

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнические комплексы и системы

УДК [UDC] 621.331.5

<https://doi.org/10.17816/transsyst624317>

© А.В. Киреев, Н.М. Кожемяка, Г.Н. Кононов

АО «Научно-технический центр «ПРИВОД-Н»

(Новочеркасск, Россия)

ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫМ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ, СОВМЕЩАЮЩИМ ФУНКЦИИ ТЯГИ И МАГНИТНОГО ПОДВЕСА

Обоснование. В настоящей статье рассматриваются вопросы управления линейным вентильно-индукторным электроприводом, совмещающим функции тяги и магнитного подвеса. При введении в систему привода дополнительной координаты управления с помощью магнитного подвеса возникает задача о видоизменении алгоритмов управления и исследовании на их основе тяговых свойств электропривода при ограничениях, накладываемых системой магнитного подвеса.

Цель работы – исследование алгоритмов управления, обеспечивающих приоритет магнитного подвеса в задаче управления линейным электроприводом, совмещающим функции тяги и подвеса.

Материалы и методы. Основными методами исследования являются компьютерное моделирование, расчетные исследования, анализ результатов, полученных в ходе настоящих исследований.

Результаты. Предложен подход к выбору параметров управления, позволяющий минимизировать влияющее воздействие режима работы привода на систему электромагнитного подвеса.

Закключение. Практическая значимость определяется возможностью использования предложенного подхода при проектировании системы управления как комбинированной системы тяги и подвеса грузовой транспортной платформы.

Ключевые слова: линейный вентильно-индукторный электропривод; электромагнитный подвес; алгоритм управления; линейный электропривод; комбинированная система тяги и магнитного подвеса.

Как цитировать:

Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н. Вопросы управления линейным вентильно-индукторным электроприводом, совмещающим функции тяги и магнитного подвеса // Инновационные транспортные системы и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 20–40. <https://doi.org/10.17816/transsyst624317>

Section 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL RESEARCH

Subject – Electrotechnical complexes and systems

© A.V. Kireev, N.M. Kozhemyaka, G.N. Kononov

JSC “Scientific and Technical Center” PRIVOD-N”

(Novocherkassk, Russia)

**ISSUES OF CONTROL OF A LINEAR SWITCHED RELUCTANCE
ELECTRIC DRIVE COMBINING THE FUNCTIONS OF
ELECTRIC TRACTION AND MAGNETIC SUSPENSION**

Background. This study discusses the issues of controlling a linear switched reluctance electric drive combining the functions of traction and magnetic suspension. When an additional magnetic suspension control coordinate is introduced into the drive system, the task of modifying the control algorithms and studying, based on this, the traction properties of the electric drive under the restrictions imposed by the magnetic suspension system arises.

Aim. This study aims to examine the control algorithms that ensure the priority of magnetic suspension in the problem of controlling a linear electric drive combining the functions of traction and suspension.

Materials and Methods. The main research methods used are computer modeling, computational studies, and analysis of research results.

Results. An approach to the selection of control parameters is proposed that allows minimizing the impact of the drive operating mode on the electromagnetic suspension system.

Conclusion. The practical significance of the proposed approach is that it can be used in the design of a control system for a combined traction system and suspension of a cargo transport platform.

Keywords: linear switched reluctance electric drive; electromagnetic suspension; control algorithm; linear electric drive; combined traction and magnetic suspension system.

To cite this article:

Kireev AV, Kozhemyaka NM, Kononov GN. Issues of control of a linear switched reluctance electric drive, combining the functions of electric traction and magnetic suspension. *Modern Transportation Systems and Technology*. 2024;10(1):20–40. <https://doi.org/10.17816/transsyst624317>

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия отмечается интенсивное внедрение в России и за рубежом вентильно-индукторных реактивных электроприводов (ВИРЭП) средней и большой мощностей в различных технических системах [1–7]. Это связано с присущим реактивным индукторным двигателям (РИД) рядом преимуществ по сравнению с другими частотно управляемыми электрическими машинами переменного тока: конструктивно более просты; технологичны в изготовлении, обслуживании и ремонте; имеют меньшую себестоимость; обладают повышенной энергоэффективностью; более высокой перегрузочной способностью; отказоустойчивостью [8], что имеет решающее значение для ответственной техники.

По своей структуре ВИРЭП ничем не отличается от классической системы регулируемого электропривода [9]. Однако, в отличие от регулируемого электропривода, например, с асинхронным двигателем, реактивная индукторная машина, входящая в состав ВИРЭП, не является самодостаточной. Она принципиально неспособна работать без преобразователя частоты и системы управления. Преобразователь частоты и система управления являются неотъемлемыми частями, необходимыми для осуществления электромеханического преобразования энергии. В классе приводов с вращающимися электрическими машинами управление ВИРЭП сводится к формированию однополярного импульса фазного тока заданной формы, синхронизированного с изменением взаимного положения зубцов статора и ротора реактивного индукторного двигателя [9, 10]. Формирование фазного тока заданной формы осуществляется путем коммутации силовых ключей преобразователя по алгоритму, формируемому системой управления. Алгоритм генерирует управляющие сигналы подключения (отключения) обмотки двигателя от источника питания.

Линейный вариант ВИРЭП рассматривается в проектах создания транспортных систем с магнитным подвесом [11–13]. Этот тип электрической машины позволяет создать комбинированную систему, совмещающую функции тяги и магнитного подвеса в одном объекте, а также создать пассивную дискретную путевую структуру со сниженной материалоемкостью. Управление, как тягой, так и подвесом должно осуществляться, с использованием всего одного канала управления токами в обмотках фаз двигателя. При расширении функций двигателя за счет введения дополнительной координаты управления магнитным подвесом возникает задача модификации существующих алгоритмов

управления, для обеспечения приоритета магнитного подвеса в задаче управления линейным двигателем, а также исследование тяговых свойств привода при ограничениях, накладываемых системой магнитного подвеса.

В настоящей работе дано описание модифицированного алгоритма управления линейным ВИРЭП, предложен подход к выбору параметров управления, обеспечивающих приоритет магнитного подвеса, приведены результаты исследований тяговых возможностей электропривода при ограничениях, накладываемых системой магнитного подвеса и изменении массы груза.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования выполнены на Simulink-модели трехфазного тягово-левитационного модуля грузовой транспортной платформы [14]. На рис. 1 показана блок-схема Simulink-модели, включающая в свой состав подсистемы “Задание режима”, Фаза А”, “Фаза В”, “Фаза С”, блоки суммирования сигналов “Add”, “Add1”, подъемных сил F_z и сил тяги F_x , создаваемых фазами двигателя. Выходные сигналы модели объединяются в общую шину и подаются на вход блока “To File”, для записи в файл.

