

УДК 629.431/. 432.016.1 : 001.891.5

А.А. Сулим, С.Д. Сычев, А.А. Мельник, В.В. Федоров

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ТЯГОВЫХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЕЗДА МЕТРО С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРОИЗВОДСТВА ПАО «КВСЗ»

В статье рассмотрены теоретические исследования тяговых и динамических характеристик пятивагонного поезда метро производства ПАО «КВСЗ» при использовании безмоторных вагонов.

Стратегической целью государственной политики Украины в развитии городского электрического транспорта является создание конкурентоспособного рельсового электроподвижного состава для удовлетворения постоянно возрастающих потребностей населения города в качественных и надежных перевозках [1]. Основными проблемами при эксплуатации отечественного городского электротранспорта, к которому относится метрополитен, являются высокие затраты электроэнергии на тягу и большая изношенность подвижного состава. В рамках развития данной программы специалистами ПАО «КВСЗ» впервые в Украине был разработан и создан опытный образец трехвагонного поезда метро с электроприводом переменного тока, в котором использованы тяговые асинхронные двигатели (ТАД), преобразователи частоты (ПЧ) и микропроцессорное управление составом с возможностью рекуперации энергии в контактную сеть при торможении. С целью постановки на серийное производство поезд подвергался различным видам испытаний, в том числе и тягово-энергетическим.

По результатам тягово-энергетических испытаний, проведенных при непосредственном участии авторов, установлено, что максимальная пусковая сила тяги для данного поезда в порожнем режиме составляет около 160 кН, при максимальной загрузке – 200 кН. По полученной экспериментальным путем характеристике выполнены расчеты для пятивагонного поезда метро с каждой обмоточной осью. С учетом программного ограничения максимальная пусковая сила тяги пятивагонного поезда метро при максимальной загрузке составляет 333 кН. Согласно технической документации на тяговый двигатель [2] существует запас по моменту, следовательно, можно программно увеличить максимальную пусковую силу тяги на двигатель исходя из условий сцепления колеса с рельсом или нагрева тяговых двигателей. Сохранение тяговых свойств и динамики разгона поезда за счет уменьшения количества тяговых двигателей и инверторов является важной и актуальной задачей, поскольку позволит уменьшить массу и стоимость поезда, а также обеспечит более рациональное использование тяговой мощности двигателей.

Цель работы. Теоретические исследования тяговых и динамических характеристик пятивагонного поезда метро с асинхронным электроприводом производства ПАО «КВСЗ» при использовании безмоторных вагонов.

© *А.А. Сулим, С.Д. Сычев, А.А. Мельник, В.В. Федоров, 2012*

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Параметры ТАД, устанавливаемых на вагоны метрополитена производства ПАО «КВСЗ»: $P_n = 180$ кВт; $U_n = 500$ В; $I_n = 257$ А; $n_n = 1854$ об/мин; $f_n = 63$ Гц; $M_n = 2,04$ кН·м; $D=0,755$ м; $\eta_{ред} = 0,98$; $\mu = 5,33$ (P_n – номинальная мощность тягового двигателя; U_n – номинальное напряжение на тяговом двигателе; I_n – номинальный ток тягового двигателя; n_n – номинальная частота вращения тягового двигателя; f_n – номинальная частота питающего напряжения; M_n – максимальный пусковой момент тягового двигателя; D – диаметр колеса; $\eta_{ред}$ – КПД редуктора; μ – передаточное число редуктора) [2].

Максимальная пусковая сила тяги двигателя с учетом КПД редуктора определяется по формуле:

$$F_{nmax} = \frac{2 \cdot M_n \cdot \mu \cdot \eta_{ред}}{D} = \frac{2 \cdot 2040 \cdot 5,33 \cdot 0,98}{0,785} = 27,15 \text{ кН}. \quad (1)$$

Таким образом, при использовании данного двигателя существует возможность увеличения максимальной пусковой силы тяги до 27,15 кН на двигатель и, соответственно, на трехвагонный поезд до 326 кН, на пятивагонный – до 543 кН (все вагоны поезда моторные). Однако необходимо также учитывать, что при выборе ограничения пусковой силы тяги двигателя должны выполняться условия сцепления колеса с рельсом.

