

## МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩИЙ ПОДВЕС РОТОРОВ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫХ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С Н-РОТОРОМ ДАРЬЕ НА БАЗЕ МАССИВА ХАЛЬБАХА

Рассмотрена возможность применения систем магнитного подвешивания на базе магнитных массивов Хальбаха в конструкциях опорно-поворотных узлов роторов вертикально-осевых ветроэлектрических установок с Н-ротором Дарье. Предложены базовые варианты обобщенных конструктивных схем подвесов, отличающиеся способом создания магнитного взаимодействия между элементами подвеса. Получены соотношения для оценки подъемного усилия в подвесах магнитоэлектростатического и электродинамического типов.

Розглянуто можливість застосування систем магнітного підвішування на базі магнітних масивів Хальбаха в конструкціях опорно-поворотних вузлів роторів вертикально-осьових вітроелектричних установок з Н-ротором Дар'є. Запропоновано базові варіанти узагальнених конструктивних схем підвісів, що відрізняються способом створення магнітної взаємодії між елементами підвісу. Отримані співвідношення для оцінки підйомного зусилля в підвісах магнітоелектростатичного та електродинамічного типів.

A possibility of applying the systems of the magnetic levitation suspension on a basis of Halbach magnetic arrays in the designs of support-rotary joints of rotors for vertically-axial wind-driven electric plants with the Darier H-rotor is considered. Basic versions of generalized suspension structural configurations with a different method of creation of a magnetic interaction between the suspension elements are proposed. Relations for an estimation of the elevating effort in magnetostatic and electrodynamic suspensions are derived.

Вертикально-осевые ветроэлектрические установки с Н-ротором Дарье относятся к интенсивно развивающемуся направлению ветроэнергетического машиностроения. С одной стороны, это обусловлено рядом специфических, заложенных в их конструкцию принципиальных особенностей, которые выгодно отличают вертикально-осевые ветроустановки от традиционных горизонтально-пропеллерных, повышая их потребительские свойства. В силу нечувствительности ротора к изменению направления ветра и его тихоходности упрощается конструкция и повышается надежность ветроустановки за счет исключения механизмов и систем ориентации на ветер. Это улучшает условия эксплуатации и уменьшает воздействие на окружающую среду за счет снижения уровня механических и аэродинамических шумов, исключения столкновения с птицами, воздействия на людей. Генератор, мультипликатор, элементы трансмиссии и электрооборудование размещаются не в массивной поворотной гондоле, а стационарно размещены на опорной башне, что снижает статические и динамические нагрузки на нее, делает менее жесткими ограничения на габаритные размеры и вес оборудования, упрощает передачу электроэнергии от генератора, уменьшает объем, время и стоимость технического обслуживания и ремонта. Вертикально-осевые установки с ротором Дарье достаточно эффективно работают без электромеханических и гидравлических систем поворота лопастей, так как скорость вращения ротора может регулироваться нагрузкой генератора без поворота последних, что значительно упрощает конструкцию ротора. При этом лопасти ротора из-за одинаковой скорости вращения всех сечений имеют постоянный по длине профиль, что повышает технологичность их изготовления. По рациональности использования ометаемой поверхности ротора, энергии, снимаемой с единицы длины лопасти, фактическому значению коэффициента использования энергии ветра, радиусу отчуждаемой площади, надежности при эксплуатации вертикально-осевые ветроустановки не уступают горизонтально-пропеллерным конструкциям.

© С.В. Тарасов, М.Г. Снегирев, И.А. Дорош, 2010

С другой стороны, растущей популярности вертикально-осевых установок способствуют появление в последние годы более совершенных численных методов расчета аэродинамики роторов Дарье, проведенные экспериментальные исследования в аэродинамических трубах роторов различной конфигурации, накопленный опыт эксплуатации таких установок малого (до 50 кВт) (рис.1а), среднего (до 500 кВт) (рис.1б) и мегаваттного (более 500 кВт) (рис.1в) классов. Это позволяет создавать надежные, технологичные, эффективные в плане производства электроэнергии конструкции, способные на равных конкурировать с более традиционными горизонтально-осевыми.

