

В. В. Никитин, В. М. Стрепетов

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)

ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ БОРТОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЛЕВИТАЦИИ И ТЯГИ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Дата поступления 24.07.2017

Решение о публикации 26.10.2017

Аннотация:

Введение. Комбинированная система левитации и тяги (КСЛТ) на переменном токе представляет собой разновидность системы электродинамического подвеса, в которой сила тяги и левитации создается одним комплектом бортовых электромагнитов, причем подъемная сила обеспечивается при любых скоростях движения экипажа, включая нулевую. Недостатками системы являются низкий энергетический фактор и сложность управления пуско-тормозными режимами. Областью применения подобной системы могут быть пассажирские перевозки внутри крупных городов и городских агломераций на расстояния до 100 км со скоростями до 150-200 км/ч.

Цель. Целью работы является решение комплексной задачи обеспечения бортовых электромагнитов КСЛТ электроэнергией с повышенным энергетическим фактором и возможностью управления всеми режимами движения.

Метод (методология). Использовано математическое моделирование электромагнитных и электромеханических процессов с последующей оценкой технико-экономических параметров КСЛТ.

Результаты. Предложен практически реализуемый вариант системы энергообеспечения бортовых электромагнитов КСЛТ.

Практическая значимость. Предложенный вариант системы энергообеспечения обладает существенными преимуществами перед ранее рассматривавшимися: возможностью гибко управлять всеми режимами движения КСЛТ при повышенном энергетическом факторе.

Заключение. Система энергообеспечения КСЛТ на переменном токе от тяговой сети постоянного напряжения 3...5 кВ с размещением на борту экипажа автономных инверторов позволяет уменьшить массу бортового электрооборудования на 10-20%, минимизировать потребление неактивной мощности и гибко управлять всеми режимами движения экипажа.

Ключевые слова: комбинированная система левитации и тяги, система энергообеспечения, пуско-тормозные режимы, полупроводниковые преобразователи.

Введение

В настоящее время возрождается интерес к разработке и созданию магнитолевитационных транспортных систем различного назначения [1 –

5], обусловленный стремлением повысить технико-экономические и экологические показатели транспортных систем. Одна из устойчивых тенденций заключается в разработке комбинированных систем, в которых рабочие электромагнитные усилия в направлениях различных координатных осей создаются одним источником магнитного поля.

Комбинированная система левитации и тяги на переменном токе (КСЛТ) представляет собой разновидность системы электродинамического подвеса, в которой тяговое и подъемное усилия создаются одним комплектом бортовых электромагнитов, питающихся переменным током (рис. 1). На борту экипажа КСЛТ размещены N однотипных электромагнитов, которые питаются однофазным переменным током, при этом намагничивающая сила (НС) бортовых электромагнитов первоначально подчиняется условию:

$$wI_m(t) = \sqrt{2} wI_0 \cos[\Omega t + \pi(m - 1)], \quad m = 1, \dots, N.$$

где wI_0 – действующее значение НС бортового электромагнита;
 Ω – циклическая частота напряжения питания электромагнитов.

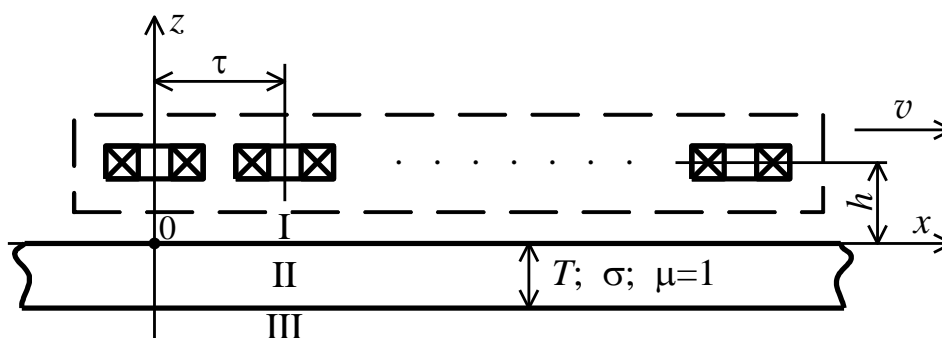


Рис. 1. Комбинированная система левитации и тяги на однофазном переменном токе.

