

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 537.312.62

DOI 10.17816/transsyst202172119-129

© Ю. Ф. Антонов

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ГЕТЕРОПОЛЯРНЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ЛЕВИТАЦИИ И ЛИНЕЙНОЙ ТЯГИ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

Обоснование: Излагаются методы расчета и элементы технологии создания гетерополярных магнитных систем левитации, боковой стабилизации и ротора-бегуна тягового линейного синхронного двигателя для развития транспортной технологии «Российский Маглев» с целью достижения повышенного левитационного зазора 0,2 м, снижения пороговой скорости движения транспортного средства выхода в режим левитации до 10 км/ч.

Цель: разработать методы расчета и проектирования гетерополярных полюсов из элементарных постоянных магнитов, однотипных катушек на базе композитных низкотемпературных сверхпроводников и ленточных высокотемпературных сверхпроводников второго поколения и пошаговую технологию их производства.

Задачи:

1. создание бортовой магнитной системы левитации и боковой стабилизации, позволяющей обеспечить левитационный зазор 0,2 м, пороговое значение скорости транспортного средства 10 км/ч при переходе в режим левитации, уменьшить магнитные поля рассеяния до уровня естественного поля земного магнетизма 50 мкТл;
2. создание ротора-бегуна линейного синхронного двигателя с безжелезным статором мощностью 10 МВт.

Методы: излагаются основные методологии расчетов: «анализ» и «синтез». Методология «анализ» применяется в решении «прямой» задачи расчета, когда задается конфигурация магнитной системы и рассчитывается магнитное поле в рабочей зоне, а, при необходимости, магнитные поля рассеяния. Данную методологию эффективно применять при наличии опыта создания магнитных систем. В противном случае применяется методология «синтез» для решения «обратной» задачи расчета, в которой задается картина распределения магнитного поля в рабочей зоне и находится (синтезируется) конфигурация магнитной системы.

Результаты выполненного исследования:

1. Проанализированы параметры и характеристики высокоэнергетических постоянных магнитов из редкоземельных металлов, низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводниковых обмоточных материалов, произведен выбор постоянных магнитов и сверхпроводникового обмоточного материала;
2. Выполнены расчеты магнитной системы из постоянных магнитов в «сборке Хальбаха» и в традиционной сборке в зубчатом ферромагнитном сердечнике;

3. Выполнены расчеты трековой катушки с прямоугольным поперечным сечением обмотки;

4. Разработаны методы расчета и оптимизации сверхпроводниковых магнитных систем из набора однотипных трековых модулей;

Выводы: Результаты выполненных фундаментальных исследований позволят приступить к расчету, проектированию и строительству конвейерно-магистральных пассажирских и грузовых линий магнитолевитационного транспорта, а также городского общественного транспорта.

Ключевые слова: узел левитации, линейный двигатель, постоянный магнит, сверхпроводник, трековый модуль.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrical Engineering

© **Yu. F. Antonov**

Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I
(St. Petersburg, Russia)

CALCULATION, DESIGN AND MANUFACTURE OF HETEROPOLAR MAGNETIC LEVITATION AND LINEAR DRIVE SYSTEMS OF MAGLEV TRANSPORT

Background: The methods of calculation and elements of the technology for creating heteropolar magnetic systems of levitation, lateral stabilization and a rotor-runner of a traction linear synchronous motor for the development of the transport technology "Russian Maglev" in order to achieve an increased levitation gap of 0.2 m, reduce the threshold speed of the exit vehicle in levitation mode up to 10 km/h.

Aim: to develop methods for calculating and designing heteropolar poles from elementary permanent magnets, coils of the same type based on composite low-temperature superconductors and high-temperature tape superconductors of the second generation and a step-by-step technology for their production.