Ниже приведен расчет силы тяги для обеспечения заданной динамики движения пятивагонного поезда метро при использовании в его составе безмоторного промежуточного вагона. Массы вагонов и поезда метро комплектности 4М + 1П (четыре моторных и один безмоторный вагон) при различных загрузках поезда представлены в табл. 1.

Таблица 1. Массы вагонов и поезда метро комплектности 4М + 1П

	Мг вагон (моторный головной вагон)	Мп вагон (моторный промежут. вагон)	Пп вагон (безмоторный промежут. вагон)	Мп вагон	Мг вагон	Поезд
Масса порожнего поезда, т	32,8	31,7	28	31,7	32,8	157
Масса поезда при номинальной загрузке (5 чел./м ²), т	44,1	43,8	41,1	43,8	44,1	216,9
Масса поезда при максимальной загрузке (10 чел./м ²), т	55,7	55,6	51,9	55,6	55,7	274,5

По заданным значениям массы поезда в порожнем режиме, при номинальной и максимальной загрузке выполним расчет максимального значения ограничивающей силы тяги по сцеплению:

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

будівної та транспортних галузей.

$$F_{\text{пмак}} \leq 1000 \cdot G_{\text{сц}} \cdot \psi, \quad (2)$$

где $F_{\text{пмак}}$ – максимальная ограничивающая сила тяги по сцеплению, кН;
 $G_{\text{сц}}$ – сила тяжести (сцепной вес), которая приходится на обмоторенную ось, кН;
 ψ – расчетное значение коэффициента сцепления.

Расчетное значение коэффициента сцепления ψ для поезда метро выбирается из правил тяговых расчетов (ПТР) и составляет 0,2 – 0,22 [3-5]. Максимальная ограничивающая сила тяги по сцеплению для пятивагонного состава с безмоторным прицепным вагоном определяется по формуле (2):

- в порожнем режиме:

$$F_{\text{пмак}} = 1000 \cdot 129 \cdot 0,22 \cdot 9,81 = 278,41 \text{ кН} / 16 = 17,4 \text{ кН/двигатель}; \quad (3)$$

- в режиме с номинальной загрузкой (5 чел./м²):

$$F_{\text{пмак}} = 1000 \cdot 175,8 \cdot 0,22 \cdot 9,81 = 379,41 \text{ кН} / 16 = 23,71 \text{ кН/двигатель}; \quad (4)$$

- в режиме с максимальной загрузкой (10 чел./м²):

$$F_{\text{пмак}} = 1000 \cdot 222,6 \cdot 0,22 \cdot 9,81 = 480,42 \text{ кН} / 16 = 30,03 \text{ кН/двигатель}. \quad (5)$$

Кроме того, выбранная сила тяги из условий (1) и (2) должна обеспечить нормативное значение ускорения, равное не менее 1,2 м/с² при номинальной загрузке поезда [6]. Определение необходимого значения пусковой силы тяги для обеспечения нормативного значения ускорения при номинальной загрузке выполняем по формуле:

$$F_{\text{нмак}} \geq m \cdot (1 + \gamma) \cdot a_{\text{н}} + W = 216,9 \cdot 1,1 \cdot 1,2 + 4,48 = 291 \text{ кН}, \quad (6)$$

где m – масса поезда метро, т;

$(1 + \gamma) = 1,1$ – коэффициент инерции вращающихся масс для порожнего состояния и при номинальной загрузке поезда;

$(1 + \gamma) = 1,055$ – коэффициент инерции вращающихся масс при максимальной загрузке поезда;

$a_{\text{н}}$ – среднее ускорение поезда во время разгона, м/с²;

W – основное сопротивление движению поезда метро, кН.