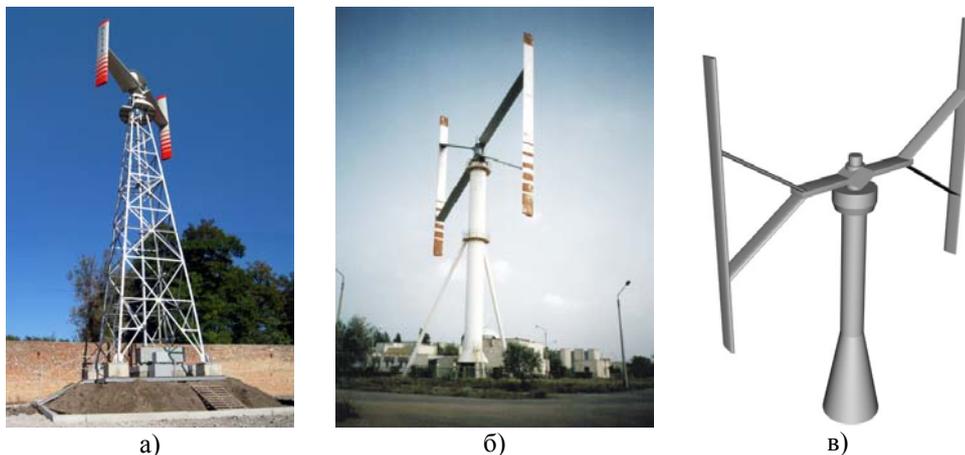


Рис. 1

Одним из эффективных способов повышения производительности и долговечности вертикально-осевых ветроэлектрических установок с Н-ротором Дарье является снижение моментов сопротивления в опорно-поворотных узлах роторов и упрощение их кинематических схем. В установках малого класса это позволяет несколько повысить снимаемую мощность. Для вертикально-осевых ветроэлектрических установок средней и мегаваттной мощности это особенно актуально, так как с ростом мощности растут масса и геометрические размеры ротора, следовательно, сложность кинематических схем и громоздкость опорно-поворотных узлов.

Вращательное движение ротора в опорно-поворотных узлах с механическими подшипниками происходит с серьезными фрикционными потерями. В связи с этим актуальной становится разработка опорно-поворотных узлов, базирующихся на альтернативных способах подвеса ротора, например с использованием магнитной левитации. Как показывает первый опыт эксплуатации экспериментальных ветроустановок с системой магнитного подвеса (СМП) ротора, снижаются эксплуатационные расходы, повышается выработка электроэнергии за счет снижения стартовой скорости ротора и текущих фрикционных потерь, что, в конечном итоге, повышает эффективность работы установки.

Опорные устройства, использующие в своей работе принцип магнитной левитации, применяются в настоящее время в проблемных участках механизмов, в которых имеют место постоянные или периодические механические контакты поверхностей. Эти контактные взаимодействия приводят к износу

деталей и требуют обеспечения постоянного смазывания трущихся частей, что приводит к снижению эффективности работы всего механизма.

Известные системы магнитного подвеса разрабатывались в первую очередь для применения в исполнительных органах управления ориентации космических аппаратов. Успешное применение в космической отрасли создало предпосылки для применения СМП в других отраслях промышленности. В конце 80-х годов прошлого столетия были разработаны первые образцы магнитных подшипников (МП), использующие принцип магнитной левитации. В настоящее время МП используются в конструкциях насосов, компрессоров, электромагнитных преобразователей и других устройствах для уменьшения фрикционных потерь. Принцип магнитной левитации используется и в высокоскоростном наземном транспорте. В данном случае применение СМП обусловлено большими скоростями, при которых использование колес для контакта с колеей невозможно по конструктивным соображениям.

