УДК 629.439:4.027.3:621.313.282:538.945:621.039.06 АДАПТАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТАНОВОК ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА ДЛЯ АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ МАГНИТНЫХ ПОДВЕСОВ ЛЕВИТАЦИОННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

В.М. Амосков¹, Д.Н. Арсланова¹, А.М. Базаров¹, Г.А. Баранов¹, А.В. Белов¹, В.А. Беляков¹, Т.Ф. Белякова¹, В.Н. Васильев¹, Е.И. Гапионок¹, А.А. Зайцев², М.В. Капаркова¹, В.П. Кухтин¹, А.Н. Лабусов¹, Е.А. Ламзин¹, М.С. Ларионов¹, Н.А. Максименкова¹, В.М. Михайлов¹, А.Н. Неженцев¹, И.Ю. Родин¹, С.Е. Сычевский¹, А.А. Фирсов¹, М.В. Хохлов¹, Н.А. Шатиль¹

¹Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения», Санкт-Петербург, Россия

Электродинамический подвес является одним из перспективных вариантов бесконтактных подвесов, обеспечивающих создание высокоскоростных транспортных левитационных систем. Анализ и разработка таких систем требуют проведения комплексных оптимизационных расчётов. Исследования по проблеме термоядерного синтеза привели к разработке в ОАО «НИИЭФА» вычислительной технологии для анализа нестационарных электромагнитных процессов в сложных электромагнитных системах. Эта вычислительная технология, базирующаяся на разработанных авторами пакетах вычислительных программ, была адаптирована для целей анализа систем магнитной левитации. Трёхмерные вычислительные модели учитывают как токопроводящие катушки (в том числе и сверхпроводниковые), так и постоянные магниты. Может быть выполнено моделирование всех значимых режимов движения транспортного средства. Получено совпадение результатов моделирования, базирующихся на различных подходах. Проведено сравнение данных численного моделирования и результатов специального натурного эксперимента, выполненного в Лоуренсовской национальной лаборатории (США). Получено, что точность численного моделирования электромагнитных полей, вихревых токов и пондеромоторных сил обеспечивает проведение оптимизационных расчётов различных вариантов конструктивного исполнения электродинамических подвесов.

Ключевые слова: термоядерный синтез, магнитная левитация, транспортное средство, электродинамический подвес, численное моделирование, электромагнитное поле, подъёмные и тормозящие силы, сверхпроводящие катушки, постоянные магниты.

ADAPTATION OF FUSION DEVICE COMPUTATIONAL TECHNOLOGY FOR MAGLEV VEHICLES DESIGN AND OPTIMIZATION

V.M. Amoskov¹, D.N. Arslanova¹, A.M. Bazarov¹, G.A. Baranov¹, A.V. Belov¹, V.A. Belyakov¹, T.F. Belyakova¹, V.N. Vasilev¹, E.I. Gapionok¹, A.A. Zaitzev², M.V. Kaparkova¹, V.P. Kukhtin¹, A.N. Labusov¹, E.A. Lamzin¹, M.S. Larionov¹, N.A. Maksimenkova¹, V.M. Mikhailov¹, A.N. Nezhentzev¹, I.Yu. Rodin¹, S.E. Sychevskii¹, A.A. Firsov¹, M.V. Hokhlov¹, N.A. Shatil¹

¹Joint Stock Company "D.V. EfremovScientificResearchInstituteofElectrophysicalApparatus", St. Petersburg, Russia ²St.Petersburg State University of Transport, St. Petersburg, Russia

Electrodynamic suspension is one of the most promising technologies for high-speed transport utilizing magnetic levitation (maglev). Development of maglev trains demands detailed design-supportive studies to search for the advanced configurations andoptimal performance. An original computational technique, elaborated and validated in electromagnetic simulations for fusion applications, has been adapted to simulate levitated vehicles. 3D models are utilized to describe superconducting or HTS coils and permanent magnets. Predictive simulations enable analysis of a levitated vehicle in all basic moving modes. The outputs form a consistent database on field distributions, eddy currents, ponderomotive lifting and drag forces. Test simulations demonstrated a good match with experimental data obtained on the Indutrack system prototype in the Lawrence Livermore National Laboratory (USA). The computational accuracy satisfies the requirements for practical application in railway transport.

Key words: fusion, magnetic levitation, vehicle, electrodynamic suspension, numerical simulation, electromagnetic field, ponderomotive lifting and drag forces, superconducting coil, permanent magnet.

введение

В ОАО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» разработана вычислительная технология моделирования электромагнитных систем электрофизических установок и оборудования для исследований по проблеме управляемого термоядерного синтеза [1, 2]. В работе обсуждается адаптация этой технологии для целей

анализа и оптимизации электромагнитных систем транспортных средств, работающих на принципе магнитной левитации, проведено сравнение экспериментальных данных, полученных в Лоуренсовской национальной лаборатории (LLNL) (г. Ливермор, США) с использованием макета электродинамического подвеса такого транспортного средства, с расчётными данными электромагнитных сил. Магнитолевитационный принцип движения является бесконтактным. Для компенсации сил тяжести и обеспечения устойчивости объекта используются электромагнитные силы. Движение транспортного средства осуществляется с помощью линейного тягового привода.

Наиболее широкое коммерческое приложение [3] имеют два типа магнитной левитации [4-9]:

— электромагнитный подвес (electromagnet suspension, EMS, ЭМП), включающий магнитодинамическую систему подвеса;

— электродинамический подвес (electrodynamic suspension, EDS, ЭДП), включающий систему подвеса INDUCTRACK (Permanent Magnet EDS).

Физической основой магнитной левитации является электромагнитное взаимодействие объектов.

Технология ЭМП использует силу притяжения электромагнита, закреплённого на транспортном средстве, к расположенному над ним стальному рельсу. Эта сила зависит от величины воздушного зазора между магнитом и рельсом и магнитодвижущей силы магнита, определяемой, в свою очередь, величиной тока возбуждения источника питания. Контроль зазора осуществляется регулированием тока возбуждения электромагнита. Система обеспечивает левитацию в статических условиях, т.е. для покоящегося транспортного средства.