I, III – непроводящие немагнитные области, II – область немагнитной проводящей путевой полосы, T – толщина путевой полосы, h – высота подвеса экипажа.

При таком условии система бортовых электромагнитов представляет собой переменнo-полюсную магнитную систему, благодаря чему подъемная сила F_z создается при любой скорости движения v , включая нулевую. Это выгодно отличает данную систему от традиционного электродинамического подвеса с использованием электромагнитов с постоянной НС, при котором, как известно [6], подъемная сила возникает при скоростях движения не менее $v=80...100$ км/ч. При этом КСЛТ сохраняет такие важные преимущества систем электродинамического подвеса как большую высоту подвеса (100 – 150 мм), что весьма существенно в тяжелых климатических условиях, и естественную вертикальную устойчивость экипажа. Исследования показали, что наиболее целесообразно использование КСЛТ в пассажирских перевозках в городах

и в пределах городских агломераций на относительно небольшие расстояния 70...100 км со скоростями до 150...200 км/ч.

Недостатками КСЛТ, питающейся однофазным переменным током, является отсутствие пускового усилия $F_x|_{v=0} = 0$, низкое значение коэффициента мощности, а также необходимость глубокого охлаждения бортовых электромагнитов [7, 8].

Способы создания пускового усилия КСЛТ

Для создания пускового (или тормозного), усилия КСЛТ необходимо обеспечить пространственно-временной сдвиг НС бортовых электромагнитов, что позволит создать на период разгона (или торможения) магнитолевитационного экипажа прямую (обратную) бегущую волну магнитного поля. Одним из вариантов технического решения данной проблемы является конденсаторный способ пуска КСЛТ [9, 10]. Способ основан на подключении к обмоткам бортовых электромагнитов одной из переменного-полюсных систем активно-емкостных элементов (рис. 2) таким образом, чтобы их НС определялась соотношением

$$wI_m(t) = \sqrt{2} wI_0 \cos \left[\Omega t + \frac{\pi}{2} (m - 1) \right], \quad m = 1, \dots, N.$$

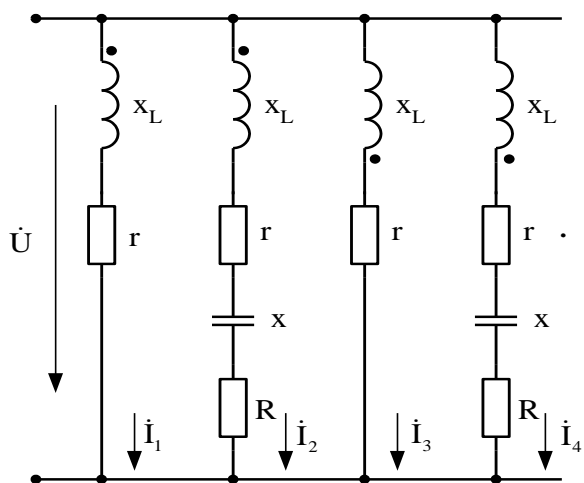


Рис. 2.

Подключение пусковых активно-емкостных элементов при конденсаторном способе пуска КСЛТ.

Однако исследования показали недостаточную энергетическую эффективность предложенного способа: в пусковых активно-емкостных элементах будут возникать значительные потери мощности. Кроме этого, увеличатся массогабаритные показатели бортового электрооборудования.

Более выгодным техническим решением является применение на экипаже бортового полупроводникового преобразователя [11, 12], что позволит не только свести к минимуму потери мощности в пуско-тормозных режимах, но и

минимизировать или вовсе исключить потребление реактивной мощности из тяговой сети. Кроме этого, при питании бортовых электромагнитов от полупроводникового преобразователя появляется возможность

обеспечения бегущего характера магнитного поля, что позволит улучшить характеристики транспортной установки с КСЛТ.