Магнитное поле в СМП может быть создано с помощью постоянных магнитов, а также высокотемпературных и сверхпроводящих электромагнитов или их комбинации [1]. По характеру возникновения действующих усилий подвесы делят на магнитостатические и электродинамические (магнитодинамические). В первых усилия образуются от взаимодействия статических пар постоянный магнит – постоянный магнит, электромагнит – электромагнит или их комбинации, а также от взаимодействия между ферромагнетиком и источником магнитного поля. Во вторых используется эффект выталкивания неферромагнитного проводника из переменного магнитного поля.

Для создания сильных магнитных полей, как правило, используются обычные или сверхпроводящие электромагниты. Это обусловлено тем, что постоянные магниты не могут создать достаточно сильные магнитные поля, по сравнению с электромагнитами указанного типа. Однако использование в СМП обычных или сверхпроводящих электромагнитов требует материалов с высокой электрической проводимостью и низкотемпературными свойствами, постоянного подвода энергии для поддержания магнитных свойств, а также, в первую очередь для сверхпроводящих электромагнитов, дополнительной системы управления подвесом. Постоянные магниты в настоящее время по своим магнитным характеристикам все еще уступают электромагнитам и сверхпроводящим магнитам, но при этом выгодно отличаются способностью поддерживать магнитное поле продолжительный период, что обусловлено высокой коэрцитивной силой.

Повышение интереса к СМП во многом обусловлено улучшением магнитных свойств и снижением цен на современные магнитные материалы, которые используются в качестве источников постоянных магнитных полей. Эти материалы базируются на переходных (Fe, Co) и редкоземельных (Sm, Pr, Nd) элементах. Особенно востребованными являются Nd-Fe-B магниты. Согласно данным, приведенным в [2], за последнее время характеристики постоянных магнитов Nd-Fe-B существенно улучшились. На рис. 2 приведены диаграммы увеличения магнитных свойств некоторых материалов и их применение в разные периоды двадцатого столетия [1]. Как видно из рисунка, к концу прошлого столетия появились новые материалы, обладающие высоким значением запасенной удельной энергии. Это магниты Nd-Fe-B и Sm-Co. Магниты Nd-Fe-B имеют преимущество по сравнению с магнитами Sm-Co. Они не только мощнее, но и более доступны и менее дороги.

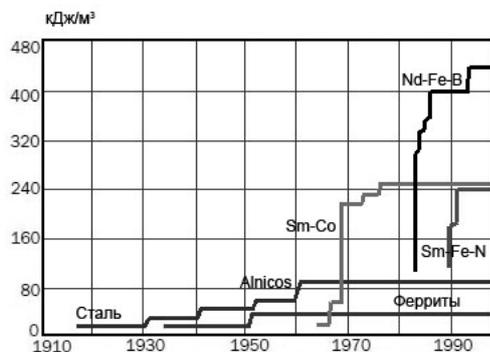


Рис. 2

В конце XX века было сделано открытие, позволяющее сконцентрировать магнитное поле от нескольких постоянных магнитов без затраты дополнительной энергии, что позволяет увеличить магнитную индукцию системы. Впервые возможность сконцентрировать магнитное поле с одной стороны магнита обосновал J.C. Mallinson [3]. Он доказал, что, при определенных условиях, существует возможность сконцентрировать магнитный поток на одной стороне магнита и снизить его на другой стороне. Первоначально предполагалось, что такая возможность позволит уменьшить влияние магнитного поля на чувствительные материалы, например улучшить характеристики записи на магнитную ленту.

В дальнейшем, при исследовании возможности применения постоянных магнитов в ускорителях и накопительных кольцах, Клаус Хальбах [4, 5] предложил особую схему расположения магнитов, согласно которой вектор индукции каждого последующего магнита повернут на определенный угол по отношению к предыдущему. В этом случае поле с одной стороны полученного массива становится больше, чем с другой. Результатом исследований Хальбаха явились массивы постоянных магнитов, известные теперь как магнитная решетка Хальбаха (рис. 3, 4) и цилиндр Хальбаха, в центре которого концентрируется магнитное поле большее, чем поля отдельных элементов массива.