Tasks:

1. Creation of an on-board magnetic system of levitation and lateral stabilization, allowing to provide a levitation gap of 0.2 m, a threshold value of vehicle speed of 10 km/h when transition to levitation mode, to reduce stray magnetic fields to the level of the natural field of terrestrial magnetism of 50 μT ;

2. Creation of a rotor-runner of a linear synchronous motor with an ironless stator with a power of 10 MW.

Methods: outlines the main calculation methodologies: "analysis" and "synthesis". The "analysis" methodology is adopted in solving the "direct" calculation problem, when the configuration of the magnetic system is set and the magnetic field in the working area is calculated, and, if necessary, the stray magnetic fields. This methodology can be effectively applied if there is experience in creating magnetic systems. Otherwise, the "synthesis" methodology is applied, which is used in solving the "inverse" calculation problem, in which the picture of the distribution of the magnetic field in the working zone is set and the configuration of the magnetic system is found (synthesized).

Results of the study performed:

1. The parameters and characteristics of high-energy permanent magnets made of rare-earth metals, low-temperature and high-temperature superconducting winding materials have been analyzed, the choice of permanent magnets and superconducting winding material has been made;

2. Calculations of the magnetic system of permanent magnets in the "Halbach assembly" and in the traditional assembly in a toothed ferromagnetic core have been carried out;

3. Calculations of a track coil with a rectangular cross-section of the winding are performed;

4. Methods for calculating and optimizing superconducting magnetic systems from a set of similar track modules have been developed;

Conclusions: The results of the performed fundamental research will allow starting the calculation, design and construction of conveyor-main passenger and freight lines of maglev transport, as well as urban public transport.

Key words: levitation unit, linear motor, permanent magnet, superconductor, track module.

ВЫБОР ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Магнитная цепь бортовых полюсов левитации и линейной тяги [1] с постоянными магнитами представляет собой непосредственно постоянные магниты и конструктивные детали: в «сборке Хальбаха» - маломанитные нержавеющей трубы, в традиционной сборке – зубчатый ферромагнитный сердечник. Конструктивные детали способствуют направлению магнитного потока в рабочий зазор. При этом возникают нежелательные магнитные потоки рассеяния. Вследствие этого магнитная цепь состоит из основного потока намагничивания и потока рассеяния внешнего и внутреннего, имеющегося в самом постоянном магните.

Поскольку высокоэнергетические постоянные магниты из редкоземельных металлов имеют большую стоимость, необходимо минимизировать объем элементарных постоянных магнитов.

Спеченный постоянный магнит на основе сплава NdFeB (неодим-железо-бор) по сравнению с магнитами другого типа обладает более высокой эффективностью и малым отношением энергетических параметров к цене.

Магниты NdFeB значительно превосходят по магнитной индукции ферритовые магниты Fe–Ba, Fe–Sr или широко применяемые магниты ЮНДК (AlNiCo). Они имеют плотность энергии в 8–10 раз выше, чем ферритовые магниты. Постоянные магниты NdFeB обладают наибольшей магнитной силой из всех постоянных магнитов, известных науке и производству в настоящее время. Магнитная индукция магнитов NdFeB 1,15–1,45 Тл. Теоретический предел магнитной индукции материала

NdFeB $\sim 1,6$ Тл. Магниты NdFeB значительно превосходят по устойчивости к размагничиванию. Потеря магнитных свойств магнитов NdFeB во времени составляет $\sim 2\%$ в 5 лет.

Для исследований выбраны магниты марки N35U, которые имеют следующие параметры: $B_r > 1,17$ Тл, $H_{cb} = 868$ кА/м; $H_{cj} > 955$ кА/м; $(BH)_{max} > 263$ кДж/м³; Диапазон рабочих t : от -60 до $+80^\circ\text{C}$.

Для создания эффективных гетерополярных систем, состоящих из элементарных магнитов, важным свойством элементарных магнитов является наличие у них высокой коэрцитивной силы. Это позволяет сбалансировать магнитную систему и достигнуть большей устойчивости к размагничивающим факторам.

Спроектированный гетерополярный магнитный полюс имеет габариты $0,5 \times 0,5$ м. и массу 45 кг. Он состоит из пяти модульных магнитов, представляющих собой тонкостенные (1,5 мм) трубы из маломагнитной нержавеющей стали с установленными в них десятью элементарными магнитами NdFeB с габаритами $46 \times 46 \times 46$ мм (Рис. 1).