В этом случае изменение НС бортовых электромагнитов во времени подчиняется условию:

$$wI_m(t) = \sqrt{2} wI_0 \cos[\Omega t + \zeta(m - 1)], \quad m = 1, \dots, N.$$

где ζ – фазовый сдвиг между НС соседних электромагнитов.

Заметим, что $\zeta = \pi$ определяет исходный стационарный режим движения КСЛТ, а $\zeta = \pi/2$ соответствует конденсаторному способу пуска КСЛТ. Практический интерес представляют зависимости удельных (приходящихся на один электромагнит) сил тяги f_x и левитации f_z от угла ζ на разных частотах f_c питающего напряжения. Такие зависимости представлены на рис. 3 и рис. 4 для следующих основных параметров транспортной установки с КСЛТ: НС бортового электромагнита $wI_0 = 5 \cdot 10^4$ А; удельное сопротивление путевой проводящей полосы $1/\sigma = 3,2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; толщина путевой полосы $T = 0,02$ м; отношение половины ширины электромагнита к расстоянию между центрами соседних электромагнитов $a/\tau = 0,6$. Отношение половины длины электромагнита к расстоянию между центрами соседних электромагнитов обозначено b/τ .

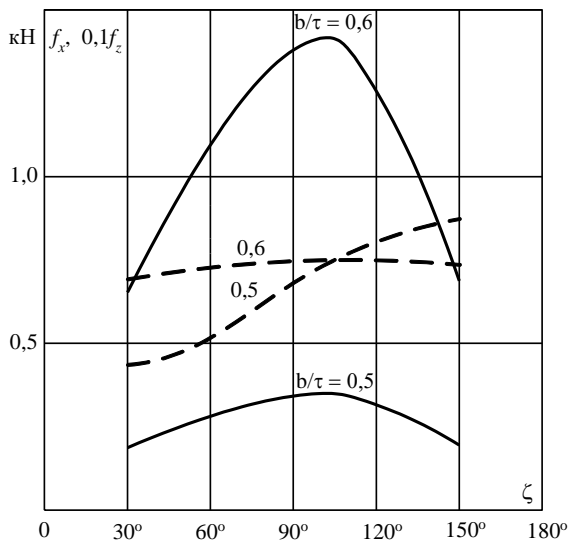


Рис.3.

Зависимости удельных сил тяги (сплошные линии) и левитации (пунктирные линии) от угла регулирования ζ при частоте $f_c = 5$ Гц различных значениях параметра b/τ .

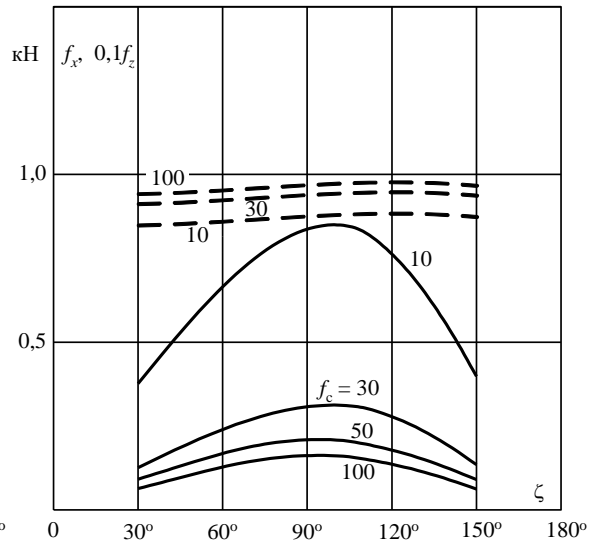


Рис. 4.