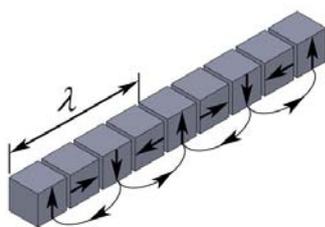


Рис. 3

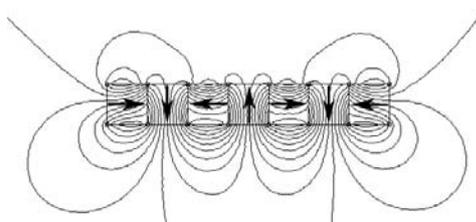


Рис. 4

При таком способе формирования магнитного массива обеспечивается:

- увеличение индукции магнитного поля с одной стороны решетки до величин больших, чем магнитная индукция отдельного магнита, что повышает эффективность системы подвеса;
- практически полная компенсация магнитного поля с другой стороны решетки;
- быстрое экспоненциальное падение величины магнитной индукции при удалении от решетки, что приводит к большей жесткости магнитного подвеса.

Позже специалисты из Ливерморской Национальной лаборатории им. Лоренса (США) предложили использовать магнитную решетку Хальбаха в качестве источника сильных магнитных полей в СМП высокоскоростного наземного транспорта [6]. В созданном ими экспериментальном образце электродинамического подвеса постоянные магниты закреплены на тележке. Расположение магнитов, как в магнитной решетке Хальбаха, позволяет сконцентрировать магнитное поле между тележкой и полотном. Вдоль пути следования тележки выложены короткозамкнутые катушки. При скорости 1,7 м/с и массе тележки 22 кг подъемная сила уравнивается весом тележки, и в дальнейшем при повышении скорости происходит ее устойчивая левитация.

Теоретическое обоснование возможности концентрации магнитного поля в массивах Хальбаха позволило создать на их основе конкретные технические решения систем магнитной левитации для наземного транспорта, ускорителей и космических аппаратов [3 – 6].

В настоящей работе рассмотрена возможность применения СМП на базе массивов Хальбаха в конструкциях вертикально-осевых ветроэлектрических установок с Н-ротором Дарье, предложены базовые варианты конструктивных схем, отличающиеся способом создания магнитного взаимодействия между элементами подвеса, и получены соотношения для оценки подъемных усилий.

Учет специфики конструктивных схем исполнения опорно-поворотных узлов вертикально-осевых ветроустановок с Н-ротором Дарье позволяет предложить в качестве базовых две формализованные конструктивные схемы магнитостатического (рис. 5) и электродинамического (рис. 6) подвесов, в качестве источника магнитных полей в которых используются массивы Хальбаха. Эти схемы обладают сравнительной технической простотой и высокой надежностью, предоставляют возможность создания на их основе конструктивного многообразия подвесов и, что не менее важно, их интеграции с традиционными и линейными генераторами.



Рис. 5



Рис. 6

Магнитостатический подвес основан на создании сил отталкивания или притяжения между массивами магнитов. Усилить магнитную индукцию в зазоре можно, формируя из постоянных магнитов решетку Хальбаха. Недостатком статического магнитного подвеса на постоянных магнитах, согласно теореме Ирншоу, является неустойчивость системы подвеса, которую можно устранить, используя горизонтальные фиксаторы.

Для оценки усилий взаимодействия массивов Хальбаха в магнитостатическом подвесе воспользуемся методикой, базирующейся на дипольном представлении постоянных магнитов, составляющих массивы [7]. В соответствии с методикой, каждый постоянный магнит массива рассматривается как совокупность магнитных диполей (рис. 7). Вектор силы взаимодействия двух элементарных магнитных диполей с векторными дипольными моментами  $\vec{m}_1$  и  $\vec{m}_2$  задается выражением

$$\bar{F} = \frac{3}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{1}{R^5} \left( \bar{m}_1(\bar{m}_2 \cdot \bar{R}) + \bar{m}_2(\bar{m}_1 \cdot \bar{R}) + \bar{R} \left( (\bar{m}_1 \cdot \bar{m}_2) - 5 \frac{(\bar{m}_1 \cdot \bar{R})(\bar{m}_2 \cdot \bar{R})}{R^2} \right) \right),$$

где  $\bar{R}$  – радиус-вектор, соединяющий центры диполей;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $c$  – скорость света в пустоте.

