

УДК 621.313.333.2+06

В. А. Соломин, А. А. Бичилова, Л. Л. Замшина, Н. А. Трубицина

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЛИНЕЙНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКОЙ ДЛЯ МАГНИТНОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

Дата поступления 24.05.2017

Решение о публикации 07.11.2017

Рассматривается регулируемый линейный асинхронный двигатель (ЛАД) с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента (ВЭ), который выполняет функции якоря машины. Линейное расположение короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД позволило предложить конструктивные варианты регулирования сопротивления обмотки ВЭ.

Цель. Разработать и исследовать ЛАД с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента для магнитнолевитационного транспорта.

На современном уровне развития электромеханики, асинхронного электропривода и магнитнолевитационного транспорта основным методом изменения частоты вращения двигателей и скорости линейного перемещения высокоскоростных транспортных экипажей является частотное регулирование. Частотное регулирование позволяет изменять частоту вращения машин и линейную скорость ЛАД плавно и в широком диапазоне. Высокая стоимость статических электронных преобразователей большой мощности ограничивает широкомасштабное применение частотного регулирования. Кроме того, повышение частоты тока снижает вращающий момент и тяговое усилие.

Результаты. Применение регулируемых линейных асинхронных двигателей с изменяемыми сопротивлениями короткозамкнутых обмоток вторичных элементов позволит расширить диапазон регулирования ЛАД, предназначенных для высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта при больших тяговых усилиях (в том числе при пуске в ход) методом вытеснения тока в пазу вторичного элемента ЛАД.

Выводы. Рассмотрены конструкции линейных асинхронных двигателей, вопросы расчета магнитного поля в пазу вторичного элемента, дана оценка влиянию вытеснения тока на пускорегулировочные характеристики машины.

Линейный асинхронный двигатель, регулируемая короткозамкнутая обмотка, магнитнолевитационный транспорт, магнитное поле в пазу, вытеснение тока в пазу вторичного элемента.

Введение

С каждым годом проблемы развития транспортной отрасли во всем мире становятся все более актуальными. Особое положение в перспективной транспортной системе Российской Федерации должен занять магнитнолевитационный высокоскоростной транспорт. В России в последнее время занимаются проблемами, связанными с созданием и практическим

применением магнитнолевитационного транспорта. В его развитии заинтересовано ОАО «Российские железные дороги», поддерживающее поисковые НИР в исследовании различных аспектов данной проблемы. О серьезном отношении к проблеме создания магнитнолевитационного транспорта свидетельствует большое количество публикаций, некоторые из них имеют фундаментальный характер [1–8]. Наибольшую известность получили научные результаты, достигнутые в разработке, теоретических и экспериментальных исследованиях магнитнолевитационного транспорта научными работниками и инженерами г. Санкт-Петербурга, в первую очередь, учеными Петербургского государственного университета путей сообщения [1–7].

Вопросы регулирования скорости движения высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта всегда будут в числе самых важных. В ближайшем будущем наиболее вероятно, что в качестве основного типа тяговой машины магнитнолевитационного транспорта будет использоваться линейный асинхронный двигатель (ЛАД). Уже свыше 10 лет в Китае успешно эксплуатируется магнитнолевитационный поезд с тяговыми ЛАД. Частотное регулирование рассматривается практически безусловно как основной способ управления магнитнолевитационным транспортом с тяговыми ЛАД. Частотный способ регулирования помимо высокой стоимости статических преобразователей частоты и напряжения не обеспечивает значительных пусковых усилий и достаточных усилий тяги при низких скоростях движения.

Цель

Цель данной статьи – разработать и исследовать ЛАД с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента для магнитнолевитационного транспорта.

В Ростовском государственном университете путей сообщения (РГУПС) разработан новый тип тяговой машины для магнитнолевитационного транспорта – ЛАД, у которого обмотка вторичного элемента (ВЭ) выполнена короткозамкнутой, с возможностью плавного изменения ее сопротивления [9]. ЛАД с короткозамкнутой обмоткой ВЭ обладает такими же пусковыми и регулировочными возможностями, как и асинхронный двигатель с фазной обмоткой. По мнению авторов, может оказаться эффективным сочетание частотного регулирования магнитнолевитационным транспортом с управлением путем изменения сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ ЛАД при высоких и низких скоростях движения.

Конструкция и принцип действия регулируемого ЛАД

ВЭ ЛАД с короткозамкнутой обмоткой можно расположить в путевой структуре высокоскоростного магнитнолевитационного транспорта, а можно установить на экипаже. С точки зрения регулирования тягового усилия и скорости движения, оба варианта практически равноценны.

В ГУПС разработаны регулируемые ЛАД с короткозамкнутой обмоткой, расположенной на вторичном элементе [10–14]. Главная особенность таких ЛАД заключается в возможности регулирования сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ, что обеспечивается линейным выполнением индуктора ЛАД и его вторичного элемента. В пазах сердечника ВЭ ЛАД уложены изолированные проводники, составляющие стержни обмотки ВЭ, с одной стороны замкнутые общей электропроводящей шиной, а с другой стороны заканчивающиеся элементом, установленным с возможностью перемещения. Заметим, что в мощных асинхронных двигателях с фазными роторами при помощи контактных колец и щеток могут коммутироваться токи порядка нескольких сотен, а то и тысяч ампер. Токи такого же порядка могут коммутироваться и в короткозамкнутых обмотках ВЭ регулируемых ЛАД.

Индукторы тяговых ЛАД данного типа могут иметь любую конструкцию. В результате перемещения замыкающего элемента ЛАД изменяется число замкнутых проводников обмотки ВЭ и регулируется ее сопротивление. Ряд конструкций ЛАД с регулируемым сопротивлением обмотки ВЭ описан в монографии [15] и в статье [16].

Регулируемый ЛАД с увеличенным пусковым усилием [10] схематически показан на рис. 1. Индуктор содержит трехфазную обмотку, а в сердечнике вторичного элемента кроме основных пазов 10, в которых расположены стержни основной короткозамкнутой обмотки ВЭ, выполнены дополнительные пазы 11 для размещения пусковой обмотки ЛАД. Стержни пусковой короткозамкнутой обмотки размещены в нижних частях дополнительных пазов для увеличения эффекта вытеснения тока при пуске двигателя. Принцип работы представленного регулируемого ЛАД: при подключении трехфазной обмотки индуктора к источнику напряжения возбуждается бегущее магнитное поле, пересекающее стержни обмотки вторичного элемента и наводящее в них электродвижущие силы (ЭДС). Для увеличения пускового тягового усилия подвижный элемент при помощи приводного механизма замыкает только стержни пусковой обмотки, размещенные в нижних частях дополнительных пазов. Под действием ЭДС по стержням пусковой обмотки потечет ток, который при взаимодействии с бегущим магнитным полем создаст пусковое тяговое усилие. При глубоком расположении в пазах узких стержней эффект вытеснения тока будет резко проявляться, сопротивление короткозамкнутой пусковой обмотки увеличится, что позволит значительно повысить пусковое тяговое усилие двигателя.

