

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

УДК 637.115:637.11

DOI 10.31857/S2500262725020106 EDN DFBRRQ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ СБОРОК ЛЕВИТИРУЮЩЕЙ ДОИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ «КАРУСЕЛЬ»

© 2025 г. **Я. П. Лобачевский**, доктор технических наук, академик РАН, **В. Ф. Федоренко**, доктор технических наук, академик РАН, **В. В. Кирсанов**, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, **Д. Ю. Павкин**, кандидат технических наук, **С. В. Кирсанов**, аспирант

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5
E-mail: kirvv2014@mail.ru

На молочных фермах от 1200 голов наибольшее распространение получили доильные установки типа «Карусель» на 40...90 доильных мест. Большие размеры самой установки и высокая механическая нагрузка на платформу определяют повышенный износ их колесных движителей (рельс-колесо). Поэтому актуальное значение имеет разработка левитирующей доильной платформы на постоянных магнитах. Исследование проводили с целью определения параметров магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, на основе имитационного моделирования с использованием программы Ansys Maxwell. Рассматривали три варианта магнитных сборок: с постоянными прямоугольными и цилиндрическими магнитами, а также магнитами кубической формы, собранными в виде массивов Хальбаха. Оценку общей картины распределения магнитного поля в воздушном зазоре и за его пределами, определение силовых характеристик магнитного поля, создающих эффект левитации, а также количества магнитных сборок в расчете на одно доильное место осуществляли на основе визуализированных результатов 3D-моделирования левитирующего магнитного поля между подвижными и неподвижными магнитными сборками в виде линий магнитной индукции. Средняя величина магнитной индукции в рабочем зазоре для прямоугольных магнитов (100×100×30 мм) составила 0,306 Тл, для цилиндрических магнитов (100×30 мм) – 0,233 Тл, для двойной симметричной сборки Хальбаха (5×5) из пяти магнитов кубической формы (25×25×25) – 0,539 Тл. Удельные силы отталкивания в расчете на 1 кг элементарных магнитных сборок для прямоугольных магнитов были равны 84 Н/кг, для цилиндрических – 48,7 Н/кг, для сборки Хальбаха – 314,3 Н/кг. При создании левитирующей доильной платформы предпочтительнее использовать сборки Хальбаха.

SIMULATION OF THE INTERACTION OF MAGNETIC ASSEMBLIES OF THE "KARUSEL" LEVITATING MILKING PLATFORM

Ya. P. Lobachevsky, V. F. Fedorenko, V. V. Kirsanov, D. Yu. Pavkin, S. V. Kirsanov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
109428, Moscow, 1-i Institutskii proezd, 5
E-mail: kirvv2014@mail.ru

On large dairy farms of 1,200 heads or more, milking machines of the "Karusel" type with a capacity of 40 to 90 milking places have become the most widespread. The large size of the installation itself and the high mechanical load on the platform determine the increased wear of the wheel thrusters (rail-wheel). Therefore, the development of a levitating milking platform with permanent magnets is of urgent importance. The study was conducted to determine the parameters of the magnetic field generated by permanent magnets based on simulation using the Ansys Maxwell program. Three variants of magnetic assemblies were considered: with permanent rectangular, cylindrical and cubic magnets assembled in the form of Halbach arrays. The visualized results of 3D-modeling of the levitating magnetic field between movable and stationary magnetic assemblies in the form of magnetic induction lines have been obtained, allowing us to assess the overall picture of the magnetic field distribution in the air gap and beyond, and determine its force characteristics, creating the effect of levitation, as well as the number of magnetic assemblies per milking place. The average value of magnetic induction in a working gap of the magnetic assemblies made: for rectangular magnets (100×100×30mm) – 0,306 TL, cylindrical magnets (100×30mm) – 0,233 TL and double symmetric Assembly of Halbach (5×5) of the five magnets cubic form (25×25×25) – 0,539 TL. Specific repulsive forces per 1 kg elementary magnetic assemblies for rectangular magnets made – 84 N/kg cylindrical – 48,7 N/kg for the Assembly of Halbach – 314,3 N/kg. It is preferable to use Halbach assemblies when creating a levitating milking platform.

Ключевые слова: доильная платформа «Карусель», моделирование, магнитная левитация, магнитная индукция, воздушный зазор, постоянные магниты, магнитные сборки, массив Хальбаха.

Keywords: milking platform "Karusel", modeling, magnetic levitation, magnetic induction, air gap, permanent magnets, magnetic assemblies, Halbach array.