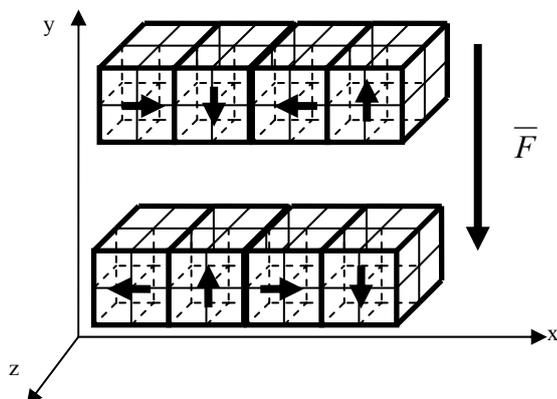


Рис. 7

Сила, с которой взаимодействуют массивы Хальбаха в магнитостатическом подвесе (рис.7), определяется как суперпозиция взаимодействий элементарных диполей, принадлежащих разным магнитным системам.

При движении вдоль магнитной решетки Хальбаха, например слева направо, вектор магнитной индукции может дискретно поворачиваться по или против часовой стрелки. Установлено, что относительное направление вращения векторов магнитной индукции во взаимодействующих массивах оказывает существенное влияние на силу их взаимодействия. На рисунках 8, 9 приведены результаты моделирования магнитных полей взаимодействующих решеток Хальбаха, соответственно при одинаковых и противоположных направлениях вращения векторов магнитной индукции. Графики изменения силы взаимодействия двух массивов при одинаковых и противоположных направлениях вращения векторов магнитной индукции приведены соответственно на рисунках 10, 11. При реализации второго способа формирования массивов подвеса наблюдается большая подъемная сила, так как в этом случае массивы обращены друг к другу сторонами с большими значениями магнитной индукции. Приведенные результаты получены для решеток, сформированных из семи постоянных магнитов. При росте числа магнитов, сила взаимодействия между массивами растет линейно.