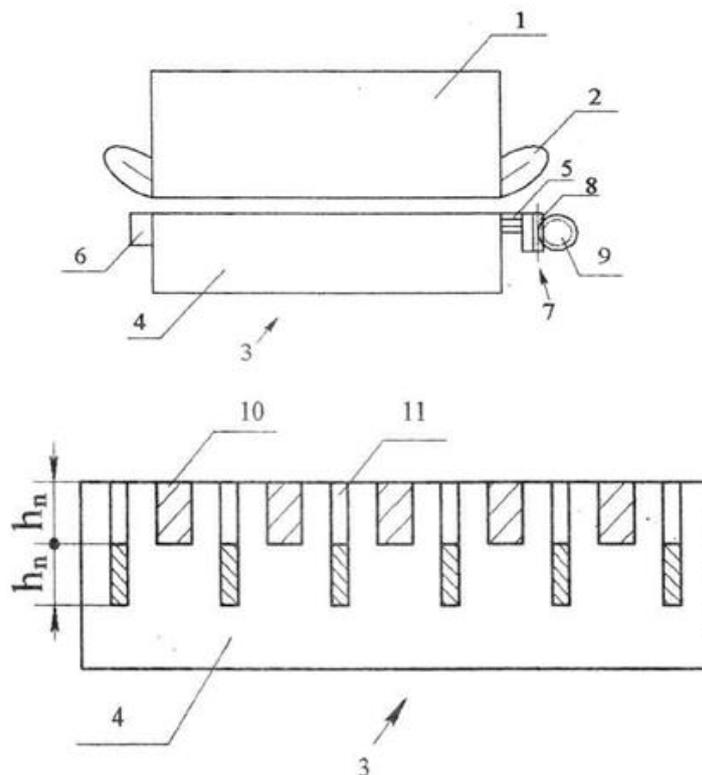


Рис. 1. Регулируемый ЛАД и его ВЭ:

- 1 – индуктор; 2 – обмотка индуктора; 3 – вторичный элемент; 4 – сердечник ВЭ;
 5 – проводники КЗ обмотки ВЭ; 6 – шина; 7 – замыкающий элемент; 8 – зубчатая рейка;
 9 – зубчатое колесо; 10 – пазы для основных стержней обмотки ВЭ;
 11 – пазы для стержней пусковой обмотки

Двигатель начинает разгоняться, по мере разгона ЛАД подвижный элемент перемещается и одновременно частично замыкает стержни основной и пусковой обмоток ВЭ, а затем в номинальном режиме пусковая обмотка размыкается, а основная полностью закорачивается. В номинальном режиме регулируемый ЛАД работает с минимальными электрическими потерями в короткозамкнутой обмотке ВЭ и при высоком коэффициенте полезного действия.

Магнитное поле и вытеснение тока в пазу вторичного элемента ЛАД

Выполнение стержней короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД из отдельных изолированных проводников, замкнутых с одной стороны общей шиной, а с другой – замыкающим элементом, содержащим электропроводящие и изоляционные участки, позволяет закорачивать проводники стержней при его перемещении. Становится возможным замкнуть отдельные проводники в каждом пазу вторичного элемента, расположенных на любом уровне по высоте паза, и получить как бы частично запол-

ненный паз ВЭ ЛАД. Возникают и новые задачи по расчету магнитного поля в пазу ВЭ и по учету влияния вытеснения тока на параметры обмотки вторичного элемента регулируемого ЛАД.

Расчетная модель паза ВЭ регулируемого ЛАД для данного случая показана на рис. 2. Видно, что замыкающим элементом 3 в пазах ВЭ замкнуто по два нижних изолированных проводника 1. Направление перемещения замыкающего элемента 3 показано стрелкой (рис. 2). Закороченные подвижным элементом 3 проводники 1 заштрихованы.

В процессе регулирования скорости в сторону ее уменьшения путем увеличения сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ скольжение увеличивается и возникает вытеснение тока в пазу, аналогичное пусковому режиму.

При анализе приняты допущения:

- магнитная проводимость стали сердечника ВЭ регулируемого ЛАД бесконечно велика;
- длина паза равна бесконечности;
- магнитные силовые линии перпендикулярны стенкам паза ВЭ;
- проводники, образующие стержень обмотки ВЭ, имеют бесконечно тонкую изоляцию.

Ортогональная система координат (рис. 2б) содержит ось z , направленную вдоль паза, ось x , ориентированную в поперечном направлении, и ось y , направленную вверх. С учетом допущений можно утверждать, что напряженность магнитного поля будет изменяться только по одной координате z . Уравнение для напряженности магнитного поля будет одномерным

$$\frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial y^2} = j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \dot{H}. \quad (1)$$

Общее решение уравнения (1) известно из математики

$$\dot{H} = C_1 \cdot e^{-py} + C_2 \cdot e^{py},$$

где $p = \sqrt{j \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mu_0}$.

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 определяются на основании закона полного тока

$$\oint \dot{H} d\bar{l} = \dot{i},$$

где \dot{i} – ток, протекающий по стержню обмотки ВЭ;
 $d\bar{l}$ – элемент длины стержня.

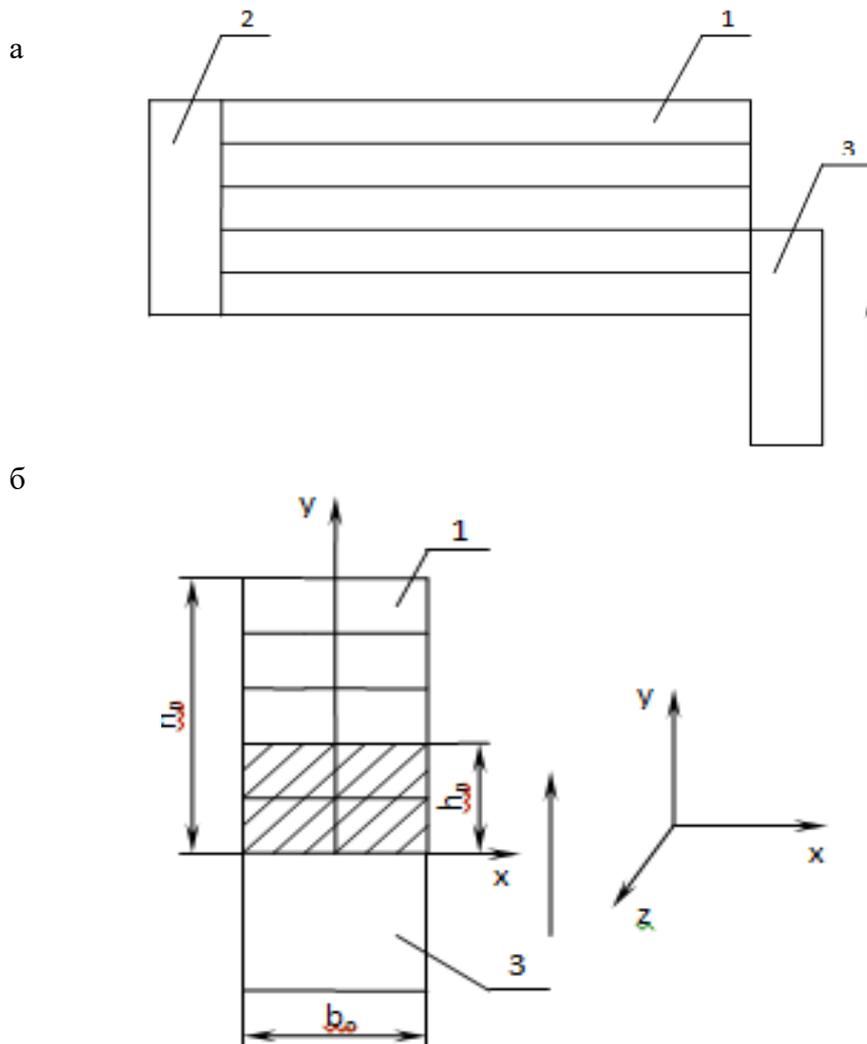


Рис. 2. Закорачивание проводников в пазу при движении замыкающего элемента
 снизу вверх: а) фрагмент обмотки; б) паз;
 1 – проводники стержня; 2 – шина; 3 – замыкающий элемент

В общем случае при замыкании подвижным элементом части проводников в пазах ВЭ регулируемого ЛАД (рис. 2) уровень закорачивания будет определяться коэффициентом α , лежащим в пределах $0 \leq \alpha \leq 1$.

