

УДК 537.1; 621.311

Т.А. ПАРХОМЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ ДЛЯ РАЗГРУЗКИ ОПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ ВЕРТИКАЛЬНО ОСЕВЫХ ВЕТРОУСТАНОВОК

*Задачей данного научного исследования является изучение вариаций магнитных подвесов, получивших широкое применение за последние несколько десятилетий. Их применение в технике позволило значительно уменьшить силы трения в соприкасающихся вращающихся деталях (маховиках, головках турбин, пропеллерах), разгрузить опорные подшипники, тем самым, повысить КПД. Изучено математическое выражение энергии магнитного поля и его возможное применение в современных ветрогенераторах с вертикальной осью вращения на основе постоянных магнитов из сплава неодима, железа и бора (NdFeB).*

**Ключевые слова:** вертикально осевой ветрогенератор, левитация, постоянные магниты, электромагнит, магнитная индукция.

### Постановка проблемы

Условием существования ракетно-космического комплекса (РКК) является открытая местность, отсутствие каких-либо воздушных преград, а, следовательно, имеем полноценную базу для установки ветроэнергетической установки (ВЭУ), которая бы получала прямые, ничем не затененные воздушные потоки. Поставляемая мощность данной ВЭУ может использоваться на собственные нужды РКК: освещение технических зданий, хранилищ ракет-носителей и космических аппаратов, других сооружений.

Широкое распространения в наше время получили ВЭУ пропеллерного типа, несмотря на свои недостатки: необходимость ориентации на ветер, сложность при монтаже и техобслуживании, потребность в больших площадях с учетом радиуса ометаемой поверхности и т.д. Значительно проще конструкцию имеют ВЭУ с вертикальной осью вращения, во многом превосходящие своих горизонтальных сородичей. Во-первых, полностью независимы от направления ветра, а, следовательно, не требуют установки механизмов и систем установки на ветер. Во-вторых, более монтажепригодные, так как генератор и трансмиссия размещены на одном валу и нет необходимости в угловой передаче крутящего момента. В-третьих, несмотря на возможность увеличения материалоемкости вертикально-осевой установки, простота ее конструкции все же существенно сказывается на стоимости.

Однако одним из недостатков вертикально-осевых ВЭУ можно считать увеличение нагрузки на опорные подшипники с ростом габаритных и массовых размеров, что неизбежно ведет к росту трения и «растрате» ветровой энергии, а не редко и к выходу

оборудования из строя. Кроме того, данные установки имеют лопасти, профиль которых схож с крылом самолета, которому, чтобы «опереться» на подъемную силу крыла необходимо сначала разбежаться. Достаточно большой момент инерции вертикально осевых ВЭУ часто ведет к принудительному запуску, что также является большим недостатком.

### Решение проблемы

Решением данных проблем может быть применение явления магнитной левитации. Использование так называемой магнитной подушки или магнитного подвеса может исключить применение опорных подшипников. Магнитные подвесы известны достаточно давно и предназначены для разгрузки фиксирующих опорных подшипников и опор при подвесе тяжелых, а иногда и быстро вращающихся деталей – маховиков, роторов, турбин.

В зависимости от сферы использования и внешних факторов, чаще всего используются следующие типы подвесов: электромагнитный подвес (ЭМП), электродвижущий подвес (ЭДП), магнитный подвес на постоянных магнитах, комбинированная схема. Общим для функционирования всех систем магнитных подвесов является использование пондеромоторных (электромагнитных) сил взаимодействия магнитных полей. Например, в системах с ЭМП (рис. 1) использованы электромагниты 1 (ЭМ) с регулируемой магнитодвижущей силой взаимодействуют с непрерывным феррорельсом 2 таким образом, что ЭМ все время притягивается к феррорельсу силой  $F_{пр}$ , называемой подъемной, обратно пропорциональной квадрату воздушного зазора  $\delta$  между ними [1]. При вращении некоторого подвеса также становится заметной сила отталкивания  $F_{от}$  ЭМ от

феррорельса, которая возникает за счет вихревых токов. Совместное действие этих сил обуславливает результирующую силу  $F_p$ , которая проявляется как

подъемная  $F_n$  и тормозная  $F_T$  силы так, что с ростом скорости вращения  $\omega$  сила  $F_T$  увеличивается, а сила  $F_n$  уменьшается до критического уровня.