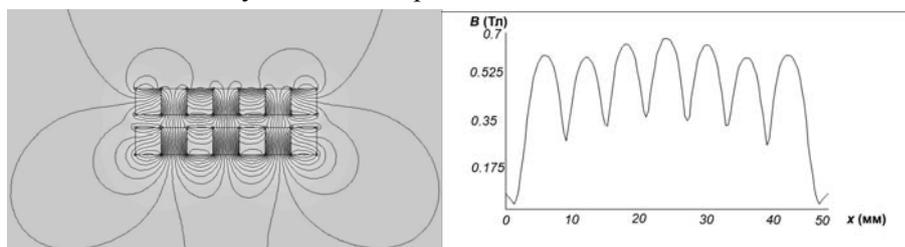


Рис. 8

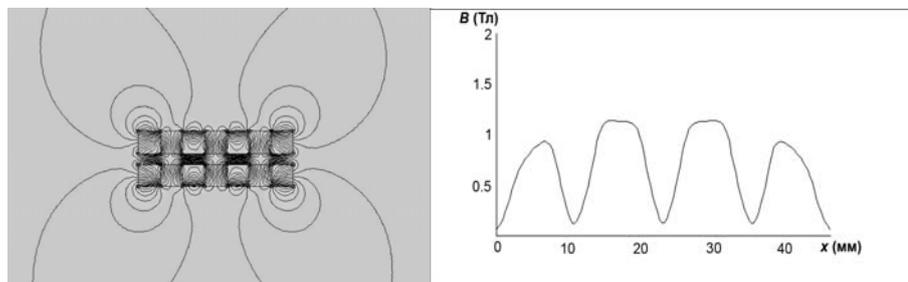


Рис. 9

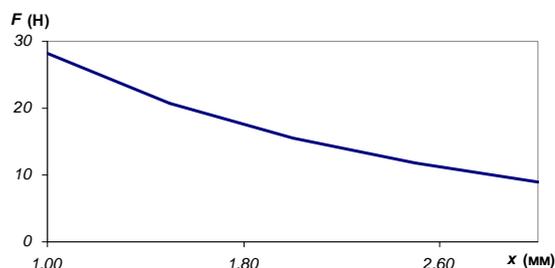


Рис. 10

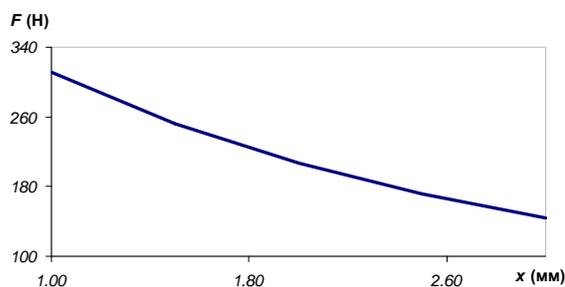


Рис. 11

Устойчивым подвесом с постоянными магнитами является электродинамический подвес. Принцип его работы основан на возникновении в проводящих материалах вихревых токов. Вихревые токи могут быть индуцированы переменным магнитным полем или движением системы проводников в постоянном магнитном поле. Как следствие, в электродинамическом подвесе подъемная сила возникает только при перемещении магнитного поля вблизи проводящей поверхности и отсутствует в состоянии покоя. В ряде случаев его технической реализации это является недостатком подвесов такого типа, который компенсируется введением опор качения для низких скоростей.

Лоренцова сила, действующая на движущиеся заряды в магнитном поле, а также электрическое поле, возникающее при изменении магнитного поля, будут генерировать в проводящей поверхности некоторое распределение токов.

Для вычисления токов, возникающих в проводящей пластине, необходимо определить массив распределения компоненты магнитной индукции, перпендикулярной к поверхности. На рисунке 12 представлен вид нормальной составляющей магнитного поля на расстоянии 2 мм от магнитной решетки Хальбаха, сформированной из семи кубических постоянных магнитов Nd-Fe-B с размерами  $6 \times 6 \times 6$  мм. Расчеты проведены для значения магнитной индукции материала 1,21 Тл и коэрцитивной силы  $H_c = 9,95 \cdot 10^5$  А/м. Расчет маг-

нитного поля проводился методом дискретизации магнитов на отдельные малые элементы.

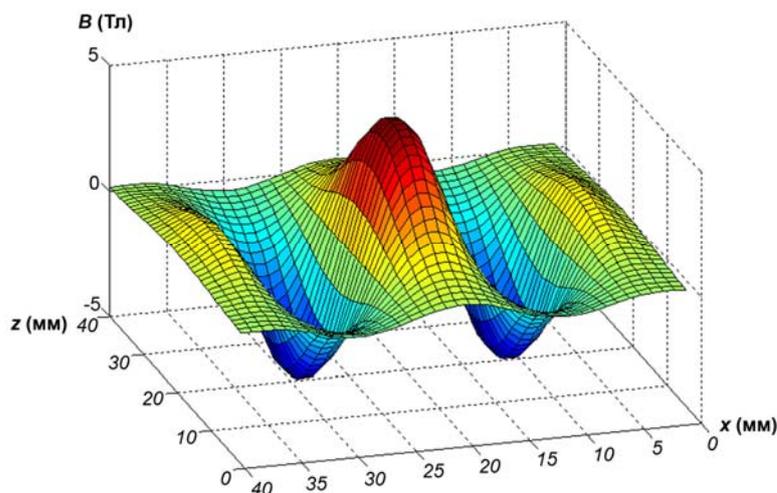


Рис. 12

Для оценки подъемной силы в начале разгона ротора принималось, что скорость изменения магнитного поля, токов и зарядов невелика. При этом могут не учитываться дополнительные эффекты, возникающие в результате взаимодействия токов в разных частях проводящей поверхности. Такие эффекты могут быть учтены при дальнейших исследованиях как уточнение рассматриваемой задачи.