Элементарные постоянные магниты монтируются в виде модулей. Магнитные модули скреплены между собой шпильками из нержавеющей стали (Рис. 2).

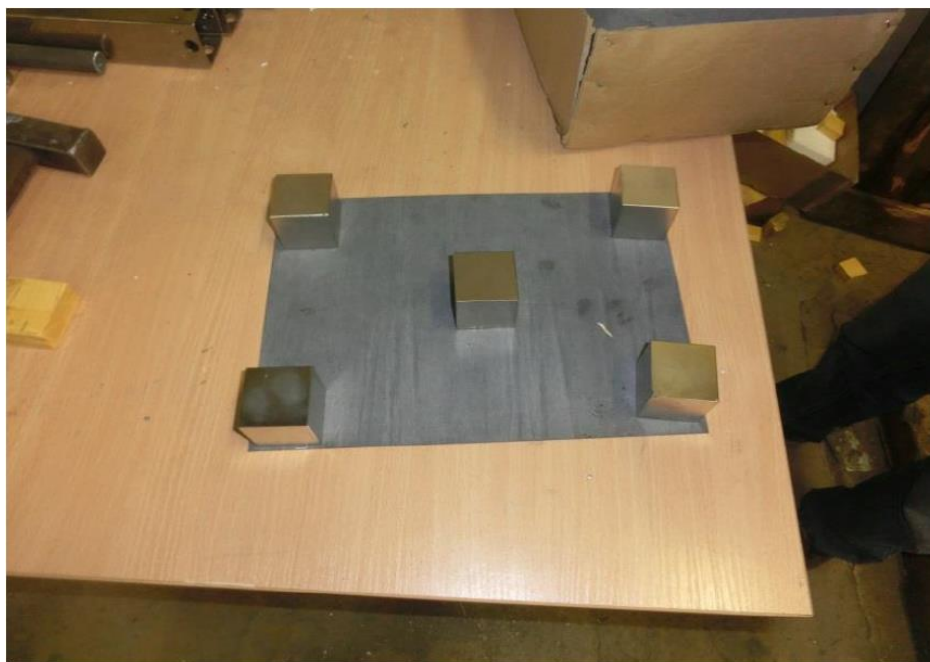


Рис.1. Элементарные постоянные магниты

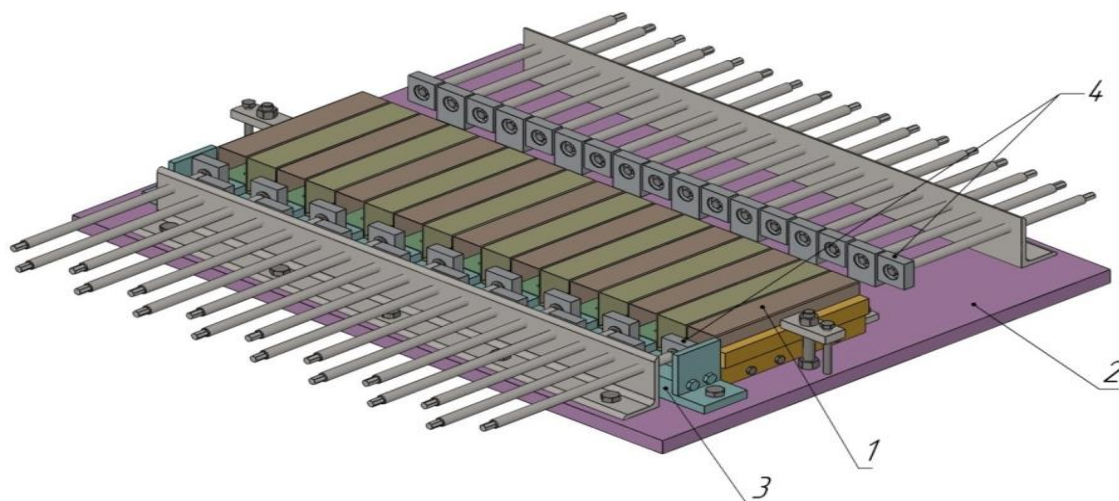


Рис. 2. Технологическая оснастка для установки магнитов

- 1 – немагнитный корпус магнитного модуля,
- 2 – несущая конструкция гетерополярного полюса,
- 3 – заглушка,
- 4 – поршень толкателя

На Рис. 3 представлены результаты расчета распределения магнитного поля, создаваемого гетерополярной магнитной системой на базе постоянных магнитов.