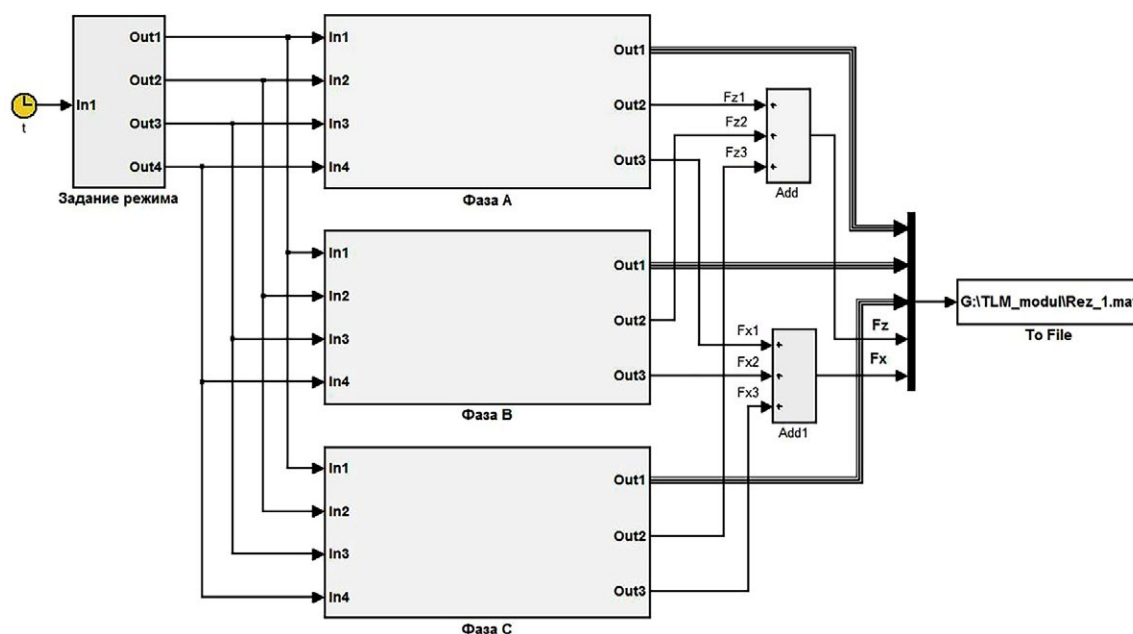


Рис. 1. Блок-схема Simulink-модели модуля

Fig. 1. Block diagram of the Simulink module model

Электромагнитные процессы в контурах фаз двигателя описываются уравнением:

$$u_k(t) = i_k(t) \cdot R_k + \frac{\partial \Psi_k(i_k, x, z, t)}{\partial i_k} \cdot \frac{di_k(t)}{dt} + \frac{\partial \Psi_k(i_k, x, z, t)}{\partial x} \cdot \frac{dx(t)}{dt}, \quad (1)$$

где u_k – напряжение, прикладываемое к обмотке статора; i_k – ток в обмотке статора; Ψ_k – потокосцепление электромагнитного контура; R_k – сопротивление обмотки статора активное; t – текущее значение времени; x – координата линейного перемещения; z – координата вертикального перемещения; k – номер электромагнитного контура.

Предполагается, что электромагнитные контуры статоров двигателя изолированы друг от друга в магнитном отношении, величина воздушного зазора между статором и ротором принимает постоянное значение.

Потокосцепления обмоток статора $\Psi_k(i, x, z)$, подъемная сила $F_z(i, x, z)$, силы тяги $F_x(i, x, z)$ рассчитываются предварительно на 3-D модели магнитной системы модуля (см. рис. 2) и вводятся в Simulink-модель в табличном виде.

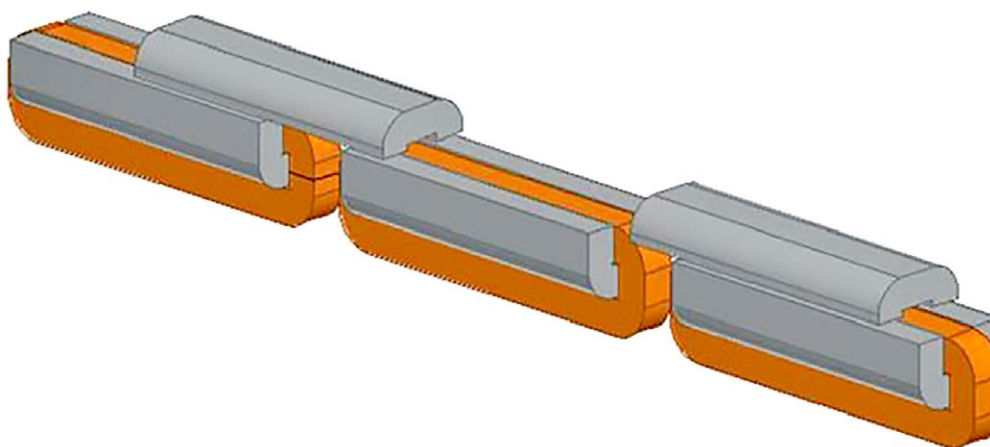


Рис. 2. 3-D модель магнитной системы модуля

Fig. 2. 3-D model of the module's magnetic system

Достоверность результатов моделирования определяется в основном точностью воспроизведения характеристик магнитной системы модуля при проведении полевых расчетов на 3D-модели.

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ

В известных алгоритмах управления тягой вращающихся реактивных индукторных машин [14, 15] питание обмоток статора производится однополярными импульсами тока. Для этого из постоянного напряжения источника питания U_d формируются двухполярные импульсы напряжения, модулированные по частоте с регулируемой скважностью и фазой относительно взаимного положения зубцов статора и ротора. Сила тяги двигателя зависит как от значения фазного тока, так и от его конфигурации относительно взаимного пространственного положения зубцов статора и ротора.

На рис. 3 показаны типичные для вращающихся машин осциллограммы фазного тока $i(\theta)$ и напряжения $u(\theta)$. Для организации управления используется сигнал датчика положения ротора $U_{ДПР}$. Управляющими величинами в терминологии, предложенной в [5] являются: угол опережения включения α ; угол проводимости β ; порог ограничения амплитуды тока $I_{огр}$.

Нетрудно заметить, что управляющее воздействие (напряжения, прикладываемое к обмотке двигателя) является функцией своих компонент:

$$u = U_d \cdot f(\alpha, \beta, I_{огр}) \quad (2)$$

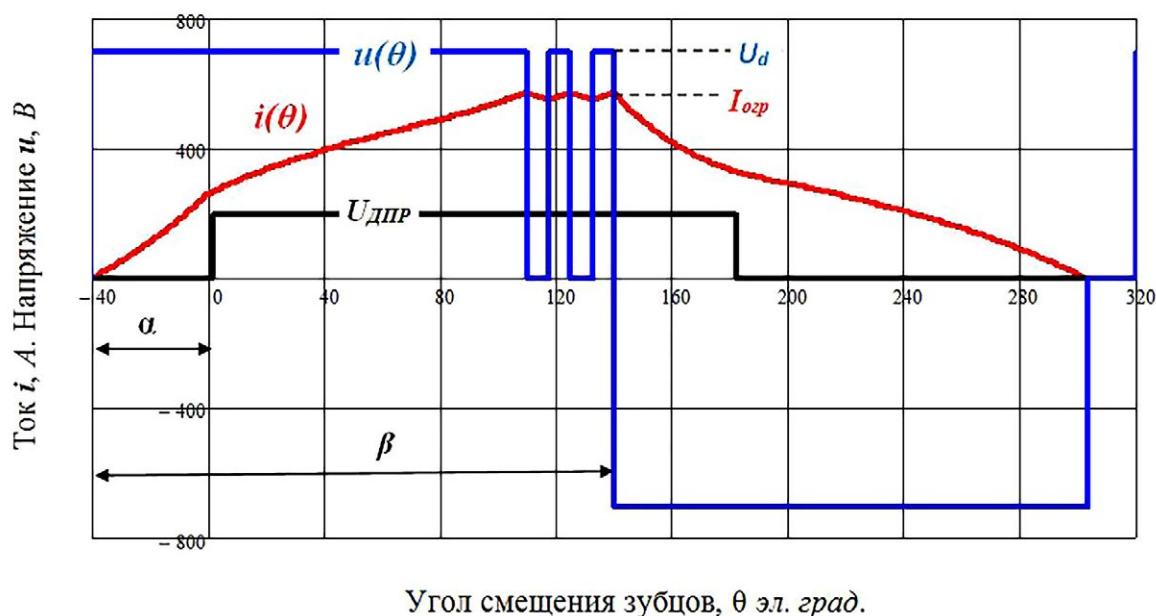


Рис. 3. Осциллограммы процессов в фазе двигателя

Fig. 3. Oscillograms of processes in the motor phase

При попытке адаптации данного алгоритма к управлению линейным двигателем, совмещающим функции тяги и подвеса, выявлены две проблемы:

- проблема реализации заданной подъемной силы F_z ;
- проблема распределение управляющих величин по каналам управления тягой и подвесом.