Тогда граничные условия будут представлены в виде $\dot{H}b_n = 0$ при $y = 0$ и $\dot{H}b_n = \dot{I}$ при $y = \alpha h_n$.

При этих граничных условиях постоянные интегрирования C_1 и C_2 :

$$C_1 + C_2 = 0; \quad \frac{\dot{I}}{b_n} = C_1(e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n});$$

$$C_1 = \frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{1}{e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n}}; \quad C_2 = -\frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{1}{e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n}}.$$

Напряженность магнитного поля в пазу ВЭ ЛАД составит

$$\dot{H} = \frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{e^{-py} - e^{py}}{e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n}} = \frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{shpy}{shp\alpha h_n}.$$

Плотность тока в пазу ВЭ определяется уравнением

$$\dot{\delta} = rot\dot{H}.$$

Учитывая, что $\delta_x = 0$; $\delta_y = 0$; $\delta_z = \dot{\delta}$, а также $\frac{\partial \dot{H}}{\partial x} = 0$, получим

$$\dot{\delta} = -\frac{\partial \dot{H}}{\partial y} = -\frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{pchpy}{shp\alpha h_n} = -\dot{\delta}_{cp} \frac{pchpy}{shp\alpha h_n}.$$

Напряженность электрического поля в пазу ВЭ ЛАД

$$\dot{E} = -\frac{\dot{\delta}}{\gamma} = -\frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{p}{\gamma} \cdot \frac{chpy}{shp\alpha h_n}.$$

Электромагнитная мощность, поступающая в область паза, по которой протекает ток, и передаваемая через воздушный зазор от индуктора ЛАД

$$\dot{S} = \frac{1}{2} \cdot [\dot{E}(0) \cdot \dot{H}^*(0) - \dot{E}(\alpha h_n) \cdot \dot{H}^*(\alpha h_n)],$$

где l – длина активной части стержня, лежащей в пазу.

Потери мощности при частично замкнутом стержне обмотки ВЭ равны реальной части электромагнитной мощности

$$P = -\frac{l}{2} Re[\dot{E}(\alpha h_n) \cdot \dot{E}^*(\alpha h_n)] = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_m^2}{\gamma \cdot b_n \cdot \alpha h_n} \cdot Re \frac{p\alpha h_n \cdot chp\alpha h_n}{shp\alpha h_n}, \quad (2)$$

где $I_m^2 = \dot{I}_m \cdot \dot{I}_m^*$ – квадрат модуля вектора тока.

Сопротивление проводников в замкнутой части стержня короткозамкнутой обмотки ВЭ постоянному току

$$R_a = \frac{1}{\gamma \cdot b_n \cdot \alpha h_n}.$$

Если $pah_n = (1 + j)kakh_n$, то, вводя обозначение $kh_n = \xi$ – относительной глубины проникновения тока в паз ВЭ и подставляя $pah_n = (1 + j)\alpha\xi$ в (2), получим

$$\begin{aligned} P &= \frac{I_m^2}{2} R_a \cdot \operatorname{Re} \left[(1 + j)\alpha\xi \cdot \frac{ch(1 + j)\alpha\xi}{sh(1 + j)\alpha\xi} \right] = \\ &= \frac{I_m^2}{2} R_a \cdot \operatorname{Re} \left[(1 + j)\alpha\xi \cdot \frac{ch\alpha\xi \cdot \cos\alpha\xi + jsh\alpha\xi \cdot \sin\alpha\xi}{sh\alpha\xi \cdot \cos\alpha\xi + jch\alpha\xi \cdot \sin\alpha\xi} \right] = \\ &= \frac{I_m^2}{2} \alpha\xi R_a \cdot \frac{sh2\alpha\xi + \sin2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos2\alpha\xi} = R_a \frac{I_m^2}{2}, \end{aligned}$$

где $R_a = \alpha\xi \cdot R_\alpha \cdot \frac{sh2\alpha\xi + \sin2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos2\alpha\xi}$ – сопротивление замкнутой части стержня обмотки ВЭ переменному току.

Коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления замкнутых проводников стержня ВЭ регулируемого ЛАД,

$$\varphi(\xi) = \frac{R_a}{R_\alpha} = \alpha\xi \cdot \frac{sh2\alpha\xi + \sin2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos2\alpha\xi}. \quad (3)$$

Мнимая часть электромагнитной мощности, поступающей в паз обмотки вторичного элемента ЛАД, является реактивной мощностью $Q = I_m^2 \cdot X$, где X – индуктивное сопротивление закороченной части стержня обмотки ВЭ регулируемого ЛАД.

Реактивная мощность, поступающая в замкнутую часть стержня,

$$\begin{aligned} Q &= -Jm \left[\frac{l}{2} \dot{E}(\alpha h_n) \cdot \dot{H}^*(\alpha h_n) \right] = \\ &= \frac{l}{2} \cdot \frac{I_m^2}{\gamma \cdot b_n} \cdot Jm \left[(1 + j)k \frac{ch(1 + j)k\alpha h_n}{sh(1 + j)k\alpha h_n} \right] = \\ &= \frac{l}{2} \cdot \frac{I_m^2}{\gamma \cdot b_n} \cdot k \frac{sh2k\alpha h_n - \sin2k\alpha h_n}{ch2k\alpha h_n - \cos2k\alpha h_n}. \end{aligned}$$

Индуктивное сопротивление замкнутой части стержня обмотки ВЭ без учета вытеснения тока в пазу

$$X_a = \mu_0 \omega l \frac{\alpha h_n}{3b_n}.$$

Учитывая, что $k^2 = \mu \cdot \gamma \frac{\omega}{2}$ и $\xi = kh_n$, получим

$$Q = X_a \frac{I_m^2}{2} \cdot \frac{3}{2\alpha\xi} \cdot \frac{sh2\alpha\xi - \sin 2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos 2\alpha\xi} = X_a \frac{I_m^2}{2},$$

где $X_a = X_\alpha \cdot \frac{3}{2\alpha\xi} \cdot \frac{sh2\alpha\xi - \sin 2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos 2\alpha\xi}$ – индуктивное сопротивление замкнутой части стержня обмотки ВЭ с учетом вытеснения тока в пазу.