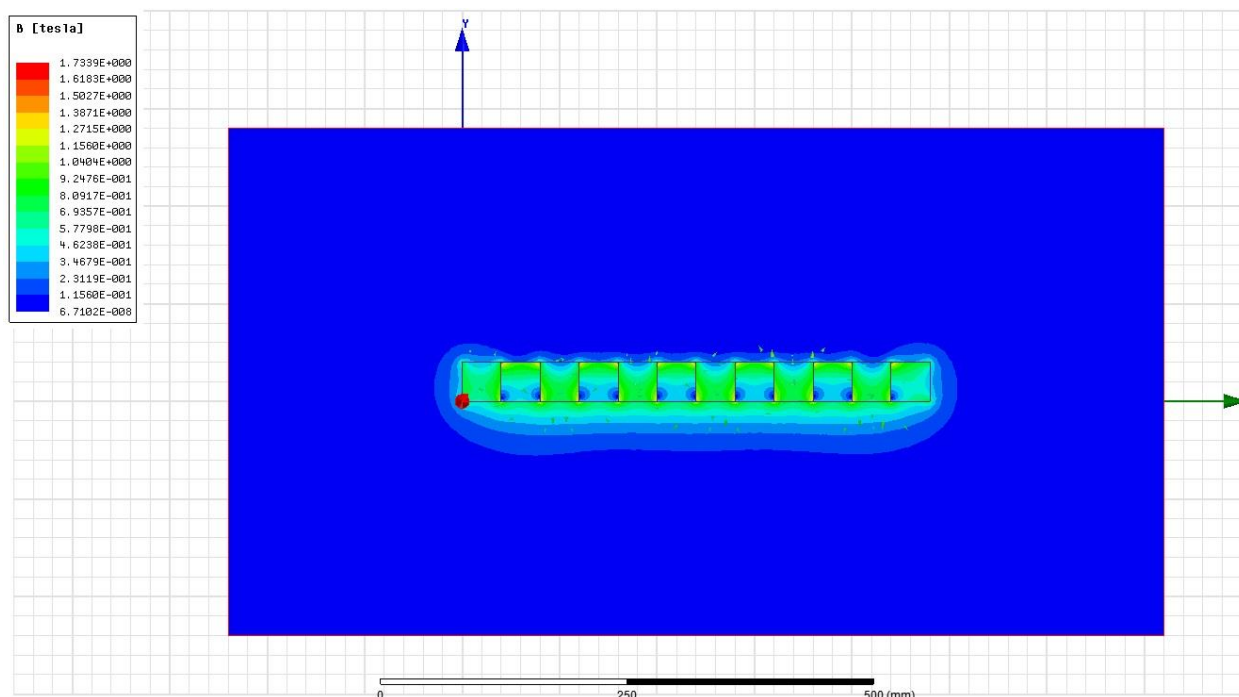


Рис. 3. Линии равного магнитного потенциала поля, создаваемого бортовым гетерополярным магнитным полюсом из однотипных элементарных постоянных магнитов с зубчатым ферромагнитным сердечником и без использования зубчатого ферромагнитного сердечника в так называемой «сборке Хальбаха»

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Одним из важных условий расчета и проектирования сверхпроводниковых магнитных систем является необходимость учета: (а) в сильных магнитных полях – зависимости критического тока сверхпроводникового обмоточного материала от индукции создаваемого магнитного поля, (б) в слабых магнитных полях – диамагнетизма используемого сверхпроводника, влияющего на индуктивность обмотки и механизм проникновения поля в сверхпроводник [2]. Условие (а) предполагает выполнение расчета магнитного поля не только в рабочем объеме, но и в области, занимаемой обмоткой. Магнитное поле в наиболее неблагоприятном месте обмотки не должно превосходить критическое значение.