Зависимости удельных сил тяги (сплошные линии) и левитации (штриховые линии) от угла регулирования ζ при различных частотах питания f_c и $b/\tau = 0,6$.

Системы питания бортовых электромагнитов КСЛТ

Для обеспечения безопасности и удовлетворительных эксплуатационных свойств транспортной установки с КСЛТ система питания бортовых электромагнитов должна соответствовать ряду общих требований: бесперебойность питания, плавность регулирования скорости, тягового и тормозного усилия, минимальные искажения формы тока бортовых электромагнитов, минимальное содержание гармоник в токе тяговой сети, высокая энергоэффективность.

Размещение статических преобразователей энергии на экипаже КСЛТ характеризуется рядом преимуществ по сравнению с вариантом стационарного размещения преобразователей: обеспечивает гибкое и независимое управление экипажами, что облегчает задачу регулирования объемов движения при колебаниях пассажиропотоков, упрощаются и удешевляются преобразовательные агрегаты тяговых подстанций, бортовые преобразователи обеспечивают возможность управления всеми режимами движения – пуском, движением по участку, торможением. Рассмотрены два варианта энергообеспечения бортовых электромагнитов: электроснабжение от сети постоянного напряжения $U_c=3 \dots 5$ кВ и сети переменного напряжения такого же уровня. Поскольку реализуемые скорости движения относительно невелики (до 150 – 200 км/ч), предполагается использование подвижного токосъема с контактного рельса. Принципиальные схемы обоих вариантов представлены на рис. 5 и рис. 6.

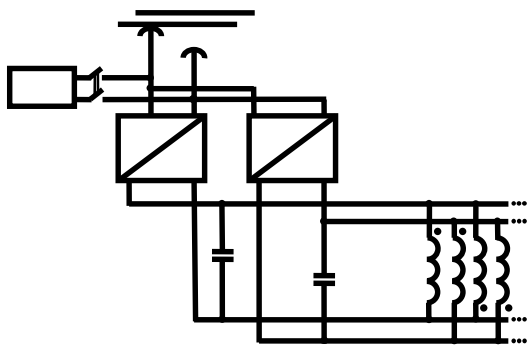


Рис. 5.

Система питания бортовых электромагнитов КСЛТ от сети постоянного напряжения.

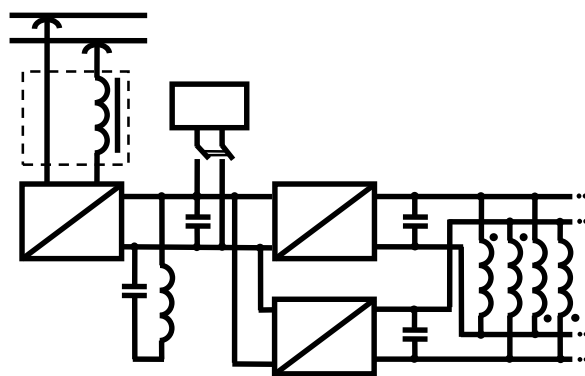


Рис. 6.

Система питания бортовых электромагнитов КСЛТ от сети переменного напряжения.

Предварительные оценки, выполненные авторами [12], показали, что для маршрутов движения протяженностью до 100 км со скоростями до 150-200 км/ч этим требованиям в наибольшей мере (при минимальных массе и габаритах бортового электрооборудования) соответствует система питания транспортной установки с КСЛТ в виде тяговой сети постоянного

напряжения и двух бортовых автономных инверторов на экипаже. Один из инверторов питает бортовые электромагниты, образующие переменноплюсную систему, с нечетными номерами, другой – с четными номерами. Это позволяет обеспечивать требуемый угол сдвига ζ между волнами НС бортовых электромагнитов в режимах пуска, установившегося движения и электрического торможения. Такой вариант энергообеспечения бортовых электромагнитов КСЛТ обеспечивает гибкое, независимое управление экипажами и при необходимости облегчает задачу регулирования объемов движения. Наличие звена постоянного тока (тяговой сети) в системе электроснабжения минимизирует потребление неактивной мощности и снижает потери мощности в тяговой сети. Кроме этого, обеспечивается меньшая кратность преобразования энергии, меньшие массогабаритные характеристики бортового оборудования, упрощаются условия использования бортового источника резервного питания (ИРП), обеспечивающего бесперебойность питания электромагнитов тяги и левитации при нарушениях токосъема от стационарной тяговой сети.