Коэффициент, учитывающий уменьшение индуктивного сопротивления замкнутой части паза ВЭ при вытеснении тока в пазу,

$$\lambda(\xi) = \frac{X_a}{X_\alpha} = \frac{3}{2\alpha\xi} \cdot \frac{sh2\alpha\xi - \sin 2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos 2\alpha\xi}. \quad (4)$$

Для учета влияния процесса вытеснения тока на параметры короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого ЛАД при различном положении замыкающего элемента (рис. 2) на основании полученных соотношений (3) и (4) разработана программа расчета коэффициентов увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений обмотки ВЭ. Результаты расчета для конкретного варианта конструкции тягового регулируемого линейного асинхронного двигателя для магнитнолевитационного транспорта представлены на рис. 3, 4.

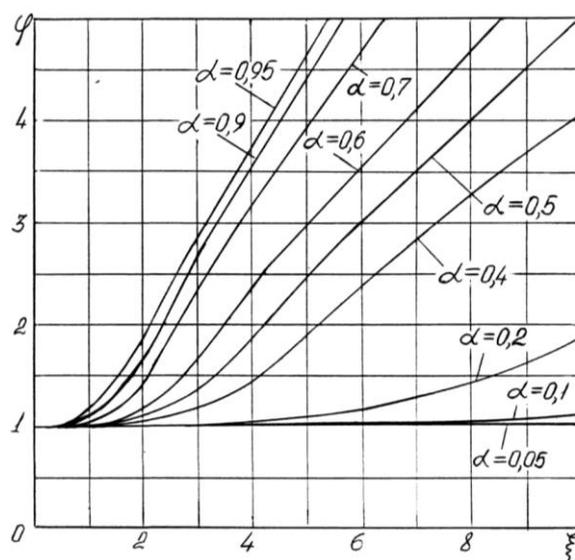


Рис. 3. Коэффициенты увеличения активного сопротивления при перемещении замыкающего элемента снизу вверх.

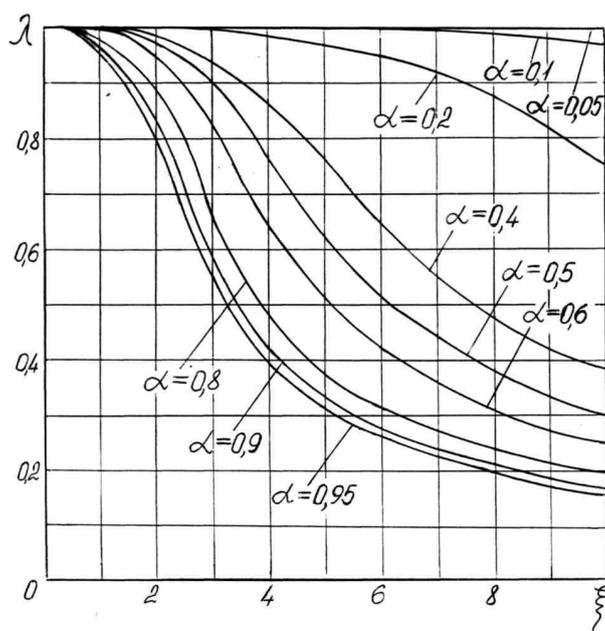


Рис. 4. Коэффициенты уменьшения индуктивного сопротивления при перемещении замыкающего элемента снизу вверх

Заключение

Кривые на рис. 3, 4 свидетельствуют, что при увеличении количества короточенных проводников в пазу ВЭ при перемещении замыкающего элемента снизу вверх растет коэффициент увеличения активного сопротивления и падает коэффициент уменьшения индуктивного сопротивления короткозамкнутой обмотки ВЭ регулируемого ЛАД.

Если $\alpha = 0,1$, то с учетом вытеснения тока в пазу при изменении ξ от 0 до 5 коэффициент $\varphi(\xi)$ увеличился всего на 0,82 %, а коэффициент $\lambda(\xi)$ уменьшился на 0,29 %, при $\alpha = 0,1$ значения активного и индуктивного сопротивлений обмотки ВЭ остаются практически неизменными и не зависят от вытеснения тока в пазу, при расчетах ЛАД это можно не учитывать.

Иная картина наблюдается при увеличении количества закороченных проводников в пазах ВЭ: при $\alpha = 0,9$ и изменении ξ от 0 до 5 коэффициент $\varphi(\xi)$ увеличился на 362 %, а коэффициент $\lambda(\xi)$ уменьшился на 67 %. Здесь эффект вытеснения тока в пазу ВЭ (поверхностный эффект) значительно влияет на активное и индуктивное сопротивления обмотки ВЭ регулируемого ЛАД. Из данных расчета видно (см. рис. 3), что особенно резко возрастает активное сопротивление короткозамкнутой обмотки ВЭ регулируемого линейного асинхронного двигателя, и это необходимо учитывать при расчетах пуско-регулирующих характеристик двигателя.

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. Зайцев А.А. Транспорт на магнитном подвесе / А.А. Зайцев, Г.Н. Талашкин, Я.В. Соколова; под ред. А.А. Зайцева. – СПб.: Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 160 с.
3. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / под ред. Ю.Ф. Антонова, А.А. Зайцева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 612 с.
4. Зайцев А.А. Магнитолевитационный транспорт в единой транспортной системе страны / А.А. Зайцев, Е.И. Морозова, Г.Н. Талашкин, Я.В. Соколова. – СПб.: НП-Принт, 2015. – 140 с.
5. Зайцев А.А. О современной стадии развития магнитолевитационного транспорта / А.А. Зайцев // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 12. – С. 62–65.
6. Зайцев А.А. Магнитолевитационные транспортные системы и технологии / А.А. Зайцев // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 5. – С. 69–73.
7. Антонов Ю.Ф. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы / Ю.Ф. Антонов, А.А. Зайцев, Е.И. Морозова // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 4 (41). – С. 5–15.
8. Лapidус Б.М. Железнодорожный транспорт: философия будущего / Б.М. Лapidус, Л.В. Лapidус. – М.: Прометей, 2015. – 232 с.

9. Асинхронный двигатель с разомкнутым магнитопроводом индуктора. Авторское свидетельство СССР № 1104619. 1984.

10. Линейный асинхронный двигатель. Пат. РФ № 2348099. 2009.

11. Линейный асинхронный двигатель. Пат. РФ № 2343621. 2009.

12. Линейный асинхронный двигатель. Пат. РФ № 2349018. 2009.

13. Линейный асинхронный двигатель. Пат. РФ № 2391762. 2010.

14. Линейный асинхронный двигатель. Пат. РФ № 2396680. 2010.

15. Линейный асинхронный двигатель. Пат. РФ № 2400909. 2010.

16. Соломин А.В. Математическое моделирование линейных асинхронных двигателей для тяговых и тормозных устройств высокоскоростного транспорта: моногр. / А.В. Соломин. – Ростов н/Дону: РГУПС, 2008. – 204 с.

17. Соломин А.В. Регулируемый линейный асинхронный двигатель / А.В. Соломин // Электротехника. – 2004. – № 12. – С. 31–34.

Сведения об авторах:

СОЛОМИН Владимир Александрович, д. т. н., профессор.