Так как сверхпроводниковые обмоточные материалы значительно дороже традиционных проводниковых материалов, то проектирование магнитной системы должно предусматривать снижение расхода сверхпроводника.

В общем случае задачей расчета магнитного поля постоянных токов является нахождение по заданному распределению тока I вектора магнитной индукции \vec{B} или вектора напряженности поля \vec{H} во всех точках пространства, включая область протекания тока. Электромагнитное поле определяется полной системой уравнений Максвелла и уравнений связи. В задачах магнитостатики эти уравнения можно записать через потенциальные функции, что упрощает нахождение их решения, применяя теорию потенциала.

Магнитное поле исчерпывающе описывается векторным магнитным потенциалом \vec{A} , поскольку он существует во всем пространстве, а $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$. В области, где нет тока, в расчетах можно использовать скалярный магнитный потенциал U_M , и $\vec{H} = -\text{grad } U_M$. Дифференциальные уравнения магнитного поля для потенциальных функций представляют собой уравнения Пуассона и Лапласа, соответственно:

$$\Delta^2 \vec{A} = \mu \delta$$

$$\Delta^2 U_M = 0.$$

В отсутствие ферромагнитного сердечника или экрана и в предположении, что материал обмотки является парамагнетиком (эффект Мейсснера и процесс проникновения магнитного поля в сверхпроводник, в первом приближении, не рассматриваются), приходим к задаче расчета магнитного поля в однородной среде. Областью задания тока как функции

координат является обмотка. Для упрощения расчета и анализа влияния параметров магнитной системы на ее характеристики дискретное распределение тока заменяется равномерным по сечению обмотки. Наличие электрической изоляции и пустот учитывается через коэффициент заполнения по намотке $k = \frac{V_1}{V_1 + V_0}$, где V_1, V_0 - соответственно объемы проводника и пространства, занятого обмоткой. В результате получаем непрерывную функцию пространственного распределения тока I .

ОСНОВНЫЕ МЕТОДОЛОГИИ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

При проектировании магнитных систем, в зависимости от опыта, предлагаются две основные методологии расчетов: (А) «анализ» и (С) «синтез». Методология (А) «анализ» заключается в том, что задается конфигурация магнитной системы и рассчитывается магнитное поле в рабочей зоне, и, при необходимости, магнитные поля рассеяния. В данном случае решается «прямая» задача расчета. В методологии (С) «синтез», наоборот, задается картина распределения магнитного поля в рабочей зоне и находится (синтезируется) конфигурация магнитной системы, т.е. решается «обратная» задача расчета.

Сверхпроводниковая обмотка левитации и боковой стабилизации должна создавать вертикальное магнитное поле с заданной индукцией B в области расположения путевой обмотки левитации. Наиболее подходящей в электромагнитном отношении и по технологичности является трековая конфигурация составляющих обмотку катушечных модулей (Рис. 4). При значительном превышении длины катушки над ее шириной короткие (торцевые) стороны катушки вносят значительно меньший вклад в магнитное поле, чем ее длинные стороны. Однако на торцевые участки требуется до 40 % обмоточного материала, идущего на изготовление всей катушки. Данный факт следует непременно учитывать при проектировании бортовых магнитных систем. Близким геометрическим аналогом трековой является прямоугольная катушка. Поэтому расчетные методики разработаны в основном для прямоугольных и трековых катушек.

Модули бортовой магнитной системы левитации могут располагаться длинными сторонами в направлении [3] или перпендикулярно направлению движения транспортного средства.

В первом случае бортовая магнитная система левитации имеет большой полюсный шаг, около 1 м, вследствие чего транспортное средство переходит в режим левитации при высокой скорости – порядка 100 км/ч.