Основное сопротивление движению поезда метро определяется по формуле:

$$W = \left(1,1 + \frac{(0,09 + 0,022 \cdot n_{\text{в}}) \cdot V^2}{m} \right) \cdot G, \quad (7)$$

где V – скорость поезда метро, км/час;

$n_{\text{в}}$ – количество вагонов;

G – вес поезда метро, кН.

Из рассчитанных ограничений максимальной пусковой и требуемой для обеспечения заданной динамики разгона сила тяги поезда метро комплектности 4М+1П при номинальной загрузке должна выбираться из диапазона 291 – 379 кН. Аналогичным образом по формулам (6) и (7) рассчитывается диапазон силы тяги для порожнего режима.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Согласно выполненного расчета он составляет 211 – 278 кН. В качестве примера выбираем значение пусковой силы тяги 272 кН при порожнем режиме и 336 кН для номинальной и максимальной загрузки поезда. Среднее ускорение во время разгона (до скорости 33 км/час) для выбранных значений пусковых сил тяги определяем по формуле:

$$a_n = \frac{F_{n\max} - W}{m(1+\gamma)} \quad (8)$$

По формуле (8) для порожнего режима:

$$a_n = \frac{272 - 3,83}{157 \cdot 1,1} = 1,55 \text{ м/с}^2; \quad (9)$$

- при номинальной загрузке:

$$a_n = \frac{336 - 4,48}{216,9 \cdot 1,1} = 1,39 \text{ м/с}^2; \quad (10)$$

- при максимальной загрузке:

$$a_n = \frac{336 - 5,1}{274,5 \cdot 1,055} = 1,14 \text{ м/с}^2. \quad (11)$$

В случае программного регулируемого задания ограничивающей силы тяги поезда на уровне 272 кН в порожнем режиме и 336 кН для режимов номинальной и максимальной загрузки обеспечивается требуемая динамика разгона. Среднее ускорение при пуске обеспечивается на уровне 1,55 м/с² в порожнем режиме, а также 1,39 м/с² и 1,14 м/с² при номинальной и максимальной загрузке поезда соответственно.

Согласно ограничений (1) и (2) выполним аналогичный расчет при использовании в пятивагонном поезде двух промежуточных безмоторных вагонов. Массы вагонов и поезда метро комплектности 3М + 2П (три моторных и два безмоторных вагона) при различных загрузках поезда представлены в табл. 2.

Максимальная ограничивающая сила тяги по сцеплению для пятивагонного состава с двумя безмоторными вагонами определяется по формуле (2):

- в порожнем режиме:

$$F_{\text{пmax}} = 1000 \cdot 97,3 \cdot 0,22 \cdot 9,81 = 210 \text{ кН} / 12 = 17,5 \text{ кН/двигатель}; \quad (12)$$

- в режиме с номинальной загрузкой (5 чел./м²):

$$F_{\text{пmax}} = 1000 \cdot 132 \cdot 0,22 \cdot 9,81 = 284,88 \text{ кН} / 12 = 23,74 \text{ кН/двигатель}; \quad (13)$$

- в режиме с максимальной загрузкой (10 чел./м²):

$$F_{\text{пmax}} = 1000 \cdot 167 \cdot 0,22 \cdot 9,81 = 360,42 \text{ кН} / 12 = 30,04 \text{ кН/двигатель}. \quad (14)$$

Таблица 2. Массы вагонов и поезда метро комплектности 3М + 2П

	Мг вагон	Пп вагон	Мп вагон	Пп вагон	Мг вагон	Поезд
Масса порожнего поезда, т	32,8	28	31,7	28	32,8	153,3
Масса поезда при номинальной загрузке (5 чел./м ²), т	44,1	40,1	43,8	40,1	44,1	212,2
Масса поезда при максимальной загрузке (10 чел./м ²), т	55,7	51,9	55,6	51,9	55,7	270,8

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

По формуле (6) выполняется определение необходимого значения пусковой силы тяги для обеспечения нормативного значения ускорения при номинальной загрузке:

$$F_{n\max} \geq m \cdot (1 + \gamma) \cdot a_n + W = 212,2 \cdot 1,1 \cdot 1,2 + 4,48 = 284,6 \text{ кН}. \quad (15)$$