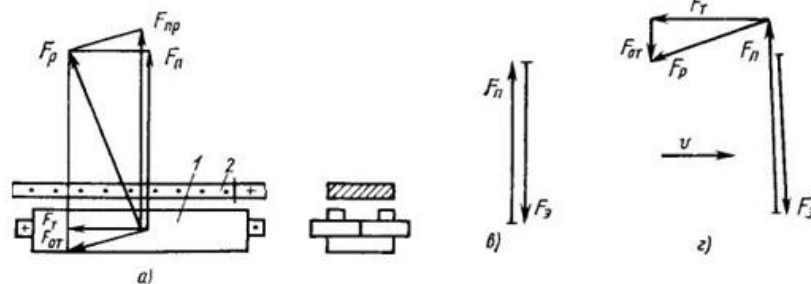


Рис. 1. Векторные диаграммы взаимодействия сил ЭМП

Рассматривая же систему с ЭДП необходимо отметить, что эти системы разделяются на подсистемы с дискретной и непрерывной структурой пути и подсистемы с нормальным и нулевым магнитным потоком. Принцип действия этих систем основывается на возникновении силы отталкивания между источником магнитного поля 1 и проводником 2 при взаимном перемещении (рис. 2). ЭМ 1, что имеет высокую проводимость, устанавливается и переме-

щается над реактивной шиной 2 с высотой левитации до 25 мм. В результате взаимодействия индуцируются вихревые токи на поверхности шины, под действием которых возникает сила отталкивания  $F_{от}$  ЭМ от одноименного полюса шины и сила его притяжения  $F_{пр}$  к соответствующему разноименному полюсу [1]. Как видим с рисунка, геометрическая сумма этих сил дает результирующую силу  $F_p$ , а их разность – подъемную  $F_n$  и тормозную  $F_T$ .

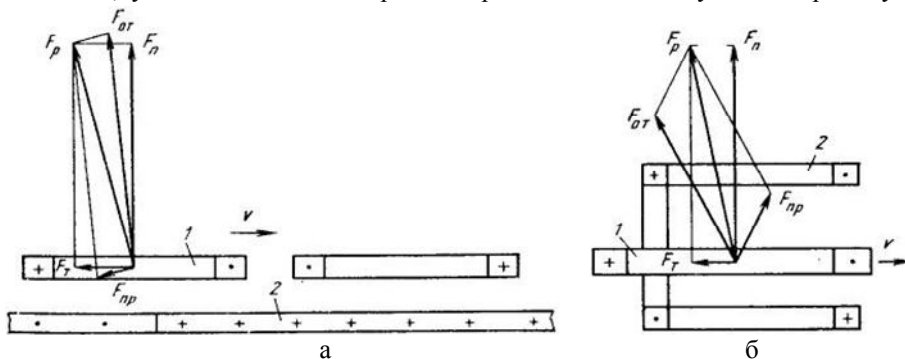


Рис. 2. Векторные диаграммы взаимодействия сил ЭДП: а – с нормальным и б – с нулевым потоком

В общем, качественное сравнение любого из вариантов магнитного подвеса оценивается в первую очередь по их левитационному качеству

$$\eta_L = F_n(v)/F_T(v). \quad (1)$$

В общем случае, электромагнитная сила зависит от геометрии сердечника ЭМ и величины магнитной индукции в зазоре, значение которой ограничивается насыщением ферромагнитного материала сердечника. Силу можем определить

$$F_n = B_\delta^2 \cdot S / (2 \cdot \mu_0), \quad (2)$$

где  $B_\delta$  – магнитная индукция в рабочем зазоре;  $S$  – площадь полюсов;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Выражения для более точного определения величины энергии магнитного поля  $F$  в зависимости от геометрической формы магнитного тела подробно рассмотрены в работе [2]. Вся сложность в выполнении магнитного подвеса одноосных магнитно

отталкивающихся элементов заключается в боковой неустойчивости [3]. Таким образом, при наличии силы тяжести в магнитной системе достигнуть устойчивого равновесия возможно при помощи явления магнитной потенциальной ямы. Рассмотрим задачу об устойчивости равновесия свободного токового кольца, нагруженного силой тяжести  $G$ , в магнитном поле неподвижного токового кольца.