Технология с магнитодинамическим подвесом может рассматриваться как разновидность электромагнитного подвеса, в котором вместо электромагнита используется постоянный магнит.

В рассматриваемом случае ЭДП-сила левитации обусловлена взаимодействием тока движущегося источника с магнитным полем вихревых токов, наведённых в проводящих элементах неподвижной путевой структуры. Величина этой силы зависит от силы тока источника поля, скорости движения и воздушного зазора между источником поля и проводящими элементами путевой структуры. В качестве источника магнитного поля могут использоваться сверхпроводниковые магниты. Левитация возникает только в случае движения транспортного средства.

Технологию INDUCTRACK [3, 10—16] можно рассматривать как разновидность технологии ЭДП, в которой бортовым источником поля служат постоянные магниты.

Цели данной работы заключались в разработке и анализе вычислительных моделей ЭДП магнитолевитационных транспортных систем, которые обеспечивают требуемое при проектировании детальное описание элементов конструкции, режимов движения и пространственно-временных распределений нагрузок.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛЕВИТАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В качестве инструментария для расчётного исследования электромагнитных процессов применялись программные пакеты KLONDIKE [17], TYPHOON [18, 19], TORNADO [1, 2] и КОМРОТ [20, 21], верифицированные при проведении комплексных расчётов сложных электрофизических установок, в частности, Международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР [22].

Детальное описание подходов и разработанного программного обеспечения приведено ранее [1, 2]. Система уравнений макроскопического электромагнитного поля в дифференциальной форме связывает векторы напряжённостей электрического **E** и магнитного **H** полей, векторы электрической **D** и магнитной **B** индукций между собой, а также с объёмной плотностью свободных электрических зарядов ρ и вектором объёмной плотности электрического тока (тока проводимости) **j**. Из этих уравнений следует уравнение непрерывности $\nabla \mathbf{j} + \rho/\partial t = 0$, выражающее закон сохранения количества заряда. Здесь ∇ — дифференциальный оператор Гамильтона, t — время, символ $\rho/\partial t$ означает дифференцирование по времени в данной точке пространства.

Во многих приложениях, помимо поля тока проводимости **j**, удобно принять [23] существование в среде ещё и заданного поля стороннего тока **j**^e. С целью учёта сторонних токов необходимо изменить первое уравнение Максвелла путём замены вектора **j** на вектор **j** + **j**^e.

Система уравнений Максвелла, дополненная материальными уравнениями, законом Ома, граничными и начальными условиями, однозначно определяет решения всех задач макроскопической электродинамики. Для частных случаев эти уравнения упрощаются.

В случае квазистационарного приближения электромагнитное поле изменяется достаточно медленно, так что процессы поляризации успевают следовать за изменениями поля, и соотношения между рассматриваемыми пятью векторами **D**, **E**, **B**, **H**, **j** не зависят от производных этих векторов по времени [23, 24]. В силу конечной скорости распространения поле переменных токов может удовлетворять условиям квазистационарности лишь в ограниченной области пространства [24]. Оценки показывают, что внутри металлов плотность токов смещения пренебрежимо мала по сравнению с плотностью проводимости для всех частот, применяемых в технике. В этом случае первое уравнение Максвелла принимает вид $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \mathbf{j}^{e}$, второе уравнение Максвелла для квазистационарных процессов записывают в форме $\nabla \times \mathbf{E} = \partial \mathbf{B}/\partial t$. Для уменьшения размерности задачи весьма эффективным является известный подход, базирующийся на применении модифицированного или редуцированного, или обобщённого скалярного магнитного потенциала, известного как «Т- Ω »-метод, или метод векторного электрического потенциала в англоязычной литературе. В русскоязычной литературе используется определение «метод сведения вихревого магнитного поля к потенциальному полю источников». В этом случае для искомого потенциала число неизвестных минимально и совпадает с числом узлов сетки.

Следуя работам Я.И. Френкеля, В.М. Грешнякова, С.J. Carpenter'a, К.С. Демирчяна, Н.И. Дойникова, В.Л. Чечурина и др., можно ввести вектор **P** (или в других обозначениях **T**) такой, что $\nabla \times \mathbf{P} = \mathbf{j}$. Из условия $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}$ может быть получено $\nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{P}$ или $\nabla \times (\mathbf{H} - \mathbf{P}) = 0$. Соответственно для описания поля $\mathbf{H} - \mathbf{P}$ может быть введён скалярный «модифицированный» или «обобщённый» магнитный потенциал $\boldsymbol{\varphi}$ (или в других обозначениях Ω): $\mathbf{H} - \mathbf{P} = -\nabla \boldsymbol{\varphi}$ или $\mathbf{H} = -\nabla \boldsymbol{\varphi} + \mathbf{P}$. Для известного вектора **P** распределение этого потенциала может быть найдено из решения краевой задачи для уравнения $\nabla \mu_0 \mu (-\nabla \boldsymbol{\varphi} + P) = 0$, дополненного граничными условиями.

Вектор **Р** может быть интерпретирован как удельный магнитный момент двойного магнитного слоя, который при известных условиях эквивалентен в магнитном отношении замкнутым токам [24]. Построение **Р** предполагает введение условных перегородок (магнитных листков), совпадающих в пространстве с двойными слоями. Эти перегородки должны опираться на замкнутые токовые контуры. Сама форма этих перегородок может быть произвольной. Вектор **Р** в каждой точке совпадает по направлению с векторным элементом их поверхности. Выбор формы построения векторного электрического потенциала **Р** определяется особенностями каждой конкретной задачи, принципами оптимизации алгоритма и возможностями программного обеспечения.