E-mail: ema@kaf.rgups.ru

БИЧИЛОВА Анастасия Алановна, магистрант.

E-mail: ema@kaf.rgups.ru

ЗАМШИНА Лариса Леонидовна, к. т. н., доцент.

E-mail: ema@rgups.ru

ТРУБИЦИНА Надежда Анатольевна, к. т. н., доцент.

E-mail: ema@rgups.ru

Ростовский государственный университет путей сообщения

© Соломин В. А., Бичилова А. А.,
Замшина Л. Л., Трубицина Н. А., 2017

UDC 621.313.333.2+06

V. A. Solomin, A. A. Bichilova, L. L. Zamshina, N. A. Trybitsina

ADJUSTABLE SQUIRREL-CAGE LINEAR INDUCTION MOTOR FOR MAGNETIC LEVITATION TRANSPORT

Data of receipt 24.05.2017

Decision on publication 07.11.2017

The article deals with linear induction motor (LIM) with a squirrel-cage winding of the secondary element (SE), which functions as the armature of the machine. Linear location of squirrel-cage winding of the secondary element of LIM allowed suggesting a number of options for the regulation of the winding resistance of SE.

Objective. Development and research of LIM with adjustable winding resistance of the secondary element for magnetic levitation transport, and the study of the properties of adjustable LIM.

At the modern level of development of the electrical engineering, asynchronous electric drive and magnetic levitation transport, the primary method of changing the frequency rotation of motor and speed of linear motion of high-speed transport vehicles is frequency control. Frequency control allows changing the frequency of rotation of the machine and linear speed of LIM smoothly and in broad diapason. The high cost of static electronic converters of high power limits the large-scale application of frequency control. The increase of the current frequency also leads to lower torque and traction.

Results. According to the authors, the application of the adjustable linear induction motors with variable resistances of short-circuited windings of the secondary elements will allow to expand the range of control of LIM, intended for high-speed magnetic levitation transport with the realisation of large traction, including the start (starting the vehicle) by means of current displacement in the groove of the secondary element of the LIM.

Conclusion. The linear induction motors of this type, as well as the calculation of the magnetic field in the groove of the secondary element, and evaluation of the influence of the current displacement on the starting and controlling features of the machine are considered.

Squirrel-cage linear induction motor, adjustable short-circuited winding, magnetic levitation transport, the magnetic field in the groove, the current displacement in the groove of the secondary element.

Introduction

Every year the transport development issues get more and more topical. Magnetic levitation transport is to take its special place in the creation of a future transport system of the Russian Federation. In recent years, Russian specialists have dealt with the problems related to creation and practical application of magnetic levitation transport. The development of this mode of transport draws great interest of JSC "RZD", which supports researches aimed at studying various aspects of this problem. The serious approach to creation of maglev transport is indicated by a large number of scientific publications, some of

which have a fundamental feature [1–8]. The best known research results are those obtained in development of theoretical and experimental studies of maglev transport by specialists and scientists of Saint Petersburg, and the first place, by Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University scientists [1–7].

Maglev transport speed control issues will always be among the most significant ones. In the near future, it is most obvious that linear induction motor (LIM) will be used as the primary maglev transport traction machine type. For over 10 years, China has been deploying maglev train with linear induction motors. Frequency control is undoubtedly viewed as the main way to operate maglev transport with LIM. Frequency control, ignoring high costs of static frequency and voltage converters, does not ensure achievement of significant starting impulse and sufficient traction power at low speeds.

Purpose

The purpose of this study is development and research of adjustable LIM with short-circuited winding for maglev transport.

At Rostov State Transport University (RGUPS) a new type of traction machine for maglev transport has been developed – linear induction motor with the short-circuited secondary element winding with a possibility to smoothly change its resistance [9]. Linear induction motor with the short-circuited secondary element winding has the same starting and controlling possibilities as the phase winding linear induction motor does. As to the experts, it might prove efficient if we combine frequency control with operation by virtue of change of short-circuited winding of the secondary element resistance at low and high speeds.

Construction and work of the adjustable LIM

The secondary element with short-circuited winding may be located in the maglev transport guideway or may be installed in the vehicle. In terms of control of traction force and speed of train, both options are equally suitable.

RGUPS has developed adjustable LIM with short-circuited windings placed in the secondary element [10–14]. The main peculiarity of these linear induction motors is that the possibility of control of short-circuited winding resistance in the secondary element, which is ensured by linear construction of LIM inductor and its secondary element. In the groove of the core of the secondary element of LIM the insulated conductors are placed, constituting the winding bars of the SE, short-circuited on the one side by general conductor bus, and short-circuited by a movable element on the other side. It needs to be pointed out that powerful LIMs with phase rotors, by virtue of slip rings and brushes, may generate power of hundreds and even thousands amp. These powerful currents may be generated by short-circuited windings of the SE in adjustable LIM.

Inductors of traction LIMs of this type may have any structure. As a result of movement of LIM locking dog, the number of short-circuited conductors of

the SE is changed, with its resistance controlled. A number of LIM structures with the SE winding resistance control is described in the monograph [15] and in the article [16].

The adjustable LIM with enhanced starting impulse [10] is schematically shown in the fig. 1. The inductor has a three-phase winding, whereas the SE core, apart from main grooves 10, in which winding bars of the main short-circuited winding of the SE, has three additional grooves 11 organised in it for the LIM starting winding to be placed therein. Short-circuited winding bars are placed in the lower parts of the additional grooves for enhancement of the current displacement effect during the start. The principle of the work of the demonstrated adjustable LIM: when a three-phase winding of the inductor is connected to a voltage source, a travelling magnetic field is excited, crossing the winding bars of the secondary element and inducing electromotive forces (EMF) in them. To increase the starting traction force, the movable element, with the help of the drive mechanism, only closes the starting winding bars located in the lower parts of the additional grooves. Under the action of EMF, a current will flow through the starting winding bars, which, when interacting with the travelling magnetic field, will create a starting traction force.

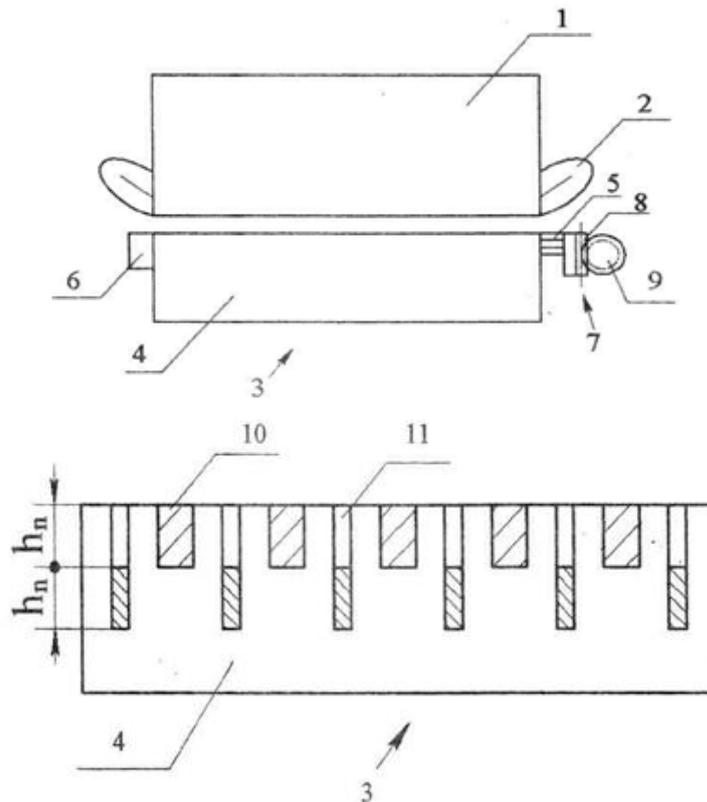


Fig. 1. Adjustable LIM and its secondary element:

- 1 – inductor; 2 – inductor winding; 3 – secondary element; 4 – secondary element core;
- 5 – conductors of short-circuited winding of the secondary element; 6 – bus; 7 – locking dog;
- 8 – tooth rack; 9 – pinion; 10 – grooves for main winding bars of the second element;
- 11 – grooves for starting winding bars

With a deep location of the narrow bars in the grooves, the current displacement effect will sharply manifest, the resistance of the short-circuited starting winding will increase, which makes it possible to significantly increase the starting traction force of the motor.

So, with the motor accelerating, the movable element moves and partially locks simultaneously starting and main winding bars of the SE. Then, in the nominal mode, the starting winding opens and the main is completely short-circuited. In the nominal mode, the adjustable LIM runs with minimum power losses in the short-circuited winding of the SE and with high energy conversion efficiency.

Magnetic field and current displacement in the groove of the secondary element of LIM

Arranging short-circuited winding bars of LIM SE as separate, insulated conductors, short-circuited by common bus on the one side and on the other – by locking dog, which contains conductive and insulating sections, enables closing conductors of bars during its movement. It becomes possible to short-circuit separate conductors located at any level on the height of the groove. The possibility of obtaining the so-called partially filled groove of the LIM SE. The new tasks on calculation of the LIM SE magnetic field and counting influence of current displacement on the parameters of SE winding in the adjustable LIM.

The calculation model of the secondary element groove for this case is shown in the fig. 2. It is seen that each two lower insulated conductors 1 are short-circuited by locking dog 3 in the SE grooves. Direction of the locking dog 3 movement is pointed by an arrow (fig. 2). The conductors 1 which are short-circuited by locking dog 3 are shaded.

In the process of the speed control in the direction of its decrease by increasing the resistance of the short-circuited winding, the glide increases and a current is displaced into the groove, similar to the starting regime.

During the analysis, the following assumptions have been made:

the magnetic conductivity of the SE steel core of the adjustable LIM is infinitely big;

- the length of the groove is infinite;
- magnetic power lines are perpendicular to the walls of the SE groove;
- conductors which make the core of the SE winding have the infinitely thin insulation;

Orthogonal coordinates (fug. 2b) contains the axis z , directed along the groove, axis x , oriented transversely, and the axis y , directed upwards. With the assumptions made, we may say that the intensity of the magnetic field will

change only on the z coordinate. The magnetic field intensity equation will be one-dimensional.

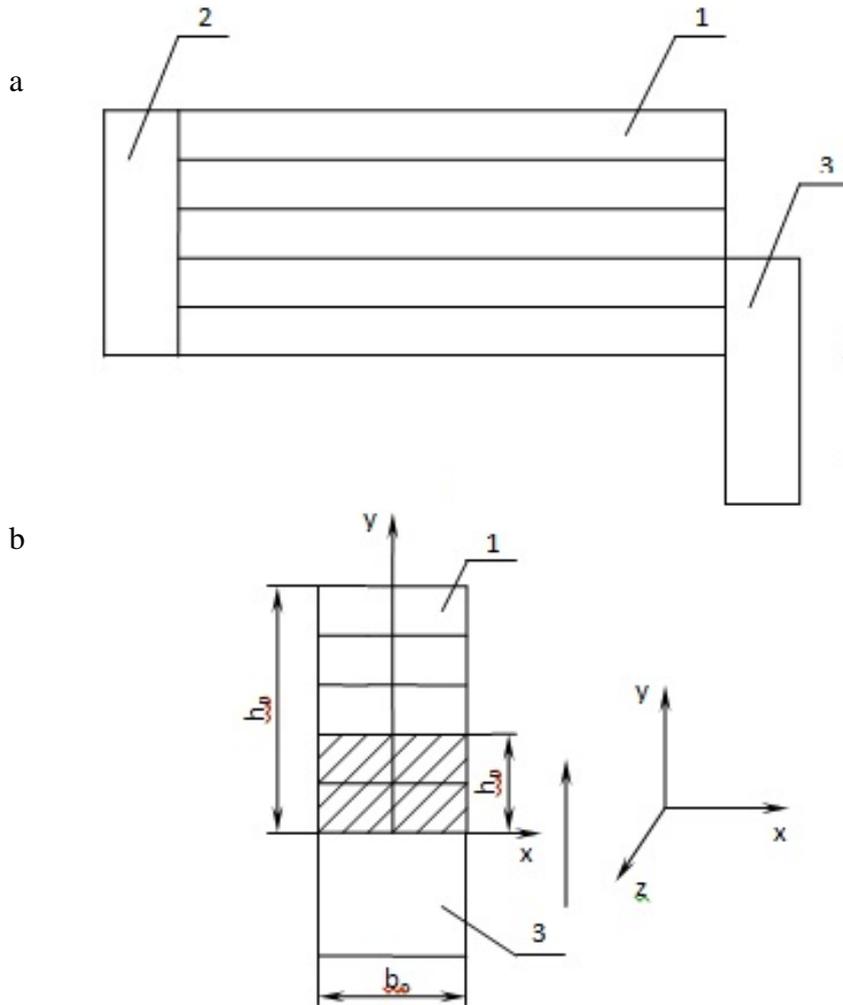


Fig. 2. Short-circuiting the conductors in the groove during movement of the locking dog from the bottom upwards: a) winding fragment; b) groove;
1 – conductors of the core; 2 – bus; 3 – locking dog

$$\frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial y^2} = j \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \dot{H}. \quad (1)$$

General equation solution (1) is known from mathematics

$$\dot{H} = C_1 \cdot e^{-py} + C_2 \cdot e^{py},$$

where $p = \sqrt{j \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mu_0}$.

The constants of integration C_1 and C_2 are determined on the basis of Kirchhoff's circuit laws (*Total current law*)

$$\oint \dot{H} d\bar{l} = \dot{I},$$

where \dot{I} – current flowing in the groove of the SE winding;

$d\bar{l}$ – core length element.

Generally, when the movable element short-circuits the parts of the conductors of the SE winding in the adjustable LIM (fig. 2), the level of short-circuiting will be determined by coefficient α , lying within $0 \leq \alpha \leq 1$.

Then the boundary conditions will be $\dot{H}b_n = 0$ with $y=0$ and $\dot{H}b_n = \dot{I}$ with $y = \alpha h_n$.