Первая проблема связана с тем, что с увеличением скорости движения трапецеидальный импульс фазного тока вырождается в треугольный импульс с ограниченной вершиной. Это существенно снижает величину подъемной силы. Исследования показали, что снижение подъемной силы может быть компенсировано увеличением длительности импульса тока (за счет увеличения угла β). При определенном значении угла β импульсы тока “сливаются”, и форма фазного тока из импульсной превращается в пульсирующую с постоянной составляющей тока подмагничивания $I_{подм}$, как показано на рис. 4.

Режим работы двигателя с током подмагничивания не характерен для вращающихся машин данного класса, однако, его использование в двигателе совмещающим функции тяги и подвеса позволяет при высоких скоростях движения реализовать потенциал создания подъемной силы, заложенный при проектировании магнитной системы двигателя.

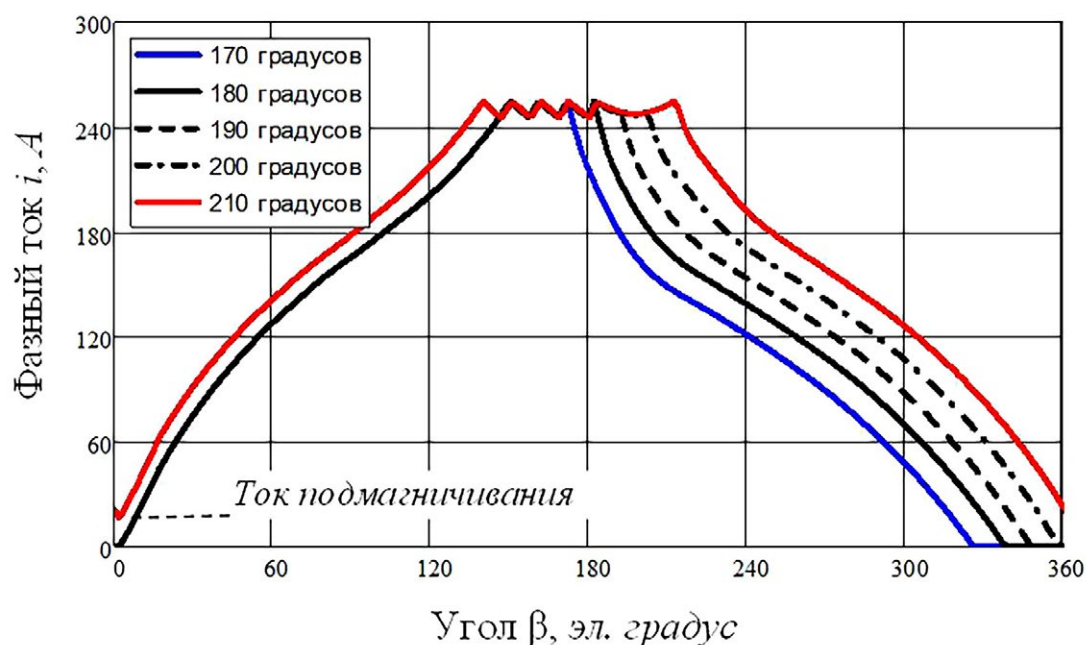


Рис. 4. Осциллограммы фазного тока при $\beta = var$

Fig. 4. Oscillograms of phase current at $\beta = var$

Переход из режима импульсного тока в режим пульсирующего тока качественно изменяет характеристики двигателя. Например, на рис. 5 приведены графики зависимостей подъемной силы $F_{IZ} = f(\beta)$ и силы тяги $F_{IX} = f(\beta)$ при $\alpha_1 = 15$ эл. град., $F_{2Z} = f(\beta)$ и $F_{2X} = f(\beta)$ при $\alpha_2 = 25$ эл. град., $I_{опр} = 250$ А. На рисунке обозначен интервал изменения угла β , соответствующий режиму пульсирующего тока (с током подмагничивания).

На графиках наблюдается линейный рост подъемной силы F_{IZ} во всем диапазоне изменения угла β и линейное снижение силы тяги F_{IX} в диапазоне импульсного тока. В диапазоне пульсирующего тока сила тяги F_{IX} остается практически постоянной. Увеличение угла α с 15 до 20 эл. град. приводит к росту силы тяги F_{2X} и незначительному уменьшению подъемной силы F_{2Z} во всем диапазоне изменения угла β . При этом характер изменения зависимостей $F_{2X} = f(\beta)$ и $F_{2Z} = f(\beta)$ остается прежним.

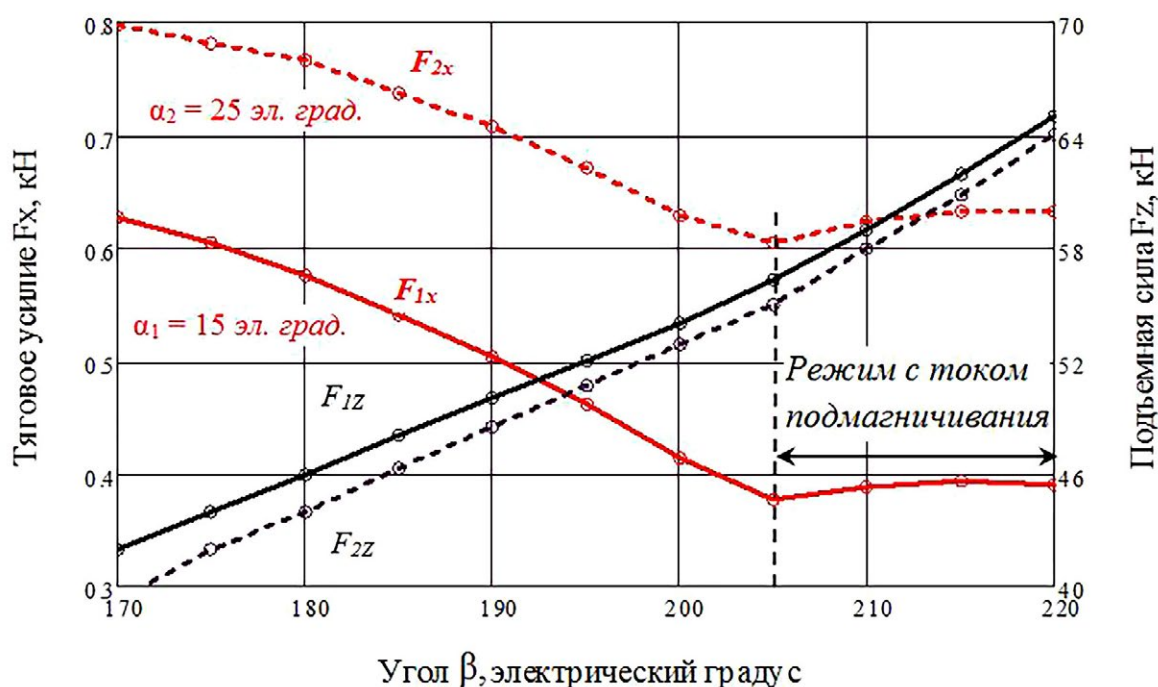


Рис. 5. Графики зависимостей $F_Z = f(\beta)$ и $F_X = f(\beta)$

Fig. 5. Dependency graphs $F_Z = f(\beta)$ и $F_X = f(\beta)$

Важно отметить, что в режиме с током подмагничивания наблюдается снижение взаимного влияния систем тяги и подвеса. Указанное обстоятельство может быть использовано для улучшения динамики системы магнитного подвеса.