Аналогично по формуле (6) для порожнего режима:

$$F_{n\max} \geq m \cdot (1 + \gamma) \cdot a_n + W = 153,3 \cdot 1,1 \cdot 1,2 + 3,83 = 206 \text{ кН}. \quad (16)$$

Из рассчитанных ограничений максимальной пусковой и требуемой для обеспечения заданной динамики разгона сила тяги поезда метро комплектности 3М + 2П при номинальной загрузке должна выбираться из граничного значения 285 кН. Для порожнего режима диапазон составляет 206 – 210 кН. Выбираем значение пусковой силы тяги 210 кН при порожнем режиме, 285 кН и 325 кН для номинальной и максимальной загрузки поезда соответственно. Среднее ускорение во время разгона (до скорости 33 км/час) для выбранных значений пусковых сил тяги определяем по формуле (8):

По формуле (8) для порожнего режима:

$$a_n = \frac{210 - 3,79}{153,3 \cdot 1,1} = 1,22 \text{ м/с}^2; \quad (17)$$

- при номинальной загрузке:

$$a_n = \frac{285 - 4,48}{212,2 \cdot 1,1} = 1,2 \text{ м/с}^2; \quad (18)$$

- при максимальной загрузке:

$$a_n = \frac{325 - 5,1}{270,8 \cdot 1,055} = 1,12 \text{ м/с}^2. \quad (19)$$

Выводы. По результатам выполненных расчетов для пятивагонного поезда метро с промежуточными безмоторными вагонами можно сделать следующие выводы:

- показана возможность использования поездов комплектности 4М + 1П и 3М + 2П вместо 5М за счет программного увеличения ограничивающей пусковой силы тяги двигателей в системе управления поездом;

- выбраны значения ограничивающей силы тяги при пуске поезда, которые обеспечивают требуемые динамические показатели, установленные в ТЗ на вагоны с учетом ограничений максимально возможного пускового момента тягового двигателя и сцепления колеса с рельсом;

- использование промежуточных безмоторных вагонов позволит более рационально использовать тяговые мощности двигателей, снизить удельные расходы на тягу, массу и стоимость поезда;

- поезд комплектности 3М + 2П по условиям сцепления колеса с рельсом имеет граничную пусковую силу тяги для обеспечения нормируемого значения ускорения при пуске;

- существует возможность повышения динамических показателей поезда за счет снижения его массы и уменьшения коэффициента инерции вращающихся масс;

- при выбранных значениях ограничивающих сил тяги при комплектности 4М + 1П перегрузка по моменту в кратковременном режиме будет составлять 33-64 % в зависимости от загрузки, при комплектности 3М + 2П – 37-111 % соответственно, что удовлетворяет условиям по перегрузке и нагреву тяговых двигателей, поскольку данный режим не является продолжительным.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Выполненные расчеты требуют подтверждения в процессе проведения тягово-энергетических испытаний, в том числе по нагреву тягового оборудования в условиях реальной эксплуатации поезда метро.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постанова Кабінету міністрів України про затвердження концепції Державної програми будівництва та розвитку мережі метрополітену України на 2010-2020 роки, МТЗУ, 2010 р.
2. STDa 280-4В-УК. Асинхронний трехфазный двигатель тяговый для привода вагонов Киевского метро. Документация технико-эксплуатационная (инструкция по обслуживанию).
3. Байрыева Л.С., Прокопович А.В. Теория электрической тяги. Методическое пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 40 с.
4. Пушков П.М., Мінеєва Ю.В. Основи електричної тяги. Методичні вказівки до практичних та самостійних занять. – Харків: ХНАМГ, 2009. – 79 с.
5. Теория электрической тяги. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н., Озеров М.И.: Под ред. И.П. Исаева. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с.
6. СОУ МПП 45.060-253:2008 Вагони метрополітену. Загальні технічні вимоги. – Київ: Міністерство промислової політики України, 2008. – 29 с.