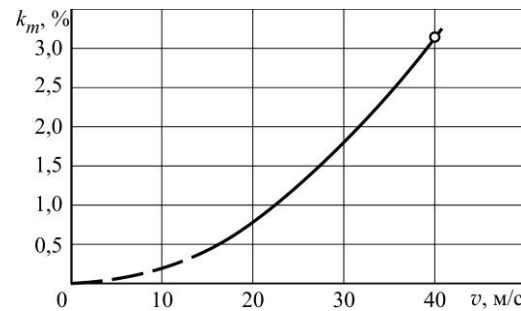


Рис. 5. График зависимости приведенной массы от пусковой скорости

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 высокой мощности разряда и заряда накопителя электроэнергии автономного электропоезда. Из результатов расчета, приведенных выше, видно, что применение ионисторов с плотностью энергии $4 \cdot 10^4$ Дж/кг для питания тягового электро-

привода автономного електропоезда в режиме пуска не влечет существенного увеличения нагрузки на ось подвижного состава.

Использование ионистора в качестве накопителя электроэнергии на дизель-поездах с электрической передачей даст возможность применять рекуперативное торможение с последующим использованием накопленной энергии в режиме тяги и, тем самым, позволит снизить расход топлива.

Библіографічний список

1. Скундин, А. М. Литий-ионные аккумуляторы нового поколения // XIX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. – Волгоград. 2011. Изд. ВГТУ. Тезисы докладов. Т. 4. – 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.

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

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

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

Рецензенти:

д.т.н., проф. Г. К. Гетьман,
д.т.н., проф. Ф. П. Шкрабец.

Поступила в редколлегию 14.06.2016.

Принята к печати 27.06.2016.