Вторая проблема связана с тем, что каналы управления тягой и подвесом существенно различаются по динамическим свойствам. В системе присутствует инерционный канал управления тягой и высоко динамичный канал стабилизации неустойчивого равновесия подвеса.

Заметим, что в структуре управляющей величины (2) также присутствуют разно темповые компоненты. Управляющее воздействие, вызванное изменением $I_{огр}$ реализуются мгновенно. Управляющее воздействия, вызванные изменением углов α , β , реализуются с задержкой, равной периоду фазного напряжения. Очевидно, что быстродействующая управляющая компонента $I_{огр}$ должна быть включена в контур магнитного подвеса.

Кроме того, установлено, что:

- увеличение угла α сопровождается линейным ростом силы тяги F_X и снижением подъемного усилия F_Z ;
- увеличение угла β сопровождается ростом подъемной силы F_Z и снижением силы тяги F_X .

Очевидно, что эти два параметра управления оказывают «разнонаправленное» воздействие на характеристики объекта управления.

С учетом выявленного влияния, управляющие величины целесообразно распределить по каналам управления следующим образом:

- угол α – канал управления силой тяги;
- $I_{огр}$ и $\Delta\beta$ – канал управления магнитным подвесом.

При этом быстродействующая управляющая компонента $I_{огр}$ должна обеспечивать компенсацию текущих возмущений, а инерционная компонента $\Delta\beta$ – подстройку системы в соответствии с заданным критерием управления системой подвеса.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЕНИЯ

Приоритет магнитного подвеса в задаче управления линейным двигателем, совмещающим функции тяги и подвеса, накладывает ограничение на систему тяги. Условием работоспособности магнитного подвеса является обеспечение заданного значения подъемной силы $F_z = const$ при постоянном значении напряжения источника питания U_d , массы M , и воздушного зазора δ . Очевидно, что последнее условие может быть выполнено при различных комбинациях значений параметров управления $I_{огр}$, α , β в рабочем диапазоне скоростей линейного перемещения.

При такой постановке задачи тяговая характеристика двигателя является функцией параметров управления, при постоянстве подъёмной силы:

$$F_x(V) = f(I_{огр}(V), \alpha(V), \beta(V)), \quad F_z(V) = const, \quad (3)$$

Рассмотрим вопрос определения параметров управления для заданного значения скорости. Введем в рассмотрение угол $\Delta\beta$, который связан с углом проводимости β следующим соотношением:

$$\Delta\beta = \beta - 180 \quad (4)$$

Тогда в новой системе отсчета α , $\Delta\beta$, $I_{огр}$ фазный ток формируется следующим образом (см. рис. 6). Для организации управления используется опорный сигнал U_o . По переднему фронту опорного сигнала управления на фазную обмотку подается напряжение от источника питания U_d с углом опережения α . Фазный ток нарастает и ограничивается на уровне $I_{огр}$. От заднего фронта сигнала U_o отсчитывается угловой интервал $\Delta\beta$, по окончании которого напряжение источника питания отключается от обмотки и ток спадает до значения $I_{подм}$. С этого значения тока начинается очередной период формирования тока.

Предположим, что существует область управления, определяемая значениями параметров $I_{огр}$, α , $\Delta\beta$, в которой выполняется условие $F_z = const$.

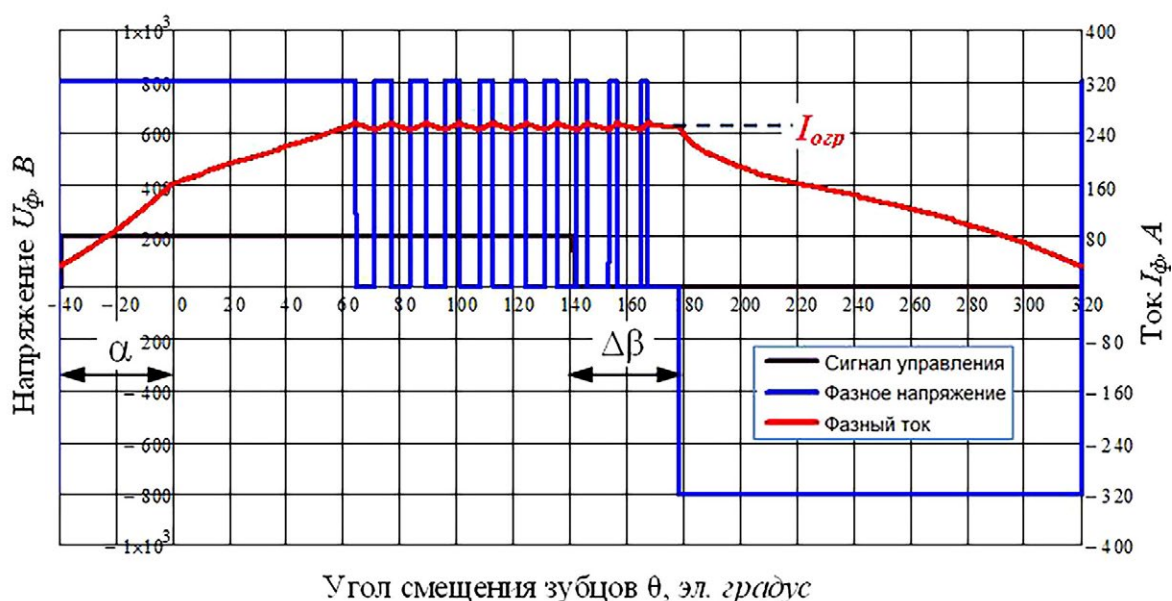


Рис. 6. Графики зависимостей $F_z = f(\beta)$ и $F_x = f(\beta)$

Fig. 6. Dependency graphs $FF_z = f(\beta)$ and $F_x = f(\beta)$

Введем в рассмотрение функцию:

$$I_{opr} = f(\alpha, \Delta\beta) \quad (5)$$

такую, что при любых значениях в области ее определения выполняется условие

$$F_z = f(I_{opr}(\alpha, \Delta\beta)) = const \quad (6)$$

Тогда сила тяги и действующее значение фазного тока будут определяться следующими функциональными зависимостями:

$$F_x = f(I_{opr}(\alpha, \Delta\beta)) \quad (7)$$

$$I_{\phi} = f(I_{opr}(\alpha, \Delta\beta)) \quad (8)$$

На модели объекта выполнены расчёты функций (5, 7, 8) при выполнении условия (6). Приняты следующие исходные данные: $U_d = 800$ В, $V_x = 200$ км/ч, $F_z = 56$ кН, $\delta = 10$ мм в диапазоне изменения координат $\alpha = 15...60$ эл. град., $\Delta\beta = 25...45$ эл. град.

Рассмотрим графики линий равного уровня функций (5, 7, 8), совмещенные на координатной плоскости координат α , $\Delta\beta$ (см. рис. 7).