Тогда, согласно [1], исходя из уравнений движения свободного тела, описываемого цилиндрическими координатами центра масс и углами Эйлера, определяющими его угловую ориентацию, имеем: если

$$\frac{\partial U}{\partial \zeta} \pm G = 0 \quad (3)$$

в некоторой точке  $q=q_0$ :

$$\rho = 0, \zeta = \zeta_0 = \text{const}, \alpha - \psi = \frac{\pi}{2}; \quad (4)$$

$$\vartheta = 0, \varphi = \varphi_0 = \text{const}, \rho = \zeta = 0, \alpha = \psi = \vartheta = \varphi = 0,$$

т.е. когда кольца соосны, а их плоскости удалены на расстояние  $\zeta_0 = h$ , то выполняются необходимые и достаточные условия существования равновесия (равенство сил и моментов, действующих на свободное тело). В выражениях (3) и (4):  $U$  – потенциальная энергия магнитного взаимодействия;  $\rho, \alpha, \zeta$  – цилиндрические координаты центра масс;  $\vartheta, \psi, \varphi$  – углы Эйлера.

Физически, данные условия означают, что сила тяжести свободного кольца уравнивается магнитным взаимодействием кольцевых токов. В одном случае, мы имеем магнитную подушку (свободное кольцо находится над неподвижным), в другом – подвес (свободное кольцо находится под неподвижным). В настоящее время явление магнитного подвеса при помощи левитации используется многими компаниями при изготовлении вертикально осевых ВЭУ. Например, ООО «Энергомир», Санкт-Петербург изготавливают 2 и 5 кВт агрегаты. Ветрогенератор собирается с использованием редкоземельных неодимовых магнитов (NdFeB) и благодаря его многополюсности возможно получать номинальное напряжение на малых оборотах без использования мультипликатора.

Кроме того, подобная конструкция предложена компанией Maglev Wind Turbine Technologies (MWTТ) [4].

## Вывод

Таким образом, использование магнитной левитации в функционировании вертикально осевых ВЭУ позволяет:

- исключить трение в опорных подшипниках и повысить КПД ВЭУ;
- снизить момент инерции вертикально осевых установок и сделать их самозапускаемыми уже при скоростях ветра 1,5 – 2 м/с;
- продлить срок службы генератора;
- повысить бесшумность работы генератора;
- снизить стоимость потребляемой РКК электроэнергии.

## Литература

1. Бочаров В.И. Транспорт с магнитным подвесом / В.И. Бочаров, В.Д. Нагорский. – М. Машиностроение, 1991. – 314 с.
2. Козорез В.В. Динамические системы магнитно-взаимодействующих свободных тел / В.В. Козорез. – К.: Наук. думка, 1981. – 140 с.
3. Иваса И. Высокоскоростной общественный наземный транспорт на магнитной подушке / И. Иваса; под ред. С. Фонера, Б. Шварца. – М.: Мир, 1977. – С. 370 – 421
4. Раздин Е.В. Ветрогенераторы нового поколения / Е.В. Раздин // Гидроэнергетика Украины. – 2008. – № 1. – С. 58-60.

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## ВИКОРИСТАННЯ МАГНІТНОЇ ЛЕВІТАЦІЇ ДЛЯ РОЗВАНТАЖЕННЯ ОПОРНИХ ПІДШИПНИКІВ ВЕРТИКАЛЬНО ОСЕВИХ ВІТРОАГРЕГАТІВ

*Т.О. Пархоменко*

Завданням даного наукового дослідження є вивчення різноманітності магнітних підвішувань, котрі отримали широкого розповсюдження за останні кілька десятиліть. Їх використання в техніці дозволило значно зменшити сили тертя в стичних обертючих деталях (маховиках, голівках турбін, пропелерах), розвантажити опорні підшипники. Вивчений математичний вираз енергії магнітного поля та його використання в сучасних вітрогенераторах на базі постійних магнітів зі сплаву неодиму, заліза та бору (NdFeB).

**Ключові слова:** вертикально осевий вітрогенератор, левітація, постійні магніти, електромагніт, магнітна індукція.

## APPLICATION OF MAGNETIC LEVITATION FOR UNLOADING VERTICAL AXIS WIND TURBINE SUPPORT BEARINGS

*T.A. Parkhomenko*

This scientific research assigns for the studying of magnetic suspension variations, which are widely-used during recent decades. Its application in engineering allowed to reduce friction forces significantly in contacting revolving parts (flywheels, turbine tops, propellers), to unload support bearings. The mathematical expression for magnetic field energy and its using in modern wind generators was examined. Such wind generators are based on permanent magnets from composition of neodymium, iron and boron (NdFeB).

**Key words:** vertical axis wind turbine, levitation, permanent magnets, electromagnets, magnetic induction.

**Пархоменко Тарас Александрович** – аспирант каф. нетрадиционных источников энергии Национального аэрокосмического университета «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: tarasparkhomenko@gmail.com.