Для получения более высоких значений подъемной силы необходимо, чтобы проводимость материала была достаточной для того, чтобы получить сильные токи. Наиболее предпочтительны материалы с низким удельным сопротивлением. Например, алюминий (Al) –  $\rho=2,82 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, медь (Cu) –  $\rho=1,72 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. При расчетах для проводящей поверхности использовались значения удельного сопротивления алюминия.

Поле индуцированных токов разгоняющегося ротора может быть определено из уравнения

$$-\nabla^2 \vec{J} = -\sigma \left( \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{B} \right),$$

где  $\vec{B}$  – вектор магнитной индукции;  $\vec{J}$  – векторный потенциал тока;  $\vec{v}$  – скорость перемещения поверхности;  $\sigma = \frac{h}{\rho}$  – значение удельного поверхностного сопротивления,  $h$  – толщина листа.

Плотность тока, возникшего на проводящей поверхности, имеет вид

$$\vec{j} = \vec{\nabla} \times \vec{J}.$$

Данная система уравнений в частных производных не может быть решена аналитически для произвольной конфигурации проводящей поверхности и распределения внешнего магнитного поля. Такая задача может быть решена численными методами.

Переходя к системе конечных разностей, описанное выше уравнение принимает вид

$$\begin{aligned} & \left[ \tilde{J}_{(i+1,j)} + \tilde{J}_{(i,j+1)} + \tilde{J}_{(i-1,j)} + \tilde{J}_{(i,j-1)} - 4\tilde{J}_{(i,j)} \right] = \\ & \left( \frac{v_x}{|v|} \left[ \frac{\tilde{B}_z(i+1,j) - \tilde{B}_z(i-1,j)}{2k/l} \right] + \frac{v_y}{|v|} \left[ \frac{\tilde{B}_z(i,j+1) - \tilde{B}_z(i,j-1)}{2k/l} \right] \right) \\ & \tilde{j}_x = \frac{\tilde{J}_{(i,j+1)} - \tilde{J}_{(i,j-1)}}{2}, \quad \tilde{j}_y = \frac{\tilde{J}_{(i+1,j)} - \tilde{J}_{(i-1,j)}}{2}, \\ & J = -\sigma |v| \frac{k^2}{l} B_0 \tilde{J}, \quad B_z = B_0 \tilde{B}_z, \quad j_{x,y}^* = -\sigma |v| \frac{k}{l} B_0 \tilde{j}_{x,y}, \end{aligned}$$

где  $j^*$  – приведенное значение тока;  $B_0$  – некоторая характерная величина переменного магнитного поля;  $|v|$  – модуль скорости перемещения поверхности;  $l$  – некоторый характерный размер поверхности;  $k$  – шаг решетки.

Поверхностная плотность тока имеет вид

$$j = \sigma \cdot v \cdot j^*.$$

Подъемная сила, действующая на элемент решетки, может быть определена следующим образом

$$dF_z = dS(j_x B_y - j_y B_x),$$

где  $dS = dl \cdot dw$  – площадь элемента решетки с длиной  $dl$  и шириной  $dw$ ;  $B_y$ ,  $B_x$  – тангенциальные компоненты вектора магнитной индукции;  $j_y$ ,  $j_x$  – плотность индуцированных токов в плоскости проводящей поверхности.

На рисунках 13, 14 представлены компоненты плотности тока, соответственно  $j_y$  и  $j_x$ , в прямоугольном проводящем листе, индуцированные движущимся магнитным полем.