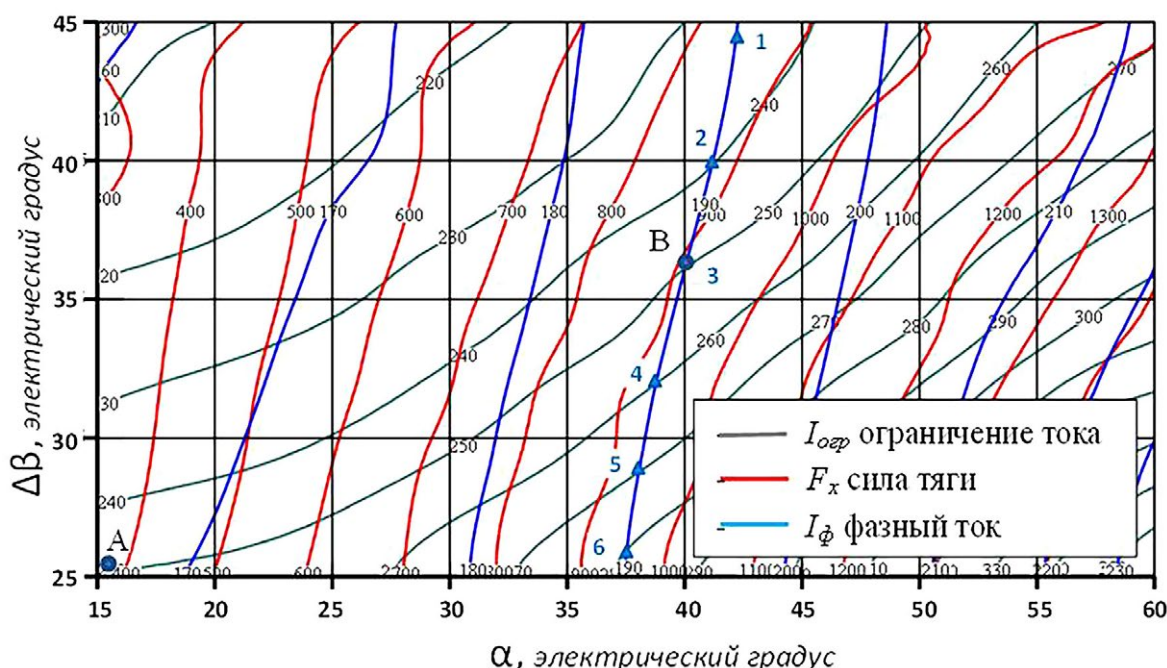


Рис. 7. Графики линий уровня функций

Fig. 7. Function level line graphs

Приведенные графики обладают важным свойством – любой точке, принадлежащей координатной плоскости, можно поставить в соответствие координаты управления двигателем $I_{огр}$, α , $\Delta\beta$, при которых выполняется условие $F_z = const$. Кроме того, этому условию каждой точке на координатной плоскости соответствуют значения силы тяги F_x , действующего значения фазного тока I_ϕ .

Например, в точке «В» с координатами управления $\alpha = 37$ электрических градусов, $\Delta\beta = 40$ электрических градусов, $I_{огр} = 250$ А, реализуется сила тяги $F_x = 900$ Н при фазном токе $I_\phi = 190$ А. Обратим внимание, что то же самое значение силы тяги может быть получено при других параметрах управления и фазном токе. Для устранения такой неоднозначности необходимо определить ограничения, накладываемые на параметры управления.

Последнее обстоятельство, прежде всего, является ограничением действующего значения фазного тока I_ϕ , определяющего тепловой режим двигателя. Как известно, в тяговом электроприводе нормируются параметры часового и продолжительного режимов работы двигателя [16]. В данном примере на рис. 7 нанесена точка «А», соответствующая продолжительному режиму работы двигателя при параметрах управления $\alpha = 15$ эл. град., $\Delta\beta = 25$ эл. град., $I_{огр} = 250$ А. В этом режиме реализуется сила тяги $F_x = 378$ Н при фазном токе $I_\phi = 168$ А. По аналогии с вращающимися машинами данного класса можно выбрать параметры часового режима. Например, ток часового режима тягового реактивного индукторного двигателя НТИ-350 электропоезда [5] примерно на 13% больше тока продолжительного режима работы. Используя аналогию, в данном примере фазный ток часового режима можно принять равным $I_\phi = 190$ А. На рис. 7 нанесена точка «В» часового режима при параметрах управления $\alpha = 40$ эл. град., $\Delta\beta = 37$ эл. град., $I_{огр} = 250$ А. В этом режиме реализуется сила тяги $F_x = 900$ Н при фазном токе $I_\phi = 190$ А.

Анализ расположения линий уровня на плоскости параметров α , $\Delta\beta$, показывает, что заданное значение фазного тока I_ϕ может быть реализовано при различных значениях $I_{огр}$. Например, на линии уровня $I_\phi = 190$ А нанесены точки 1 – 6 (в форме треугольника синего цвета), в точках пересечения с линиями уровня $I_{огр}$ (черного цвета). На рисунке 8 приведен график зависимости $F_x = f(I_{огр})$ при $I_\phi = 190$ А в диапазоне изменения параметров управления $37 \leq \alpha \leq 43$ эл. град., $26 \leq \Delta\beta \leq 44$ эл. град. (от точки 1 до точки 6), а также показаны осциллограммы фазного тока, соответствующие точкам 1 и 6.

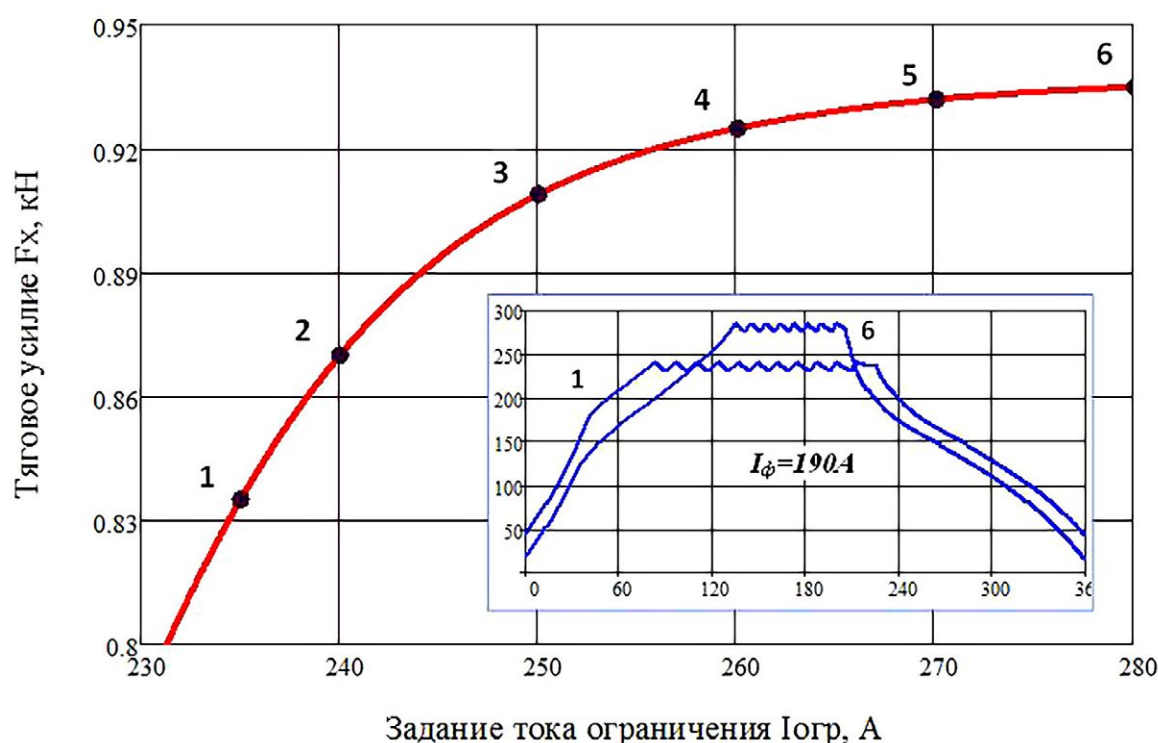


Рис. 8. График зависимости $F_x = f(I_{огр})$ при $I_\phi = 190 A$

Fig. 8. Graph of dependence $F_x = f(I_{огр})$ at $I_\phi = 190 A$

Из графика следует, что увеличение значения тока $I_{огр}$ сопровождается ростом тягового усилия F_x , при этом скорость изменения $\partial F_x / \partial I_{огр}$ уменьшается. Это делает не целесообразным увеличение $I_{огр} > 250 A$, так как незначительный прирост F_x создается за счет увеличения амплитуды тока, что снижает показатели надежности силового электрооборудования.