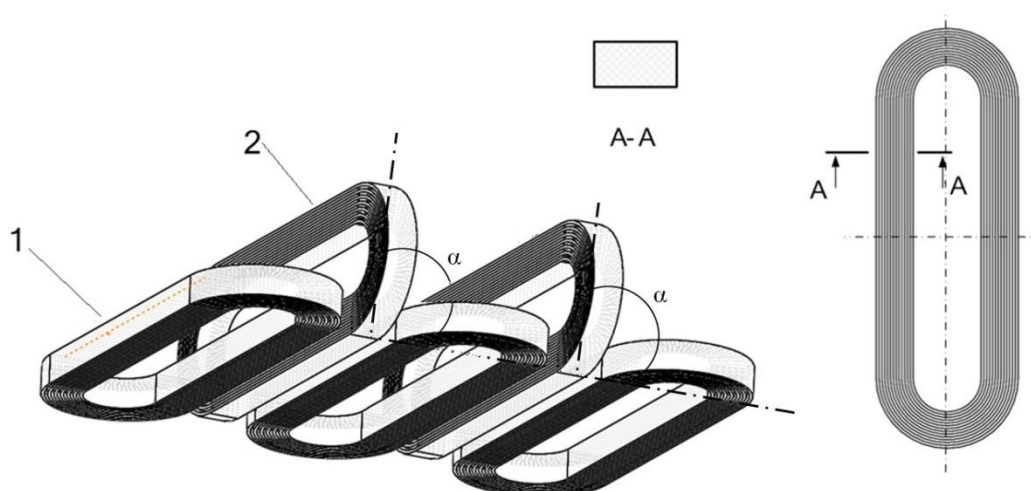


Рис. 4. Магнитная система из однотипных сверхпроводниковых трековых модулей

Для снижения порогового значения скорости выхода в режим левитации необходимо модули располагать длинными сторонами перпендикулярно направлению движения транспортного средства, уменьшая тем самым полюсный шаг. Так, для достижения пороговой скорости 10 км/ч полюсный шаг должен быть в 10 раз меньше, чем в японском проекте [2]. Как правило, в трековых катушках соотношение размеров длинной и торцевой сторон близко такому значению.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Полюсный шаг. С целью снижения пороговой скорости движения магнитолевитационного транспортного средства при переходе в режим левитации бортовой магнитный полюс левитации и боковой стабилизации должен выполняться с малым полюсным шагом, т.е. быть гетерополярным. Гетерополярную конструкцию бортового магнитного полюса левитации и боковой стабилизации проще всего изготовить на базе постоянных магнитов. Возможны два варианта исполнения бортового магнитного полюса левитации и боковой стабилизации: а) с зубчатым ферромагнитным сердечником, б) без ферромагнитного сердечника. В силовом магнитном отношении оба варианта сборки практически одинаковы. Тем не менее, вариант сборки с ферромагнитным сердечником позволяет на 1/3 сократить количество потребных элементарных постоянных магнитов.

Несмотря на высокие энергетические параметры постоянных магнитов, в частности, из редкоземельных металлов, например, NdFeB, для получения магнитных полей наиболее высокой интенсивности в рабочем

левитационном зазоре требуется применять сверхпроводниковые обмотки бортовых полюсов.

2. Выбор сверхпроводникового обмоточного материала. Бортовая сверхпроводниковая обмотка полюса левитации и боковой стабилизации работает в поле вертикальных и боковых сил при наличии вибраций. Во время разгона, торможения и движения на крейсерской скорости транспортного средства на обмотку действуют электромагнитные силы, вызванные реакцией «якоря» - путевой короткозамкнутой обмотки (реактивной шины или беличьей клетки) и переменные магнитные поля широкого спектра частот (особенно высших гармонических составляющих).