Данный подход отличается высокой эффективностью в случае электромагнитных систем, которые могут быть описаны моделью проводящих оболочек [19], и применим, если время диффузии магнитного поля τ через оболочку толщиной *h* и проводимостью $\sigma = 1/\rho$ много меньше характерного времени Δt анализируемого процесса, т.е. $\tau \approx \mu_0 \sigma h^2 << \Delta t$. В этом случае задача формулируется лишь относительно одной неизвестной — нормального к оболочке компонента векторного электрического потенциала $\mathbf{P} = P_n \mathbf{e}_n (\mathbf{e}_n - \text{орт нормали к оболочке}), определяемого соотношением <math>\mathbf{j}h = \nabla \times \mathbf{P}$, где \mathbf{j} — плотность вихревого тока на оболочке.

Для односвязной оболочки S, находящейся во внешнем меняющемся поле с индукцией \mathbf{B}_{ext} , уравнение относительно P_n может быть записано в виде [19]

$$\mathbf{e}_{n}\left[\nabla_{r}\times\frac{\mathbf{\rho}}{h}\left[\nabla_{r}P_{n}(t,\mathbf{r})\times\mathbf{e}_{n}\right]\right]+\frac{\mu_{0}}{4\pi}\frac{\partial}{\partial t}\int\frac{\left[\nabla_{r}P_{n}(t,\mathbf{r})\times\mathbf{e}_{n}\right]\times(\mathbf{r}-\mathbf{r}')}{\left|(\mathbf{r}-\mathbf{r}')^{3}\right|}\,ds=-\frac{\partial B_{n,\mathrm{ext}}(t,\mathbf{r})}{\partial t}\,.$$

Однозначно определённый (с точностью до константы) потенциал Р может быть введён только для односвязных поверхностей. В общем случае многосвязных и ветвящихся поверхностей для сведения их к односвязным подобластям вводятся условные разрезы и условные непроводящие поверхности. На линиях стыковки условных непроводящих поверхностей с проводящими элементами конструкции компонент потенциала *P_n* испытывает скачок.

В случае ветвления поверхности *S*, т.е. когда на некотором контуре *C* стыкуются более двух листов поверхности *S*, следует наложить условие, соответствующее дифференциальной форме первого закона Кирхгофа: $\Sigma_{\lambda}(\mathbf{e}_{C}[\mathbf{e}_{n\lambda}\times\mathbf{e}_{\tau\lambda}])\partial P_{n}/\partial C|_{\lambda,C} = 0$, где суммирование ведётся по всем листам λ , стыкующимся вдоль контура *C*; \mathbf{e}_{C} — единичный вектор, направленный вдоль *C*; $\mathbf{e}_{\tau\lambda}$ — единичный вектор, направленный вдоль *C*; $\mathbf{e}_{\tau\lambda}$ — единичный вектор, направленный вдоль листа λ из *C*.

Интегродифференциальное уравнение путём дискретизации сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, в матричных обозначениях имеющей вид $\sum_j (M_{ij}dP_j/dt + R_{ij}P_j) = -d\Phi_i/dt$. Численное решение системы позволяет найти распределение P_n и рассчитать эволюцию вихревых токов в проводящих оболочках, а также распределение магнитных полей, пондеромоторных сил, тепловыделений и других параметров. Изложенный подход составил методологическую основу комплекса программ ТҮРНООN.

Трёхмерная модель используется во всех случаях, когда модель оболочек неприменима или требуется её верификация. Такая модель также имеет ограничения, связанные, в частности, с аппроксимационными свойствами конечно-элементной сетки на начальных стадиях переходного процесса, когда характеристическая глубина проникновения поля мала. В этом случае может быть применена модель проводника с идеальной проводимостью для расчёта поля вне проводников.

Комплекс программ TORNADO разработан для расчёта переходных процессов в объёмных проводящих телах. Задача формулируется относительно трёх компонентов электрического векторного потенциала **P** и модифицированного скалярного потенциала φ . Поскольку вектор **P** определён с точностью до градиента произвольной скалярной функции, то для его однозначного определения необходимо использовать калибровочное условие. В частности, комплекс программ TORNADO использует калибровочное условие **P**·**u** = 0, где **u** = **u**(**r**) — произвольное стационарное векторное поле, которое не имеет замкнутых силовых линий, и **u**(**r**) \neq 0 во всей области пространства R^3 , где потенциал **P** отличен от нуля.

Полное магнитное поле \mathbf{H}_{tot} представляется в виде суперпозиции $\mathbf{H}_{tot} = \mathbf{H} + \mathbf{H}_{ext}$ неизвестного магнитного поля вихревых токов \mathbf{H} и магнитного поля \mathbf{H}_{ext} , создаваемого заданными внешними источниками. Для нахождения неизвестных потенциалов используется система уравнений, которая при отсутствии магнитных материалов ($\mu = 1$) принимает вид

$$\nabla \times (\rho(\nabla \times \mathbf{P})) + \mu_0 \partial (\mathbf{P} + \nabla \phi) / \partial t = -\mu_0 \partial \mathbf{H}_{\text{ext}} / \partial t; \ \nabla (\mathbf{P} + \nabla \phi) = 0;$$
$$\mathbf{H} = \mathbf{P} + \nabla \phi; \ \mathbf{Pu} = 0.$$

Первое уравнение определено только для проводящих односвязных подобластей с удельным электрическим сопротивлением ρ , а второе уравнение определено для всего пространства R^3 .

Как видно из системы уравнений, для нахождения вихревых токов, вектор плотности которых удовлетворяет условию $\nabla \times \mathbf{P} = \mathbf{j}$, необходимо знать пространственно-временное распределение внешнего магнитного поля \mathbf{H}_{ext} в проводящих подобластях пространства R^3 . Эти распределения могут быть получены, например, с использованием комплексов программ KLONDIKE или KOMPOT.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДВЕСА

Модель магнитной системы ЭДП должна содержать описание источников поля, установленных на движущемся транспортном средстве, и системы проводящих элементов путевой структуры, обеспечивающих протекание вихревых токов. В случае необходимости учитываются все значимые проводящие структуры, требуется принять во внимание взаимное влияние различных систем друг на друга (в том числе проблему электромагнитной совместимости).