Таким образом, область допустимого управления согласно рис. 7 целесообразно ограничить линией, соответствующей $I_{огр} = 250 A$ (от точки «А» до точки «В»), и отрезком линии $I_\phi = 190 A$ (от точки 3 до точки 1).

Предложенный подход выбора параметров управления позволяет минимизировать влияющее воздействие режима работы привода на систему электромагнитного подвеса. Это достигается за счет развязки внутренней динамики объекта путем введения ограничения $F_z = const$.

Для оценки тяговых возможностей модуля (при ограничении $F_z = 56 kN$) выполнены расчеты тягового усилия, создаваемого модулем в диапазоне скоростей $0 \leq V \leq 200$ км/ч, при $U_d = 800 V$, $\delta = 10$ мм, $I_{огр} = 250 A$. На рис. 9 показаны зависимости $F_{1x} = f(V)$, $I_{1\phi} = f(V)$, при ограничениях по мощности $P_{1x} = 21$ кВт; $F_{2x} = f(V)$, $I_{2\phi} = f(V)$ при ограничениях по току $I_\phi = 190 A$.

Из приведенных зависимостей следует, что при $V = 0$ км/ч в режиме левитации действующее значение фазного тока равно току продолжительного режима работы двигателя, а тяговое усилие, создаваемое модулем, имеет максимальное значение. При увеличении скорости до $V = 50$ км/ч значения токов $I_{2\phi}$, $I_{1\phi}$ синхронно увеличиваются и достигают значения часового режима $I_{\phi} = 190$ А. Сила тяги в указанном диапазоне скоростей линейно уменьшается. При дальнейшем увеличении скорости движения значение тока $I_{2\phi}$ ограничивается на достигнутом уровне, а значение тока $I_{1\phi}$ плавно уменьшается, обеспечивая режим движения с постоянной мощностью $P_{IX} = 21$ кВт, а при $V = 200$ км/ч достигает значения продолжительного режима работы. Примечательно, что при $V \geq 150$ км/ч сила тяги F_{2x} стабилизируется на значении $F_{2x} = 0,9$ кН, при этом мощность достигает значения $P_{2X} = 50$ кВт при $V = 200$ км/ч.

Таким образом, расчетные исследования показали, что в области допустимого управления при ограничениях, накладываемых системой магнитного подвеса, реализуются тяговые возможности, заложенные при проектировании магнитной системы двигателя.

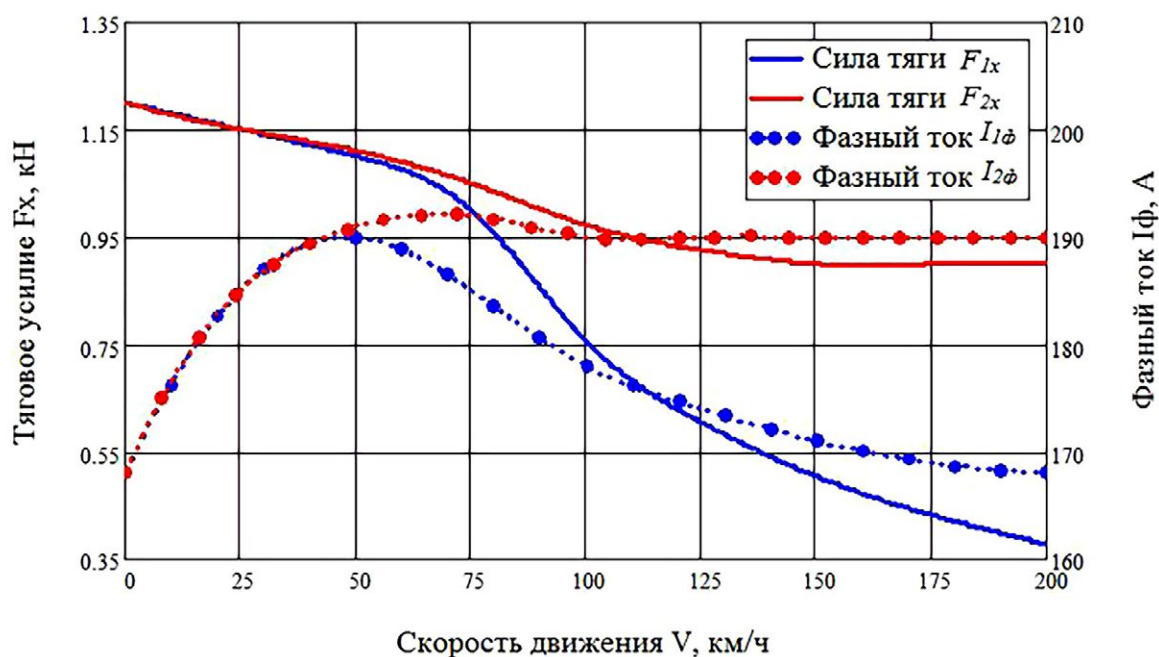


Рис. 9. Графики зависимостей силы тяги и фазного тока модуля от скорости

Fig. 9. Graphs of the dependences of traction force and phase current of the module on speed

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ МАССЕ ГРУЗА

Условия работы грузовой транспортной платформы таковы, что масса груза, устанавливаемого на платформе, не имеет фиксированного значения. Кратность возможного изменения массы транспортной платформы M_{mn} с грузом M_{gp} может составлять примерно 2,4 раза. В этих условиях задачей управления линейным двигателем, совмещающим функции тяги и подвеса, является обеспечение условия:

$$F_z = g(M_{mn} + M_{gp}), M_{gp} = var, \quad (9)$$

Если параметры управления заранее рассчитаны для заданной скорости движения и номинальной массы груза $M_{gp, nom}$, то выполнение условия (9) может быть достигнуто регулированием тока ограничения $I_{огр} = var$, при неизменных параметрах управления $\alpha = const$, $\Delta\beta = const$. Однако это ведет к снижению силы тяги. В свою очередь для коррекции значения силы тяги необходимо вводить в систему соответствующий контур регулирования, что существенно усложняет систему управления.

Как показали исследования это не единственный способ обеспечения выполнения условия (9). Магнитостатические исследования на 3D-модели двигателя выявили, что с ростом значения воздушного зазора δ одновременно наблюдается увеличение значения тяги F_x (при выполнении условия $F_z = const$). Физически это объясняется увеличением потоков рассеяния в магнитной системе. А, как известно, в реактивных индукторных машинах сила тяги образуется именно потоками рассеяния в торцевых частях магнитопровода [10]. Таким образом, коррекция значения силы тяги F_x при различной массе груза может быть достигнута заданием соответствующего значения воздушного зазора δ без изменения значений параметров управления.