Поэтому от выбора сверхпроводникового обмоточного материала, конструкции сверхпроводниковой обмотки, способа ее замоноличивания (синоним: капсулирования) и крепления в криостате, создания надлежащей радиально-аксиальной системы каналов для однофазных и двухфазных потоков криоагента, зависит эффективная и надежная работа узла левитации и боковой стабилизации.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Сверхпроводниковые магнитные системы как с ферромагнитным сердечником, так без него обладают следующими преимуществами по сравнению с традиционными магнитными системами, выполненными, например, из медных или алюминиевых проводов. Их масса и габариты (даже с учетом криостата и системы криогенного охлаждения) примерно в два раза меньше, чем у обычных магнитных систем. Это преимущество обеспечивается за счет высокой конструктивной (средней по сечению) плотности тока в сверхпроводниковой обмотке, которая может составлять $\delta = 10^8 \div 10^9 \text{ А/м}^2$. Следствием высокой плотности тока является возможность получения высоких магнитных полей в рабочей зоне, до 20 Тл и более. Практическое отсутствие активного сопротивления сверхпроводниковой обмотки (кроме контактных соединений) существенно снижает потребление электроэнергии на собственные нужды магнитной системы. Электроэнергия расходуется только оживителем/рефрижератором/криокулером (и, если он предусмотрен, компрессором).

В традиционных магнитных системах электроэнергия, подводимая к обмотке, прямо пропорциональна квадрату магнитной индукции поля в рабочем объеме. В сверхпроводниковой магнитной системе количество потребляемой криогенной установкой электроэнергии не зависит от создаваемого магнитного поля.

Сверхпроводниковая магнитная система может работать в режиме «незатухающего тока» (синонимы: «замороженного потока», «замороженного тока»). Это обусловлено фундаментальным свойством сверхпроводящего контура – сохранять неизменным магнитный поток, сцепленный с ним. Переход в режим незатухающего тока осуществляется после начального заведения тока от внешнего источника питания, расположенного вне криостата. С достижением номинального тока сверхпроводниковая обмотка замыкается накоротко. Для этой цели, как правило, служит управляемый криотрон. Гальванические токовводы в том случае, когда они выполнены разъемными, демонтируются. Наиболее эффективным средством обеспечения данного режима является использование сверхпроводникового топологического генератора или преобразователя криотронного.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гетерополярные магнитные системы узла левитации и боковой стабилизации на базе высокоэнергетических постоянных магнитов или комбинации однопольных сверхпроводниковых модулей применяются в транспортной технологии «Российский Маглев». За счет этого технического решения транспортная технология «Российский Маглев» стала эффективнее существующих технологий, поскольку позволяет достичь повышенного левитационного зазора вплоть до 0,2 м и многократно уменьшить до 10 км/ч пороговую скорость выхода в режим левитации транспортного средства.

Результаты выполненных фундаментальных исследований позволяют приступить к расчету, проектированию и строительству конвейерно-магистральных пассажирских и грузовых линий магнитолевитационного транспорта, а также городских маглев-линий общественного транспорта.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

Библиографический список / References

1. Kim KK, Panychev AY, Blazhko LS, Rybin PK. Properties of a Synchronous Machine with Self-Regulating Magnetic Suspension of the Rotor when Its Axis Is Skewed. *Russian Electrical Engineering*. 2020;91(10):597-603 doi: 10.3103/S1068371220100053
2. Сан-Жам Д., Сарма Г., Томас Е. Сверхпроводимость второго рода / под ред. А.А. Абрикосова. – М.: Мир, 1970. 364 с. [Saint-James D, Sarma G, Thomas EJ. *Type II Superconductivity*. Moscow: Mir; 1970. 364 p. (In Russ.)].

3. Kazuo Sawada. Technological Development of the Superconducting Magnetically Levitated Train. *Japanese railway engineering*. 2008;(160):2-5.

Сведения об авторе:

Антонов Юрий Федорович, д.т.н.;

SPIN-код: 2335-5765; ORCID: 0000-0002-6910-1622;

E-mail: yuri-anto@yandex.ru

Information about author:

Yuri F. Antonov, Doctor of Technical Sciences;

SPIN-код: 2335-5765; ORCID: 0000-0002-6910-1622;

E-mail: yuri-anto@yandex.ru

Цитировать:

Антонов Ю.Ф. Расчет, проектирование и производство гетерополярных магнитных систем левитации и линейной тяги магнитолевитационного транспорта // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 2. – С. 119–129. doi: 10.17816/transsyst202172119-129

To cite this article:

AntonovYuF. Calculation, design and manufacture of heteropolar magnetic levitation and linear drive systems of maglev transport. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(2):119-129. doi: 10.17816/transsyst202172119-129