Решение этой задачи средствами комплексов программ TYPHOON и TORNADO позволяет рассчитать распределения плотностей вихревых токов, магнитных полей, тепловыделений, пондеромоторных сил и других параметров во всех элементах подвеса с учётом магнитных свойств материалов (например, постоянных магнитов). Результаты расчётов тепловыделений обеспечивают исходные данные для моделирования теплофизических процессов. В частности, может быть выполнен детальный термогидравлический анализ сверхпроводящих систем [25]. Расчёт напряжённо-деформированного состояния и прочности конструкции под действием пространственно-неравномерных переменных нагрузок, обусловленных пондеромоторными силами и градиентами температур, может быть выполнен для любых сценариев движения. Такой подход обеспечивает решение совместных задач с целью многофункциональной многовариантной оптимизации конструкции на стадиях её разработки и испытания, переходы между этапами расчётов после пересмотра и уточнения моделей (в случае необходимости) позволяют замкнуть схему алгоритма численного моделирования, в частности, для учёта нелинейных свойств элементов ЭДП.

В расчётах используются две системы координат, связанные с движущимся транспортным средством и неподвижными элементами путевой структуры.

Глобальная неподвижная система координат, связанная с элементами неподвижной путевой структуры. Плоскость *XY* компланарна горизонтальной плоскости. Положительное направление оси *X* совпадает с направлением движения. Ось *Z* перпендикулярна плоскости *XY* и направлена вертикально вверх. Направление оси *Y* соответствует правой тройке векторов в системе осей *X*, *Y*, *Z*.

Подвижная система координат, связанная с бортовым источником магнитного поля. Главный вектор электромагнитной силы, действующей на транспортное средство, определяется величиной интеграла плотности силы, вычисленного по объёму токонесущих катушек или постоянных магнитов бортового источника поля. Левитационная сила является вертикальным компонентом главного вектора электромагнитной силы, сила электродинамического торможения — компонент главного вектора, обратного по направлению вектору мгновенной скорости движения, сила бокового смещения — компонент главного вектора, ортогональный левитационной силе и силе электродинамического торможения.

Путевая структура левитационной системы может быть разделена на активную путевую структуру, образованную токонесущими обмотками линейного двигателя, и пассивную путевую структуру, представляющую собой токопроводящие шины, в которых развиваются вихревые токи, обеспечивающие работу систем левитации.

Для систем магнитной левитации используются сборки постоянных магнитов Халбаха [10], которые состоят из однородно намагниченных магнитов одинаковой геометрической формы, обычно, прямоугольных параллелепипедов. Векторы намагничивания каждого магнита в сборке лежат в одной плоскости и поворачиваются на один и тот же фиксированный угол α при последовательном перемещении точки наблюдения от одного магнита к другому. В частности, периодическая структура сборки Халбаха при повороте вектора намагничивания на 90° образована четырьмя магнитами (M = 4), а для $\alpha = 45^{\circ}$ M = 8. Целое число М называется магнитным периодом. Длина магнитного периода $L_{\rm M}$ определяется как суммарный размер М магнитов в направлении движения.

Для систем магнитного подвеса, использующих катушки, пространственно-периодическая структура магнитного поля и магнитный период могут быть определены аналогичным способом.

При движении источника поля, установленного на транспортном средстве и имеющего пространственно-периодическую магнитную структуру, в проводящих элементах пассивной путевой структуры вследствие изменения магнитного поля индуцируются вихревые токи, при этом частота основной гармоники поля *f* оценивается соотношением $f = V/L_M$, где *V* — скорость движения. Исходя из оценки максимальной скорости движения, например, скорости звука *V* ~ 333 м/с и минимальной величины длины магнитного периода $L_M \sim 4.5 \cdot 10^{-2}$ м = 0,2 м, можно получить оценку величины *f* ~ 2.10³ Гц.

Анализ характерных частот электромагнитных процессов с учётом габаритных размеров левитационных систем железнодорожного транспорта и скоростей их движения позволяет использовать квазистационарное приближение [24, 26] для описания электромагнитного поля и ограничиться рассмотрением квазистационарных токов. Это означает [24], что магнитное поле переменных токов и силы электромагнитного взаимодействия между ними в каждый момент времени имеют такие же значения, какие имели бы эти величины в случае постоянных токов той же силы, что и мгновенные силы переменных токов.

МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

В данном разделе описывается вычислительная модель ЭДП на основе постоянных магнитов (ПМ) технологии INDUCTRACK [11—16]. Компоновочная схема и основные размеры рассматриваемого вари-

анта ЭДП на основе пяти ПМ в сборке по схеме Халбаха [10] и путевой структуры в виде сплошной алюминиевой шины показаны на рис. 1. Модуль вектора намагничивания ПМ принят равным µ₀M_r = 1 Тл.

Без учёта эффектов размагничивания поля создаваемые ПМ могут вычисляться с использованием аналитических выражений, полученных либо для однородно намагниченных многогранников, либо для эквивалентирующих токовых витков [17]. В частности, для обоснования выбора числа этих витков при расчёте сил в системе постоянный магнит—проводящая шина были сопоставлены результаты расчётов полей и сил по двум моделям:

— модель № 1 описывает систему из двух однородно намагниченных ПМ размером $50 \times 500 \times 50$ мм в направлении осей *X*, *Y*, *Z* соответственно, расположенных симметрично относительно плоскости *Z* = 0 с зазором $2h_z$ между ними, вектор намагничивания верхнего ПМ совпадает с V_x — скорость движения положительным направлением оси *Z* в нижнем ПМ — направлен в проти



Рис. 1. Схема и основные размеры ЭДП на основе пяти ПМ, намагниченных по схеме Халбаха: вид сбоку (*a*), вид сверху (δ); V_x — скорость движения

положительным направлением оси Z, в нижнем ПМ — направлен в противоположную сторону;

— модель № 2 состоит из двух прямоугольных соленоидов, эквивалентирующих магниты и имеющих *N* бесконечно тонких токовых витков.