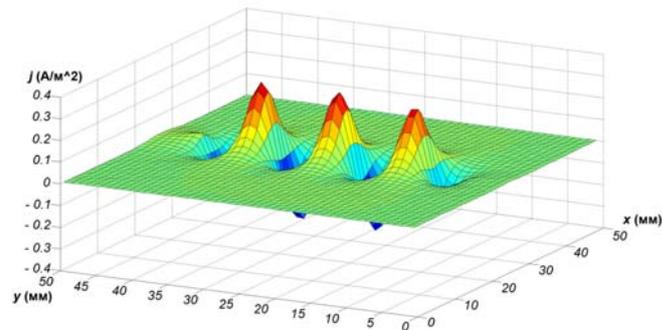


Рис. 13

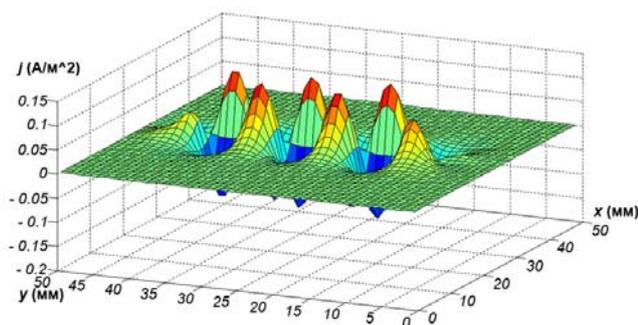


Рис. 14

График изменения подъемной силы при малых скоростях приведен на рисунке 15. Приведенные результаты получены для решетки, состоящей из семи кубических постоянных магнитов Nd-Fe-B с магнитной индукцией материала 1,21 Тл, на расстоянии 2 мм от поверхности магнитной системы.

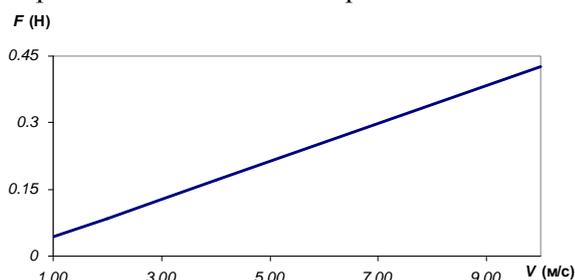


Рис. 15

Результаты проведенных исследований позволяют рассматривать магнитолевитирующий подвес как реальную альтернативу традиционным механическим. Расчеты подъемных усилий в магнитоэлектродинамическом и электродинамическом подвесах с принятыми обобщенными конструктивными схемами на базе магнитных массивов Хальбаха показывают, что подвесы позволяют создавать стабильные и необходимые по величине усилия, достаточные для обеспечения магнитной левитации роторов вертикально-осевых ветроэлектрических установок с Н-ротором Дарье. При этом магнитные массивы Хальбаха могут быть реализованы на основе доступных и сравнительно недорогих постоянных Nd-Fe-B магнитов.

1. Транспорт с магнитным подвесом / Под ред. В. И. Бочарова, В. Д. Назорского. – М. : Машиностроение, 1991. – 320 с.
2. Coey Michael. Magnets, Markets, and Magic Cylinders / Michael Coey, Denis Weaire // The Industrial Physics. – 1998. – Vol. 4, N 3. – P. 34 – 36.
3. Mallinson John C. One Sided Fluxes – A Magnetic Curiosity / John C. Mallinson // IEEE Transactions on Magnetics. – 1973. – Vol. 9, N 4. – P. 678 – 682.
4. Halbach Klaus. Design of Permanent Multipole Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Materials / Klaus Halbach // Nuclear Instruments and Methods. – 1980. – Vol. 169, N 1. – P. 1 – 10.
5. Halbach Klaus. Application of Permanent Magnets in Accelerators and Electron Storage Rings / Klaus Halbach // Journal of Applied Physics. – 1985. – Vol. 57, N 1. – P. 3605 – 3608.
6. Post Richard F. Inductrack Demonstration Model / Richard F. Post. – Lawrence Livermore National Laboratory, California, 1998. – 18 с.
7. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Учебное пособие. Том II. Теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1988. – 512 с.

Институт транспортных систем и технологий  
НАН Украины,  
Днепропетровск

Получено 16.11.2009,  
в окончательном варианте 04.02.2010