Для демонстрации сказанного на рис. 10 приведены графики зависимостей тягового усилия, создаваемого модулем, от массы $F_{x1} = f(M)$, приходящейся на один модуль, а также графики зависимости фазного тока от массы $I_{\phi 1} = f(M)$. Зависимости получены для $V = 200$ км/ч при постоянных значениях параметров управления $I_{огр}$, α , $\Delta\beta$ и $\delta = var$. На графиках нанесены точки 1–7, в которых значения функций получены при зазорах $\delta_1 = 10$ мм ... $\delta_7 = 16$ мм. На рисунке также приведены аналогичные графики зависимостей $F_{x2} = f(M)$ и $I_{\phi 2} = f(M)$ (линии красного цвета),

полученные при постоянных значениях α , $\Delta\beta$, δ и $I_{огр} = var$. На графиках нанесены расчетные точки 1–13, в которых значения функций получены при $I_{огр1} = 250$ А, $I_{огр2} = 240$ А, $I_{огр1} = 230$ А, ... и т.д.

Таким образом, равновесное состояние системы магнитного подвеса (условие 9) при различной массе груза может быть достигнуто путем изменения величины воздушного зазора. Увеличение воздушного зазора (при неизменных параметрах управления) приводит к незначительному росту тягового усилия F_{x1} модуля при практически постоянном значении тока $I_{ф1}$. Тот факт, что значение тока $I_{ф1}$ остается практически постоянным свидетельствует о том, что электромагнитное состояние двигателя остается неизменным. Это позволяет предположить, что динамические характеристики двигателя как объекта управления также остаются неизменными.

В практическом плане идентификация массы груза может быть выполнена на стоянке после загрузки и перехода платформы в режим левитации с номинальным значением воздушного зазора. В этом режиме $\alpha = 0$, $\Delta\beta = 0$, а величина $I_{огр}$ будет соответствовать массе M платформы с грузом. При этом, если $I_{огр}$ окажется меньше значения, соответствующего номинальной массе груза $M_{гр.ном}$, то для коррекции

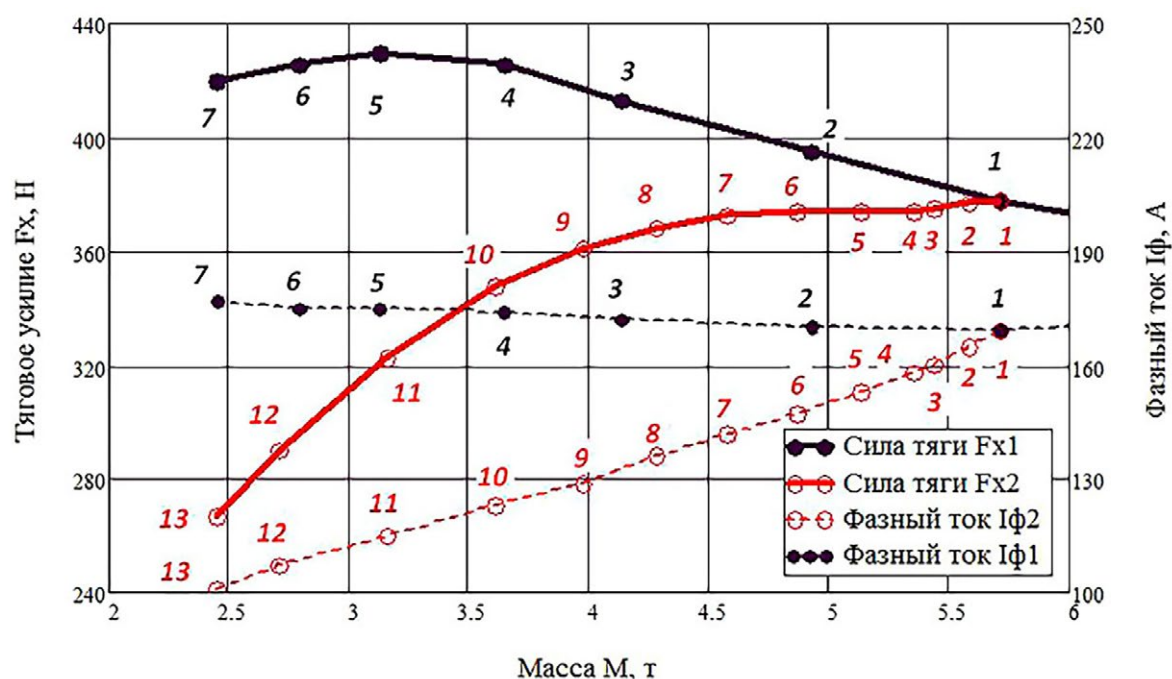


Рис. 10. Графики зависимостей силы тяги модуля и фазного тока от массы груза

Fig. 10. Graphs of module traction force and phase current versus load mass

тягового усилия должна быть выполнена коррекция величины воздушного зазора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены вопросы управления линейным вентильно-индукторным электроприводом, совмещающим функции тяги и магнитного подвеса.

При попытке адаптации известных алгоритмов управления тягой вращающихся реактивных индукторных машин к управлению линейным двигателем, совмещающим функции тяги и подвеса, выявлены проблемы достижения заданной подъемной силы на высоких скоростях. В результате расчетных исследований выявлена область управления двигателем, в которой формируется пульсирующий ток, существенно увеличивающий подъемное усилие двигателя. Режим работы двигателя с пульсирующим током не характерен для вращающихся машин данного класса, однако, его использование в двигателе совмещающим функции тяги и подвеса позволяет при высоких скоростях движения реализовать потенциал создания подъемной силы, заложенный при проектировании магнитной системы двигателя.

Исследовано влияние компонент управляющего воздействия на параметры двигателя. С учетом выявленного влияния предложен алгоритм управления, предусматривающий распределение компонент управляющего воздействия по каналам управления тягой и подвесом.

Предложен подход к выбору параметров управления, позволяющий минимизировать влияющее воздействие режима работы привода на систему электромагнитного подвеса. Это достигается за счет развязки внутренней динамики объекта путем введения ограничения на постоянство подъемной силы.

Расчетные исследования на модели трехфазного тягово-левитационного модуля показали, что в области допустимого управления при ограничениях, накладываемых системой магнитного подвеса, реализуются тяговые возможности, заложенные при проектировании магнитной системы двигателя.

Представлены результаты исследования тяговых возможностей двигателя при различной массе груза. Показано, что равновесное состояние системы магнитного подвеса при различной массе груза может быть достигнуто путем изменения величины воздушного зазора при неизменных параметрах управления.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании комбинированной системы управления тягой и магнитным подвесом грузовой транспортной платформы.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

The authors state that:

1. They have no conflict of interest;
2. This article does not contain any studies involving human subjects.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 2, № 3. С. 23–33. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24125908_21159036.pdf EDN: UHYQDJ
2. Коломейцев Л.Ф., Пахомин С.А. Развитие теории и создание новых конструкций индукторных машин // Известия вузов. Электромеханика. 2005. №2. С. 6–10. EDN: HSDBFF
3. Коломейцев Л.Ф., Бибииков В.И., Пахомин С.А. и др. Применение реактивных машин на транспорте // Известия вузов. Электромеханика. 2008. № 1. С. 67–70. EDN: KGCMBX
4. Смачный В.Ю., Шевкунова А.В., Смачный Ю.П. Применение вентильно-индукторного привода на транспорте // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2018. № 4. С. 91–94. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36825241_61149270.pdf EDN: YURPRJ
5. Киреев А.В. Вентильно-индукторные электроприводы для электроподвижного состава. Ростов-на-Дону: АкадемЛит, 2011. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: <https://privod-n.ru/uslugi/publikatsii/monografiya/>
6. Никифоров Б.В., Пахомин С.А., Птах Г.К. Вентильно-индукторные двигатели для тяговых электроприводов // Электричество. 2007. № 2. С. 34–38. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12841002_70126473.pdf EDN: KUZZQX
7. Щербаков В.Г., Коломейцев Л.Ф., Пахомин С.А. Индукторный привод для электроподвижного состава // Локомотив. 2005. № 2. С. 36–37. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12841002_97779061.pdf EDN: KUZZQX
8. Однокопылов Г.И., Розаев И.А., Брагин А.Д. и др. Сравнительный анализ отказоустойчивого управления асинхронного и вентильно-индукторного электропривода. В кн.: Интеллектуальные энергосистемы: труды