На крупных фермах с численностью животных более 1200 голов рациональнее всего использовать доильные установки типа «Карусель» вместимостью от 40 до 90 доильных мест. К их достоинствам относятся высокая производительность (от 120 до 500 гол./ч), рациональная рабочая поза и малая зона обслуживания операторов, удобная логистика перемещения животных (вход и выход

с одной стороны) и др. В процессе эксплуатации могут возникать определенные сложности, связанные с большими размерами самой установки и высокой нагрузкой на движители (более 1200 кг на одно доильное место) [1], что предопределяет повышенный износ колесных движителей (рельс-колесо) и ведущих колес фрикционных передач электроприводов платформы [2].

Альтернативным вариантом колесным двигателям доильной платформы установки «Карусель» может быть ее магнитный подвес на постоянных магнитах, который применяют на некоторых высокоскоростных поездах, эксплуатируемых в Германии, Китае, Японии, США и Великобритании. В качестве системы подвеса транспортного средства в них используют электромагнитный и электродинамический подвес, а также подвес на постоянных магнитах [3]. Проанализировав перспективные способы применения магнитной левитации на транспорте, можно предложить создание магнито–левитирующей платформы для установки «Карусель», что позволит устранить ряд недостатков, связанных с изнашиванием опорных колес и рельсов платформы, снизить шум при движении, уменьшить материалоемкость платформы и трудоемкость ее монтажа и технического обслуживания. Благодаря более равномерному распределению весовой нагрузки между магнитами, по сравнению с точечной передачей усилия в системе «рельс-колесо», магнитные двигатели платформы будут практически без износными, что позволит обеспечить их высокую долговечность и срок эксплуатации, а также существенно снизить расход электроэнергии на привод платформы.

Цель исследования – провести имитационное моделирование взаимодействия магнитных сборок левитирующей доильной платформы «Карусель».

Методика. Моделирование магнитного поля постоянных магнитов осуществляли с использованием программы Ansys Maxwell [4] с целью изучения распределения магнитного поля постоянного магнита; анализа взаимодействия магнитных сборок; оптимизации формы и материала магнита.

Для решения задачи, связанной с постоянными магнитами, использовали режим Magnetostatic, включающий: препроцессирование – геометрическое построение модели, разбивку области моделирования методом конечных элементов и задание свойств материалов; определение граничных условий, решение задачи; постпроцессирование – 3D-визуализация результатов, заключающаяся в построении программой линий магнитной индукции и их распределении в воздушном зазоре между магнитными сборками и за ее пределами.

Для задания граничных условий (boundary conditions) в задачах с постоянными магнитами была выбрана подпрограмма Open Boundary, которая обеспечивает:

моделирование бесконечного пространства вокруг конструкции;

возможности реализации методов поверхностей бесконечности (Absorbing Boundary Conditions, ABC) или линейного упрощения (Balloon Boundary);

моделирование полей постоянных магнитов в свободном пространстве.

Для точного расчета магнитного поля была создана расчетная сетка, которая детализируется в областях с высокими градиентами магнитного поля (на краях магнитов). Алгоритм Ansys Maxwell предусматривает использование численных методов, например метода конечных элементов (МКЭ), для решения уравнений Максвелла [5]. Для расчета магнитного поля постоянного магнита были осуществлены следующие действия:

созданы прямоугольный параллелепипед, цилиндр или куб, представляющие различные типы магнитов;

добавлен окружающий его объем (воздушное пространство);

выбран магнитный материал (NdFeB) с указанием ключевых параметров (остаточная индукция, Вг; коэрцитивная сила, Нс; магнитная проницаемость среды, μ); выполнен расчет в режиме Magnetostatic.

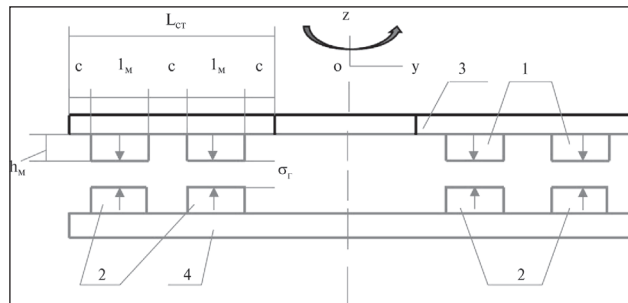


Рис. 1. Фрагмент магнитного подвеса по двухрядной схеме (2×2) вращающейся кольцевой доильной платформы: 1 – подвижные постоянные магниты, 2 – неподвижные постоянные магниты, 3 – вращающееся неферромагнитное основание кольцевой доильной платформы, 4 – неподвижное неферромагнитное основание; h , l – соответственно высота и длина (диаметр) магнита, m , c – шаг установки магнитов, M , $L_{ст}$ – длина стойла, m , β – левитационный зазор между магнитами, m , стрелками указаны направления линий магнитной индукции).