Величина интегральной электромагнитной силы, действующей на каждый магнит, определялась численным интегрированием компонентов тензора максвелловских натяжений [24]. Результаты вычислений вертикальной (отталкивающей) силы для обеих моделей представлены в таблице. Как видно из таблицы, с практической точки зрения для достижения точности расчётов порядка нескольких процентов достаточно ограничиться числом витков N = 4—8.

Зазор <i>h</i> _z , мм	Сила отталкивания Н				
	Модель № 1	Модель № 2			
		N = 4	N = 8	N = 16	N = 32
5	3337	$3206, \delta = 3,9\%$	$3301, \delta = 1,1\%$	3328, $\delta = 0,28\%$	3335, $\delta = 0.07\%$
10	2163	2105, $\delta = 2,7\%$	2147, $\delta = 0,7\%$	$2159, \delta = 0,17\%$	$2161,7, \delta = 0,04\%$
30	590	583, $\delta = 1,2\%$	588, $\delta = 0,3\%$	589,7, $\delta = 0.08\%$	
50	235	233, $\delta = 0,68\%$	234, $\delta = 0,17\%$		
100	50	$49,94, \delta = 0,25\%$			
200	8	$7,92, \delta = 0,09\%$			
400	0,8978	$0,8976, \delta = 0,03\%$			

Сила отталкивания, действующая на магнит, и относительное отклонение результатов расчётов δ по двум моделям в зависимости от зазора h_z и числа витков N

Следует заметить, что сопоставление результатов расчётов с использованием двух независимых моделей свидетельствует о приемлемой точности численного моделирования полей и сил и, как следствие, об адекватности принятой расчётной модели для описания источников поля ЭДП.

На рис. 2 показана эквивалентная схема замещения пяти ПМ, в сборке по схеме Халбаха четырьмя токовыми витками.

Как известно [10], сборка Халбаха на длине магнитного периода $L_{\rm M}$ даёт близкое к синусоидальному распределение поля в зазоре, которое весьма неоднородно по толщине проводящей шины. При этом на скоростях движения, превы-



Рис. 2. Схема замещения пяти пти четырьмя токовыми витка вид сбоку (a), вид сверху (b)

шающих 10 м/с, начинает проявляться скин-эффект, заключающийся в локализации поля и индуцированных токов в приповерхностном слое. Известно [24, 26], что в режиме гармонических колебаний с частотой $\omega = 2\pi f$ в неферромагнитном проводнике с удельным сопротивлением ρ_0 приблизительно 86% тока сосредоточено в слое толщиной $2\Delta_0 = \sqrt{8\rho_0/\mu_0\omega}$. Для характерной частоты 10^3 Гц толщина скинслоя $2\Delta_0$ в алюминии составляет примерно 5 мм.

Это приводит к необходимости построения вычислительных моделей ЭДП больших размерностей для адекватного описания электромагнитных процессов в проводящих элементах путевой структуры.

МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КАТУШЕК



Рис. 3. Расположение СП-катушек, моделируемых токовыми витками, над путевой структурой в виде сплошной алюминиевой шины: вид сбоку (*a*), вид сверху (*б*)



Рис. 4. Зависимость подъёмной силы в ЭДП от величины зазора h между катушками и путевой структурой: ТҮРНООN-модель для скорости v = 50 м/с; KLONDIKE-модель для максимальной подъёмной силы

На рис. 3 показаны компоновочная схема и основные размеры типичного варианта системы ЭДП на основе сверхпроводниковых (СП) катушек и токопроводящей шины путевой структуры.

Предполагая малость размеров сечений катушек по сравнению с расстоянием от них до рассматриваемых точек наблюдения, пара СП-катушек моделируется двумя расположенными в горизонтальной плоскости прямоугольными бесконечно тонкими витками с токами [17, 27]. Полный ток катушек принят равным 800 кА виток. Оценка максимально достижимой подъёмной силы, действующей на СПкатушки, в приближении нулевой толщины скинслоя (что теоретически реализуется при бесконечно большой скорости движения или идеальной электрической проводимости токопроводящей шины) выполнена с помощью программы KLONDIKE для ряда величин зазоров и показана на рис. 4. Величина этой силы является асимптотой, к которой стремится подъёмная сила с увеличением скорости.

Расчёты переходных электромагнитных процессов проводились с помощью программы ТҮРНООN для модели, в которой сплошной алюминиевый лист заменялся одной проводящей оболочкой, располагавшейся в середине листа, с эффективной толщиной 20 мм. При скоростях движения катушек вплоть до 150 м/с глубина проникновения магнитного поля/тока в материал листа (толщина скин-слоя) больше толщины листа, что обосновывает такое расположение оболочки в модели токопроводящей шины.

Стационарные характеристики силового взаимодействия находились как результат реше-

ния нестационарной задачи, причём искомое стационарное решение определялось методом установления. Рассматривались два варианта начальных условий. Для первого варианта принималось, что в момент t = 0 ток в витках имеет номинальное значение, вихревые токи в оболочке отсутствуют и движение витков с постоянной скоростью начинается с момента t = 0+. Во втором варианте начальное распределение поля и токов в оболочке соответствовало решению задачи о скачкообразном изменении тока в витке от нуля до номинального значения при бесконечной проводимости оболочки, в момент времени t = 0+ витки начинают двигаться вдоль оболочки с постоянной скоростью. Совпадение стационарных составляющих решений для одной и той же системы ЭДП при различных начальных условиях (рис. 5) свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Следует отметить, что результаты моделирования с помощью комплекса программ ТҮРНООN для типичного варианта ЭДП приближаются к предельным значениям сил, рассчитанных с помощью комплекса программ KLONDIKE (см. рис. 4). Расхождение результатов по двум моделям является следствием конечной ширины путевой структуры, отражённой в модели комплекса ТҮРНООN, и путевой структуры в виде бесконечной плоскости в модели комплекса KLONDIKE. Это расхождение заметнее проявляется при сопоставимых величинах высоты зазора и ширины путевой структуры.