- IV Международного молодёжного форума, 10-14 октября 2016 г., Томск: в 3 т. Томск: Изд-во ТПУ, 2016. Т. 2. С. 89–93. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/36383/1/conference_tpu-2016-C43_V2_p89-93.pdf EDN: XVHBLB
9. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. М.: МЭИ, 2003.
 10. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Инженерная методика проектирования индукторной машины для вентильно-индукторного двигателя // *Электричество*. 2007. № 10. С. 24–32. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12840913_15448892.pdf EDN: KUZYIR
 11. Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н. Предпосылки создания высокоскоростной контейнерной транспортной системы // *Транспортные системы и технологии*. 2017. Т. 4. № 10. С. 4–41. doi: 10.17816/transsyst2017345-41
 12. Бахвалов Ю.А., Бочаров В.И., Винокуров В.А. и др. Транспорт с магнитным подвесом. М.: Машиностроение, 1991. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: http://scbist.com/scb/uploaded/1_1491622757.pdf
 13. Киреев А.В. Грузовой подвижной состав на магнитном подвесе. Обзор разработок и перспективы развития // *Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог*. 2022. Т. 59. № 3. С. 23–29. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: http://ipem.ru/content/Дайджест/tzd_59_web.pdf
 14. Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Кононов Г.Н. Электротехнический комплекс магнитолевитационного подвижного состава // *Инновационные транспортные системы и технологии*. 2021. Т. 7. № 3. С. 67–105. doi: 10.17816/transsyst20217367-105
 15. Киреев А.В. Разработка алгоритмов эффективного управления тяговым вентильно-индукторным электроприводом электропоезда: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2004. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002667685> EDN: NHQHPB
 16. ГОСТ 2582-2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. Дата введения 2015-01-01. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2014. Дата обращения: 04.12.2023. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293774/4293774534.pdf>

REFERENCES

1. Ptakh GK. Switched reluctance drive medium and high power: foreign and domestic experience, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*. 2015;2(3):23–33. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24125908_21159036.pdf EDN: UHYQDJ
2. Kolomeytsev LF, Pahomin SA. Development of the theory and the creation of new designs inductor machines. *Russian Electromechanics*. 2005;2:6–10. EDN: HSDBFF
3. Kolomeytsev LF, Bibikov VI, Pahomin SA, et al. The use of reactive transport of machines. *Russian Electromechanics*. 2008;1:67–70. EDN: KGCMBX
4. Smachnyy VYu, Shevkunova AV, Smachnyy YuP. Primeneniye ventil'no-induktornogo privoda na transporte. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo*

- universiteta putey soobshcheniya*. 2018;4:91–94. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36825241_61149270.pdf EDN: YURPRJ
5. Kireyev AV. *Ventil'no-induktornyye elektroprirody dlya elektropodvizhnogo sostava* (monograph). Rostov-on-Don: AkademLit; 2011. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: <https://privod-n.ru/uslugi/publikatsii/monografiya/>
 6. Nikiforov BV, Pakhomin SA, Ptakh GK. Ventil'no-induktornyye dvigateli dlya tyagovykh elektroprivodov. *Elektrichestvo*. 2007;2:34–38. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12841002_70126473.pdf EDN: KUZZQX
 7. Shcherbakov VG, Kolomeytsev LF, Pakhomin SA. Switched reluctance drive for electric rolling. *Locomotive*. 2005;2:36–37. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12841002_97779061.pdf EDN: KUZZQX
 8. Odnokopylov GI, Rozayev IA, Bragin AD, et al. Sravnitel'nyy analiz otkazoustoychivogo upravleniya asinkhronnogo i ventil'no-induktornogo elektropriroda. In: *Intellectualnye energosistemy: trudy IV Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma, 10–14 October 2016, Tomsk. 3 Vols*. Tomsk: Izd-vo TPU; 2016;2:89–93. (In Russ.). [cited: 04.12.2023] Available from: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/36383/1/conference_tpu-2016-C43_V2_p89-93.pdf EDN: XVHBLB
 9. Kuznetsov VA, Kuz'michev VA. *Ventil'no-induktornyye dvigateli*. Moscow: MEI; 2003. (In Russ.)
 10. Kuznetsov VA, Kuz'michev VA. Inzhenernaya metodika proyektirovaniya induktornoy mashiny dlya ventil'no-induktornogo dvigatelya. *Elektrichestvo*. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12840913_15448892.pdf EDN: KUZYIR
 11. Kireev AV, Kozhemyaka NM, Kononov GN. Prerequisites for the creation of a high-speed container transport system. *Transportation Systems and Technology*. 2017;4(10):4–41. doi: 10.17816/transsyst2017345-41
 12. Bakhvalov Yu.A., Bocharov VI, Vinokurov VA., et al. *Transport s magnitnym podvesom*. Moscow: Mashinostroyeniye; 1991. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: http://scbist.com/scb/uploaded/1_1491622757.pdf
 13. Kireyev AV. Gruzovoy podvizhnoy sostav na magnitnom podvese. Obzor razrabotok i perspektivy razvitiya. *Vestnik Instituta problem metallicheskih monopoliy: Tekhnika zheleznikh dorog*. 2022;59:23–29. (In Russ.). [cited: 04.12.2023] Available from: http://ipem.ru/content/Дайджест/tzd_59_web.pdf
 14. Kireev AV, Kozhemyaka NM, Kononov GN. Electrotechnical complex of maglev rolling stock. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2021;7(3):67–105. (In Russ.). doi: 10.17816/transsyst20217367-105
 15. Kireev AV. Razrabotka algoritmov effektivnogo upravleniya tyagovym ventil'no-induktornym elektroprirodom elektropoyezda [dissertation]. Novocherkassk; 2004. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002667685> EDN: NHQHPB

16. GOST 2582-2013. Rotating electrical traction machines for rail and road vehicles. Moscow: STANDARTINFORM; 2014. (In Russ.) [cited: 04.12.2023] Available from: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293774/4293774534.pdf>

Сведения об авторах:

Киреев Александр Владимирович, к.т.н., доцент;

eLibrary SPIN-код: 9674-4388; ORCID iD: 0000-0003-1157-2402;

Email: akireev@privod-n.ru

Кожемяка Николай Михайлович, к.т.н.;

eLibrary SPIN-код: 7921-4510; ORCID iD: 0000-0002-3976-7546;

Email: nkozhemyaka@privod-n.ru

Кононов Геннадий Николаевич;

eLibrary SPIN-код: 9565-6740; ORCID iD: 0000-0002-5511-9311;

Email: gkononov@privod-n.ru

Information about the authors:

Alexander V. Kireev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

eLibrary SPIN-код: 9674-4388; ORCID iD: 0000-0003-1157-2402;

Email: akireev@privod-n.ru

Nikolay M. Kozhemyaka, Candidate of Technical Sciences;

eLibrary SPIN-код: 7921-4510; ORCID iD: 0000-0002-3976-7546;

Email: nkozhemyaka@privod-n.ru

Gennady N. Kononov;

eLibrary SPIN-код: 9565-6740; ORCID iD: 0000-0002-5511-9311;

Email: gkononov@privod-n.ru