Заключение

Введение в структуру системы энергообеспечения бортовых электромагнитов КСЛТ статических преобразователей позволит гибко управлять движением экипажей по заданному маршруту в режимах пуска, установившегося движения и торможения. Система энергообеспечения со статическими преобразователями обеспечит снижение массы бортового оборудования экипажа на 10-20% по сравнению с системой, использующей конденсаторный способ пуска. Наиболее целесообразно энергообеспечение бортовых электромагнитов от сети постоянного напряжения 3...5 кВ при использовании двух бортовых автономных инверторов напряжения с регулируемой величиной, частотой и начальной фазой основной гармоники выходного напряжения.

Библиографический список

1. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев; под ред. В. А. Гапановича. – М.: Физматлит, 2014. – 476 с.
2. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / под ред. Ю. Ф. Антонова, А. А. Зайцева. – М.: Физматлит, 2015. – 612 с.
3. Зайцев А. А. Транспорт на магнитном подвесе / А. А. Зайцев, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова; под ред. А. А. Зайцева. – СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 160 с.
4. Зайцев А. А. Магнитолевитационные транспортные системы и технологии // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 5. – С. 69–73.

5. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная технология как транспортная стратегия грузовых и пассажирских перевозок / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев, А. Д. Корчагин, В. Ф. Юдкин // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии: труды 2-й Междунар. научн. конф. Санкт-Петербург, 17-20 июня 2014 г. – Киров: МЦНИП, 2014. – С. 22–49.

6. Сика З. К. Электродинамическая левитация и линейные синхронные двигатели транспортных систем / З. К. Сика, И. И. Куркалов, Б. А. Петров. – Рига: Зинатне, 1988. – 258 с.

7. Байко А. В. Система левитации и тяги на переменном токе / А. В. Байко, В. М. Кочетков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1985. – № 11. – С. 24–31.

8. Байко А. В. Электродинамические характеристики комбинированной системы левитации и тяги на переменном токе в пусковых режимах работы / А. В. Байко, В. М. Стрепетов // Электричество. – 2006. – № 10. – С. 42–46.

9. Байко А. В. Конденсаторный способ пуска ВСНТ с комбинированной системой левитации и тяги на переменном токе / А. В. Байко, А. И. Хожайнов // Электричество. – 1991. – № 4. – С. 30–41.

10. Устройство тяги на переменном токе транспортного средства / Хожайнов А. И., Середа Г. Е., Милютин В. А., Стрепетов В. М. Свидетельство на полезную модель № 11513. Выдано российским агентством по патентам и товарным знакам; заявлено 07.04.1999 г., опубл. в Бюлл. изобр., №10 – 16.10. 1999.

11. Bayko A. V., Strepetov V. M. Estimation of influence of entrance converter of the A.C. levitation and traction combined system of system power supply // Proc. of the 6-th international conference on unconventional electromechanical and electrical system «UEES-04», 24-29 September 2004. Alushta. Ukraine. pp. 805-810.

12. Никитин В. В. Варианты схем электроснабжения транспортного средства с комбинированной системой левитации и тяги на переменном токе / В. В. Никитин, В. М. Стрепетов, А. С. Волювач // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – №3–4. – С. 54–62.

Сведения об авторах:

НИКИТИН Виктор Валерьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры "Теоретические основы электротехники", Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I"

E-mail: victor-nikitin@nm.ru

СТРЕПЕТОВ Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Теоретические основы электротехники", Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I"

E-mail: strepetov.vm@mail.ru