Переход от анализа с использованием описанной модели к разработке конструкции СП-катушек, характе-

ных условий для v = 50 м/с, h = 15 мм: 1, 3 — подъёмные силы, 2, 4 — силы торможения

ризующихся сложной геометрической формой, наличием изоляции и несущей структуры, требует проведения достаточно большого объёма уточняющих расчётов, которые также могут быть выполнены с помощью разработанных программных комплексов.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА TEST RIG

Экспериментальная установка TEST RIG. Экспериментальная установка TEST RIG [10, 11] (LLNL, г. Ливермор, США) была создана для сравнительного анализа различных вариантов конструктивного исполнения ЭДП-технологии INDUCTRACK [10—14] и верификации вычислительных программ для расчёта основных характеристик ЭДП.

В рассматриваемом варианте сборки магнитов были закреплены в неподвижной конструкции, оборудованной датчиками сил, скорости движения и направляющими роликами для скольжения путевой структуры, перемещаемой между магнитами. На рис. 6 показаны основные размеры электромагнитной системы установки TEST RIG, детально описанной в [16].

Сборки Халбаха с магнитным периодом M = 4 были изготовлены из постоянных магнитов NdFeB с остаточной индукцией $B_r = \mu_0 M_r = 1,2$ Тл и имели размеры $25 \times 125 \times 25$ мм (верхняя сборка) и $25 \times 75 \times 25$ мм (нижняя сборка).

Величина вертикального зазора между сборками 35 мм, длина магнитного периода $L_{\rm M} = 100$ мм, длина всей сборки в направлении движения 425 мм.

готовлена из 10 изолированных медных лис-

Ламинированная путевая структура из-



Рис. 6. Схема и основные размеры электромагнитной системы установки TEST RIG

тов шириной 200 мм и толщиной 0,5 мм, уложенных друг на друга. В листах выполнены сквозные прорези шириной 0,5 мм с шагом 3 мм в направлении движения и длиной 150 мм в поперечном направлении.

Приводимые в [16] результаты измерений соответствуют случаю, когда путевая структура перемещалась в середине зазора (зазоры между сборками и структурой составляли 15 мм). Технические возможности установки TEST RIG ограничивали скорость перемещения структуры величиной 10 м/с.

Результаты моделирования эксперимента TEST RIG с использованием комплексов программ ТҮРНООN И TORNADO. В предположении близкой к пропорциональной зависимости интегральных электромагнитных сил от длины сборки в направлении движения вычислительные модели содержали сборки из пяти магнитов. Верхняя сборка состояла из пяти постоянных магнитов размером $25 \times 125 \times 25$ мм, размещённых над путевой структурой на расстоянии $h_1 = 15$ мм, нижняя сборка состояла из пяти магнитов размером $25 \times 75 \times 25$ мм, размещённых под путевой структурой на расстоянии $h_2 = 15$ мм.

Каждый постоянный магнит моделировался четырьмя прямоугольными токовыми витками. Сила тока в витке определялась исходя из величины остаточной индукции постоянного магнита, равной 1,2 Тл.

Проводящие элементы пассивной путевой структуры в модели комплекса программ TYPHOON [18, 19] описывались двумя оболочками, совпадающими с верхней и нижней плоскими поверхностями проводящей структуры, оболочки электрически изолированы друг от друга. Двухоболочечная модель путевой структуры в направлении оси *Y* имеет ту же ширину и те же размеры поперечных прорезей, как и в натурном эксперименте.

Удельное сопротивление медной путевой структуры ρ принято равным $1,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. В модели комплекса программ TORNADO [1, 2] расчётная область представляет собой элемент пути, равный длине магнитного периода $L_{\rm M} = 100$ мм сборки в направлении движения. В данном случае анализировалось стационарное решение пространственной задачи о растекании индуцированных вихревых токов в элементах проводящей структуры.

Следует отметить, что для принципиально различных математических формулировок задачи о растекании вихревых токов, реализованных в комплексах программ TYPHOON и TORNADO, принципиально различные вычислительные модели дают весьма близкие с практической точки зрения результаты. Это позволяет проводить взаимную верификацию как разрабатываемых вычислительных моделей, так и полученных результатов.

Данные измерений сил в LLNL были сопоставлены с результатами расчётов, полученными с использованием трёхмерной модели TORNADO, в которой ламинированная путевая структура моделировалась с помощью 10 медных пластин, каждая толщиной 0,45 мм, электрически изолированных одна от другой посредством зазора 0,05 мм. Эта модель наиболее полно описывает рассматриваемый вариант ЭДП в эксперименте TEST RIG.

Величины рассчитанных сил левитации и электродинамического торможения в зависимости от скорости, изменяющейся в диапазоне от 0 до 10 м/с, показаны на рис. 7.



Рис. 7. Зависимость сил левитации (*a*) и электродинамического торможения (*б*) от скорости движения: *1* — эксперимент LLNL [10]; *2* — расчёт LLNL [10]; *3*, *4* — расчёт LLNL [10] при отклонении пути вверх/вниз на ±1 мм; *5* — расчёт по модели TORNADO

Точками на графиках выделены результаты измерений, три пунктирные кривые — результаты расчётов LLNL для трёх положений путевой структуры относительно сборок постоянных магнитов: средняя кривая соответствует центральному (симметричному) расположению путевой структуры, две другие её смещённому положению в вертикальном направлении на величины +1 и -1 мм относительно центрального положения соответственно. Как видно на приведённых рисунках, неточность позиционирования по вертикальной координате ± 1 мм относительно центрального положения может привести к изменению величины подъёмной силы на 20—25%, а тормозящей — на ~30%. Такая неточность позиционирования (± 1 мм) соответствовала условиям проведения эксперимента [16], что, в частности, может объяснять разброс данных измерений. Как видно, результаты численного моделирования с использованием комплексов программ TORNADO совпадают с экспериментальными данными в пределах погрешности измерений с приемлемой точностью.