With these boundary conditions the constants of the integration C_1 and C_2 :

$$C_1 + C_2 = 0; \quad \frac{\dot{I}}{b_n} = C_1(e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n});$$

$$C_1 = \frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{1}{e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n}}; \quad C_2 = -\frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{1}{e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n}}.$$

The magnetic field intensity in the groove of the SE of LIM will make

$$\dot{H} = \frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{e^{-py} - e^{py}}{e^{-p\alpha h_n} - e^{p\alpha h_n}} = \frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{shpy}{shp\alpha h_n}.$$

Current density in the groove of the SE is determined by the equation

$$\dot{\delta} = rot\dot{H}.$$

Taking into account that $\delta_x = 0$; $\delta_y = 0$; $\delta_z = \dot{\delta}$, and $\frac{\partial \dot{H}}{\partial x} = 0$, we obtain

$$\dot{\delta} = -\frac{\partial \dot{H}}{\partial y} = -\frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{pchpy}{shp\alpha h_n} = -\dot{\delta}_{cp} \frac{pchpy}{shp\alpha h_n}.$$

The intensity of the electric field in the groove of the LIM SE

$$\dot{E} = -\frac{\dot{\delta}}{\gamma} = -\frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{p}{\gamma} \cdot \frac{chpy}{shp\alpha h_n}.$$

Electromagnetic power, flowing into the groove, where the current runs, and transmitted through the air gap from the LIM inductor

$$\dot{S} = \frac{1}{2} \cdot \left[\dot{E}(0) \cdot \dot{H}^*(0) - \dot{E}(\alpha h_n) \cdot \dot{H}^*(\alpha h_n) \right],$$

where l – length of the active part of the bar, lying in the groove.

The power loss for a partially short-circuited winding bar of the SE equals the real part of the electromagnetic power

$$P = -\frac{l}{2} \operatorname{Re} \left[\dot{E}(\alpha h_n) \cdot \dot{E}^*(\alpha h_n) \right] = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_m^2}{\gamma \cdot b_n \cdot \alpha h_n} \cdot \operatorname{Re} \frac{p \alpha h_n \cdot ch p \alpha h_n}{sh p \alpha h_n}, \quad (2)$$

where $I_m^2 = \dot{I}_m \cdot \dot{I}_m^*$ – current vector squared modulus.

The resistance of conductors in the closed part of the short-circuited winding of the secondary element to the direct current

$$R_a = \frac{1}{\gamma \cdot b_n \cdot \alpha h_n}.$$

If $p \alpha h_n = (1 + j) k \alpha h_n$, then introducing the designation $kh_n = \xi$ – relative depth of current penetration in the groove of the SE, and putting $p \alpha h_n = (1 + j) \alpha \xi$ in (2), we obtain

$$\begin{aligned} P &= \frac{I_m^2}{2} R_a \cdot \operatorname{Re} \left[(1 + j) \alpha \xi \cdot \frac{ch(1 + j) \alpha \xi}{sh(1 + j) \alpha \xi} \right] = \\ &= \frac{I_m^2}{2} R_a \cdot \operatorname{Re} \left[(1 + j) \alpha \xi \cdot \frac{ch \alpha \xi \cdot \cos \alpha \xi + j sh \alpha \xi \cdot \sin \alpha \xi}{sh \alpha \xi \cdot \cos \alpha \xi + j ch \alpha \xi \cdot \sin \alpha \xi} \right] = \\ &= \frac{I_m^2}{2} \alpha \xi R_a \cdot \frac{sh 2 \alpha \xi + \sin 2 \alpha \xi}{ch 2 \alpha \xi - \cos 2 \alpha \xi} = R_a \frac{I_m^2}{2}, \end{aligned}$$

where $R_a = \alpha \xi \cdot R_\alpha \cdot \frac{sh 2 \alpha \xi + \sin 2 \alpha \xi}{ch 2 \alpha \xi - \cos 2 \alpha \xi}$ – resistance of the closed part of SE core to the AC.

The coefficient considering the increase if active resistance of closed conductors of the SE core of LIM

$$\varphi(\xi) = \frac{R_a}{R_\alpha} = \alpha \xi \cdot \frac{sh 2 \alpha \xi + \sin 2 \alpha \xi}{ch 2 \alpha \xi - \cos 2 \alpha \xi}. \quad (3)$$

The imaginary part of the electromagnetic power entering the groove of the winding of the secondary element of LIM is reactive power $Q = I_m^2 \cdot X$, where X

is the inductive resistance of the short-circuited part of the winding bar of the SE of the adjustable LIM.

Reactive power flowing into the closed part of the core

$$\begin{aligned} Q &= -Jm \left[\frac{l}{2} \dot{E}(\alpha h_n) \cdot \dot{H}^*(\alpha h_n) \right] = \\ &= \frac{l}{2} \cdot \frac{I_m^2}{\gamma \cdot b_n} \cdot Jm \left[(1+j)k \frac{ch(1+j)k\alpha h_n}{sh(1+j)k\alpha h_n} \right] = \\ &= \frac{l}{2} \cdot \frac{I_m^2}{\gamma \cdot b_n} \cdot k \frac{sh2k\alpha h_n - \sin 2k\alpha h_n}{ch2k\alpha h_n - \cos 2k\alpha h_n}. \end{aligned}$$

Inductive resistance of the closed part of the SE core without taking into account current displacement in the groove

$$X_a = \mu_0 \omega l \frac{\alpha h_n}{3b_n}.$$

Taking into account that $k^2 = \mu \cdot \gamma \frac{\omega}{2}$ and $\xi = kh_n$, we obtain

$$Q = X_a \frac{I_m^2}{2} \cdot \frac{3}{2\alpha\xi} \cdot \frac{sh2\alpha\xi - \sin 2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos 2\alpha\xi} = X_a \frac{I_m^2}{2},$$

where $X_a = X_\alpha \cdot \frac{3}{2\alpha\xi} \cdot \frac{sh2\alpha\xi - \sin 2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos 2\alpha\xi}$ – inductive resistance of the short-circuited part of the core of the SE winding considering current displacement in the groove.

Coefficient considering decrease of the inductive resistance in the closed part of the SE core with current displacement in the groove

$$\lambda(\xi) = \frac{X_a}{X_\alpha} = \frac{3}{2\alpha\xi} \cdot \frac{sh2\alpha\xi - \sin 2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos 2\alpha\xi}. \quad (4)$$

To take into account the influence of the process of current displacement on the parameters of short-circuited winding of the LIM SE with different location of the locking dog (fig. 2) on the basis of the relations (3) and (4), the programme for calculation of coefficients of active resistance increase and induc-

tive resistance decrease of the SE winding. The results of the calculation for specific variation of construction of adjustable traction linear inductor motor for maglev transport are shown in the fig. 3, 4.