выводы

Проведена адаптация вычислительной технологии моделирования электрофизического оборудования, разработанного в ОАО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» с целью обеспечения анализа и оптимизации магнитных подвесов левитационного транспорта. Разработаны специальные программные модули, обеспечивающие описание всех необходимых сценариев и режимов движения в пространстве источников магнитного поля.

Предложенная вычислительная технология обеспечивает численное моделирование всех основных типов магнитного подвеса. Может быть учтена любая, требуемая на практике, геометрическая форма катушек, включая сверхпроводниковые катушки, и границы раздела сред. Свойства магнитных материалов — магнитотвёрдых (постоянных магнитов) и магнитомягких (электротехнические и конструкционные стали) — описываются с требуемой на практике точностью.

Выполненные расчёты различных вариантов конструктивного исполнения элементов магнитных систем левитационного транспорта позволили оценить требуемую точность моделирования, характерные величины шагов для пространственной и временной дискретизации задач численного расчёта электромагнитного поля.

Полученные результаты находятся в хорошем качественном соответствии с данными, приводимыми в основополагающих работах отечественных авторов [4—8].

Выполнено сравнение результатов натурного эксперимента TEST RIG, проведённого в Лоуренсовской национальной лаборатории (г. Ливермор, США), и данных численного моделирования этого эксперимента, выполненного во ОАО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова». Показано совпадение этих результатов в диапазоне скоростей, исследуемом в натурном эксперименте. Приемлемая для рассматриваемых практических приложений точность совпадения результатов численного моделирования по разработанной авторами методике с данными натурного эксперимента позволяет сделать заключение об адекватности обсуждаемой вычислительной технологии для анализа электромагнитных процессов в левитационных системах.

Анализ результатов моделирования систем, характеризующихся высокими скоростями движения и, как следствие, высокими частотами изменения магнитного поля, показывает необходимость разработки вычислительных моделей больших размерностей и повышения эффективности расчётов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты № 13-08-13172, № 13-08-13162.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арсланова Д.Н., Белов А.В., Беляков В.А., Белякова Т.Ф., Гапионок Е.И., Крылова Н.А., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Максименкова Н.А., Мазуль И.В., Сычевский С.Е., Розов В.О. Разработка глобальных пространственных вычислительных моделей для анализа переходных электромагнитных процессов и оптимизации конструкции Международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2011, вып. 3, с. 3—26.
- Amoskov V., Arslanova D., Belov A., Belyakov V., Belyakova T., Gapionok E., Krylova N., Kukhtin V., Lamzin E., Maximenkova N., Mazul I., Sytchevsky S. Global computational models for EM transient analysis and design optimization of the ITER machine. — Fusion Eng. Des., 2012, vol. 87, p. 1519—1532.
- 3. Зайцев А.А., Талашкин Г.Н., Соколова Я.В. Транспорт на магнитном подвесе. Монография.— СПб: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2010. 160 с.
- 4. Бахвалов Ю.А., Бочаров В.И., Винокуров В.А., Нагорский В.Д. Транспорт с магнитным подвесом. Под ред. В.И. Бочарова, В.Д. Нагорского. М.: Машиностроение, 1991. 320 с.
- 5. Дзензерский В.А., Омельяненко В.И., Васильев С.В., Матин В.И., Сергеев С.А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией. — Киев: Наукова думка, 2001.
- Ким К.К. Системы электродвижения с использованием магнитного подвеса и сверхпроводимости. Монография. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. 360 с.
- 7. Журавлёв Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчёт, применение. СПб: Политехника, 2003. 206 с.
- 8. Коськин Ю.П., Цейтлин Л.А. Синхронные машины с немагнитным ротором. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 280 с.