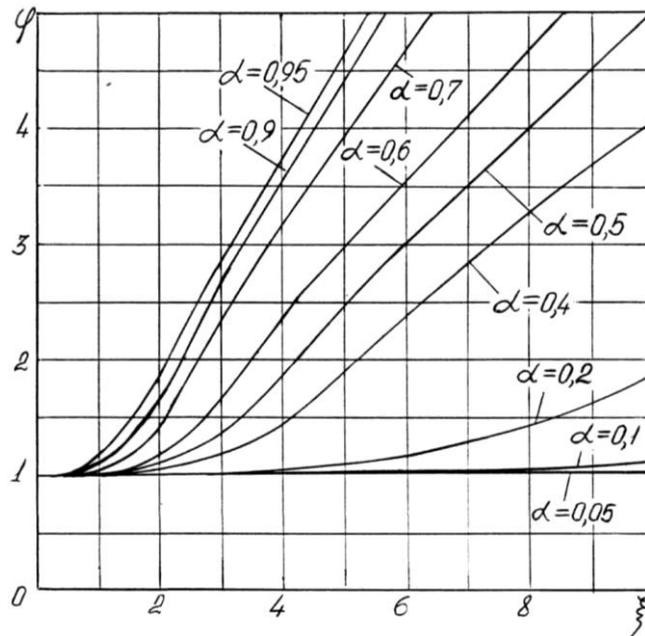


Fig. 3. Coefficients of active resistance increase when locking dog moves upwards

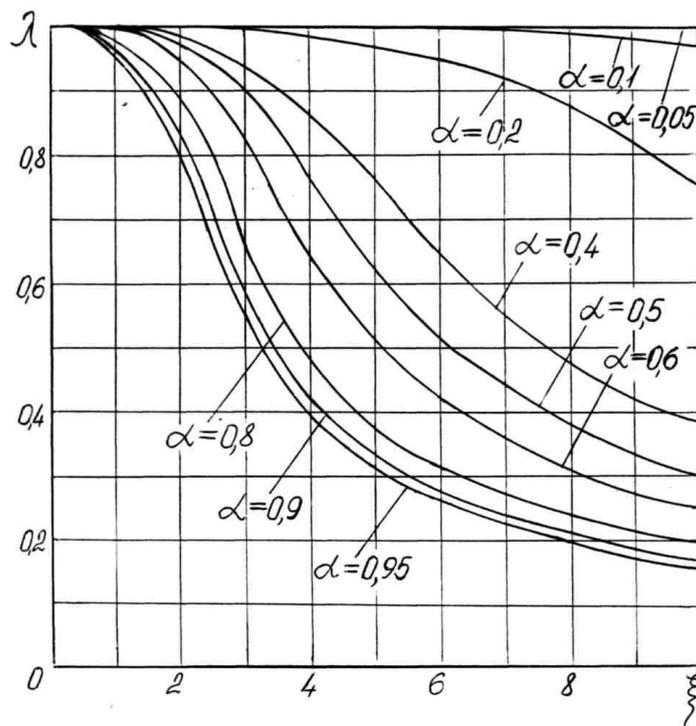


Fig. 4. Coefficients of inductive resistance decrease when locking dog moves upwards

Conclusion

The curved lines (fig. 3, 4) indicate that with the increase of the number of the short-circuited conductors in the grooves of the SE when the locking dog moves upwards, the coefficient of active resistance rises, whereas the coefficient of the inductive resistance falls down to short-circuited winding of the secondary element of LIM.

If $\alpha = 0,1$ then taking into account the current displacement in the groove with changes ξ from 0 to 5, the coefficient $\varphi(\xi)$ increased only by 0,82 %, whereas the coefficient $\lambda(\xi)$ decreased by 0,29 %; with $\alpha = 0,1$ values of active and inductive resistances remain almost the same in the value, and are not dependent on the current displacement in the groove, which can be ignored during LIM calculations.

A different situation is observed when the quantity of short-circuited conductors in the grooves of the SE increases: at $\alpha = 0,9$ and changes ξ from 0 to 5 the coefficient $\varphi(\xi)$ increased by 362 %, and the coefficient $\lambda(\xi)$ decreased by 67 %. Here the current displacement effect in the groove of the SE (surface effect) largely influences the active and inductive winding resistances of the secondary element of adjustable LIM. It is seen from the calculation data (fig. 3) that active resistance of short-circuited SE winding increases especially sharply, and this is should be taken into account while calculating starting and controlling properties of the motor.

References

1. Antonov Yu.F., Zaitsev A.A. Magnetic Levitation Transport Technology [Magnitolevitatsionnaya transportnaya tehnologia]. Moscow, 2014. 476 p.
2. Zaitsev A.A., Talashkin G.N., Sokolova Ya.V. Transport on magnetic suspension [Transport na magnitnom podvese]. St. Petersburg, 2010. 160 p.
3. Magnetic Levitation Transport: scientific problems and technical decisions [Magnitolevitatsionnyi transport: nauchnye problemy i tekhnicheskie reshenia], eds. Yu.F. Antonov, A. A. Zaitsev. Moscow, 2015. 612 p.
4. Zaitsev A.A., Morozova E.I., Talashkin G.N., Sokolova Ya.V. Magnetic levitation transport in the entire transport system of the country [Magnitolevitatsionnyi transport v edinoi transportnoi sisteme strany]. St. Petersburg, 2015. 140 p.
5. Zaitsev A.A. *Railway transp. [Zheleznodorozhnyi transport]*, 2016, no. 12, pp. 62–65.
6. Zaitsev A.A. *Railway transp. [Zheleznodorozhnyi transport]*, 2014, no. 5, pp. 69–73.

7. Antonov Yu.F., Zaitsev A.A., Morozova E.I. *News of the Petersburg State Transp. Univ.* [Izvestiya Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya], 2014, is. 4 (41), pp. 5–15.

8. Lapidus B.M., Lapidus L.V. Railway transport: the philosophy of the future [Zheleznodorozhnyi transport: filosofiya budushchego]. Moscow, 2015. 232 p.

9. Induction motor with open magnetic circuit of the inductor [Asinkhronnyi dvigatel' s razomknutym magnitoprovodom induktora]. Copyright certificate of the USSR № 1104619. 1984.

10. Linear asynchronous motor [Lineinyi asinkhronnyi dvigatel']. Pat. RF № 2348099.

11. Linear asynchronous motor [Lineinyi asinkhronnyi dvigatel']. Pat. RF № 2343621.

12. Linear asynchronous motor [Lineinyi asinkhronnyi dvigatel']. Pat. RF № 2349018.

13. Linear asynchronous motor [Lineinyi asinkhronnyi dvigatel']. Pat. RF № 2391762.

14. Linear asynchronous motor [Lineinyi asinkhronnyi dvigatel']. Pat. RF № 2396680.

15. Linear asynchronous motor [Lineinyi asinkhronnyi dvigatel']. Pat. RF № 2400909.

16. Solomin A.V. Mathematical modelling of linear induction motors for traction and braking devices of high-speed transport [Matematicheskoe modelirovanie lineinykh asinkhronnykh dvigatelei dlya tyagovykh i tormoznykh ustroystv vysokoskorostnogo transporta]. Rostov-on-Don, 2008. 204 p.

17. Solomin A.V. *Electrical Engineering [Elektrotehnika]*, 2004, no. 12, pp. 31–34.

Information about the authors:

Vladimir A. SOLOMIN, Dr. Sci. (Eng.), Professor.

E-mail: ema@kaf.rgups.ru

Anastasia A. BICHILOVA, Graduate student.

E-mail: ema@kaf.rgups.ru

Larisa L. ZAMSHINA, Can. Sci. (Eng.), Associate Prof.

E-mail: ema@rgups.ru

Nadezhda A. TRUBITSINA, Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof.

E-mail: ema@rgups.ru

Rostov State Transport University

© Solomin V. A., Bichilova A. A.,
Zamshina L. L., Trybitsina N. A., 2017