- 9. http::/en.wikipedia.org/wiki/maglev («РЖД-Партнер», № 19 (167), октябрь 2009 г.).
- 10. Halbach K. Applications of permanent magnets in accelerators and electron storage rings. J. of Applied Physics, 1985, vol. 57, p. 3605.
- 11. Post R.F., Ryutov D.D. The Inductrack: a Simpler Approach to Magnetic Levitaiton. Lawrence Livermore National Laboratory. UCRL-ID-124115. May 1996.
- 12. Post R.F., Ryutov D.D. The Inductrack Approach to Magnetic Levitaiton. Lawrence Livermore National Laboratory. UCRL-ID-138593. April 2000.
- 13. Post R.F. Inductrack Magnet Configuration. U.S. Patent № 6 1982, 633, 217 B2.
- 14. Post R.F. Laminated Track Design for Inductrack Maglev Systems. U.S. Patent № 6, 2010, 758, 146.
- 15. Hoburg J.F., Post R.F. A Laminated Track for the Inductrack System: Theory and Experiment. Lawrence Livermore National Laboratory. UCRL-CONF-201819, January 2004.
- 16. Hoburg J.F., Post R.F. A Laminated track for the inductrack system: theory and experiment. In: 18th Intern. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Shanghai, China, October 25—29, 2004.
- 17. Амосков В.М., Белов А.В., Беляков В.А., Белякова Т.Ф., Гапионок Е.И., Глухих М.И., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Максименкова Н.А., Мингалев Б.С., Филатов О.Г. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612487: Программный комплекс для расчета магнитных систем, содержащих магнитотвердые, магнитомягкие и токонесущие элементы конструкции сложной геометрической формы (KLONDIKE 1.0). — Реестр программ для ЭВМ, Москва, 12 ноября 2003 г.
- 18. Амосков В.М., Белов А.В., Беляков В.А., Белякова Т.Ф., Гапионок Е.И., Кокотков В.В., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Сычевский С.Е., Филатов О.Г. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612496: Программный комплекс для численного моделирования квазистационарных вихревых токов в тонких проводящих пространственных оболочечных конструкциях сложной геометрической формы (ТҮРНООN 2.0). Реестр программ для ЭВМ, Москва, 12 ноября 2003 г.
- Belov A., Doinikov N., Duke A., Kokotkov V., Korolkov M., Kotov V., Kukhtin V., Lamzin E., Sytchevsky S. Transient electromagnetic analysis in tokamaks using TYPHOON code. Fusion Engineering and Design, 1996, vol. 31, p. 167—180.
- 20. Белов А.В., Белякова Т.Ф., Кухтин В.П., Ламзин Е.А., Филатов О.Г. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612492: Программный комплекс для трехмерного расчета стационарного магнитного поля, анализа и синтеза магнитных систем электрофизических установок (КОМРОТ/М 1.0). Реестр программ для ЭВМ, Москва, 12 ноября 2003 г.
- 21. Belov A.V., Belyakova T.F., Gornikel I.V., Kuchinsky V.G., Kukhtin V.P., Lamzin E.A., Semchenkov A.G., Shatil N.A. 3D field simulation of complex systems with permanent magnets and excitation coils. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, vol. 18, № 2, p. 1609—1612.
- 22. Глухих В.А., Беляков В.А., Минеев А.Б. Физико-технические основы термоядерного синтеза. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 348 с.
- 23. Кошляков Н.С., Глинер Э.В., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970.
- 24. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: ГИТТЛ, 1954. 620 с.
- 25. Шатиль Н.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009611707: Программа для численного моделирования нестационарных термогидравлических процессов в сверхпроводниковых магнитных системах (VENECIA 1.0). — Реестр программ для ЭВМ, Москва, 31 марта 2009 г.
- 26. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. М.: Энергоатомиздат, 1992. 416 с.
- 27. Thome R.J., Tarrh J.M. MHD and fusion magnets. Field and force design concepts. J. Wiley and Sons Inc., 1982.

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», 196641 Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3, Россия



Виктор Михайлович Амосков, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.; ОАО «НИИЭФА» sytch@sintez.niiefa.spb .su



Арсланова, математик 2-й категории; ОАО «НИИ-ЭФА» sytch@sintez.niiefa. spb.su

Дарья Николаевна



Александр Михайлович Базаров, математик 2-й категории; ОАО «НИИЭФА» sytch@sintez.niiefa.spb. su



Геннадий Алексеевич Баранов, д. техн. н., профессор, научный руководитель по направлению деятельности отделения «ЛТиТ», ветеран атомной энергетики и промышленности; ОАО «НИИЭФА» gennady@niiefa.spb.su



Александр Вячеславович Белов, начальник группы; ОАО «НИИЭФА» belov@sintez.niiefa. spb.su



Валерий Аркадьевич Беляков, заместитель директора, директор отделения НТЦ «Синтез», профессор, д.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности; ОАО «НИИЭФА», belyakov@sintez.niiefa.s pb.su



Татьяна Федоровна Белякова, ведущий программист, ветеран атомной энергетики и промышленности; ОАО «НИИЭФА» sytch@sintez.niiefa.sp b.su



Вячеслав Николаевич Васильев, заместитель начальника отдела, ветеран атомной энергетики и промышленности; ОАО «НИИЭФА» sytch@sintez.niiefa. spb.su



om

su

Марина Викторовна Капаркова, ведущий исследователь, ветеран атомной энергетики и промышленности; ОАО «НИИЭФА» sytch@sintez.niiefa. spb.su



Владимир Петрович Кухтин, с.н.с., к.ф.-м.н.; ОАО «НИИЭФА» sytch@sintez.niiefa.spb.



Анатолий Александрович Зайцев, д.э.н., профессор, руководитель научно-образовательного центра инновационного развития железнодоперевозок рожных ФГБОУ «ПГУПС» nozpgups@gmail.com



Алексей Николаевич Лабусов, к.ф.-м.н., отдела; начальник ОАО «НИИЭФА» Labusov@sintez.niiefa. spb.su



Евгений Анатольевич Ламзин, начальник лаборатории, д.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промыш-**OAO** sytch@sintez.niiefa.



Михаил Сергеевич Ларионов, начальник исследовательского стенда, ветеран атомной энергетики и промышпенности. 0A0 «НИИЭФА» sytch@sintez.niiefa.spb.



Нина Александровна Максименкова, ведущий программист, ветеран атомной энергетики и промышленности; ОАО «НИИЭФА» sytch@sintez.niiefa.spb **S**11



ленности; «НИИЭФА» spb.su Валерий Михайлович Михайлов, ведущий конструктор; ОАО «НИИЭФА» sytch@sintez.niiefa. spb.su

S11

Андрей Николаевич Неженцев, ведущий конструктор; OAO «НИИЭФА» sytch@sintez.niiefa.spb. su



.su

Игорь Юрьевич Родин, к. техн. н., на-



Михаил Владимирович Хохлов, начальлаборатории; ник OAO «НИИЭФА» hohlov@sintez.niiefa.sp b.su



Сычевский, д.ф-м.н., начальник отдела, ветеран атомной энергетики и промышленности; ОАО «НИИЭФА» sytch@sintez.niiefa. spb.su

Сергей Евгеньевич

Николай Александрович Шатиль, в.н.с., к. техн. н., атомной ветеран энергетики и промышленности; ОАО «НИИЭФА» sytch@sintez.niiefa.s pb.su



Алексей Анатольевич Фирсов, начальник лаборатории; 0A0 «НИИЭФА» sytch@sintez.niiefa.spb. su

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2014 г. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2014, т. 37, вып. 4, с. 84—95.