Для 3D-визуализации магнитного поля программа предусматривает построение линий магнитной индукции (B) внутри магнита и в окружающем пространстве.

За основу моделирования была взята технологическая схема платформы «Карусель» [6] (рис. 1) с использованием аксиально намагнитченных постоянных магнитов разных типов: прямоугольных, цилиндрических и кубической формы в виде (массива Хальбаха). Левитационный зазор δ_1 между горизонтальными магнитными сборками 1 и 2 принят равным 0,05 м, согласно данным [6]. Для повышения устойчивости и грузоподъемности платформы в пределах одного стойла использовали два ряда неодимовых магнитов.

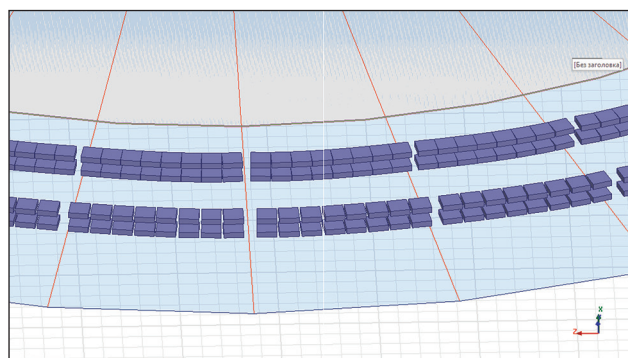


Рис. 2. Расположение магнитных сборок постоянных прямоугольных магнитов на доильной платформе «Карусель».

Первый вариант компоновки магнитных сборок (рис. 1, 2) предусматривал использование прямоугольных магнитов размерами $(100 \times 100 \times 30)$. Число магнитов на одно стойло-место – 8×2 (2 ряда). Вектор намагниченности для образования сил отталкивания подвижных магнитов 1 направлен по оси Z вниз, неподвижных магнитов 2 – вверх [7]. Во втором варианте использовали постоянные магниты цилиндрической формы (100×30) в количестве 9×2 на одно стойло-место. В третьем варианте вместо одинарных магнитов использовали массивы Хальбаха (рис. 3), состоящие из 5-и магнитов каждый (5×5) кубической формы $(25 \times 25 \times 25 \text{ мм})$. Во всех трех вариантах использовали один тип аксиально намагниченных неодимовых

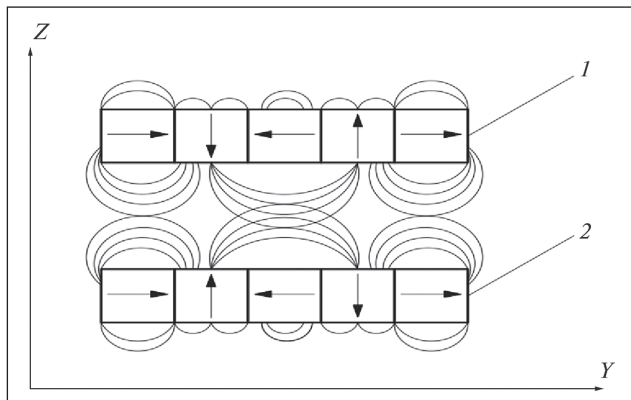


Рис. 3. Двойная симметричная магнитная сборка Хальбаха (5×5) в радиальном направлении Y (к центру платформы): 1 – магнитный полюс подвижной части платформы из 5-и магнитов; 2 – магнитный полюс неподвижной части платформы из 5-и магнитов.

магнитов NdFeB52 со следующими характеристиками: остаточная индукция (B_r)=1,48 Тл, коэрцитивная сила (H_c)=915 кА/м, магнитная проницаемость (μ)=1,05.

Массивы Хальбаха применяют в системах магнитного подвеса высокоскоростного транспортного средства с целью усиления магнитного поля с одной стороны сборки в рабочем зазоре [8]. Подобные сборки, как правило, состоят из магнитов кубической формы с поворотом вектора намагниченности на угол $\pi/4$ и $\pi/2$. Можно использовать двойную сборку Хальбаха со встречным отталкиванием сильных магнитных полей для увели-

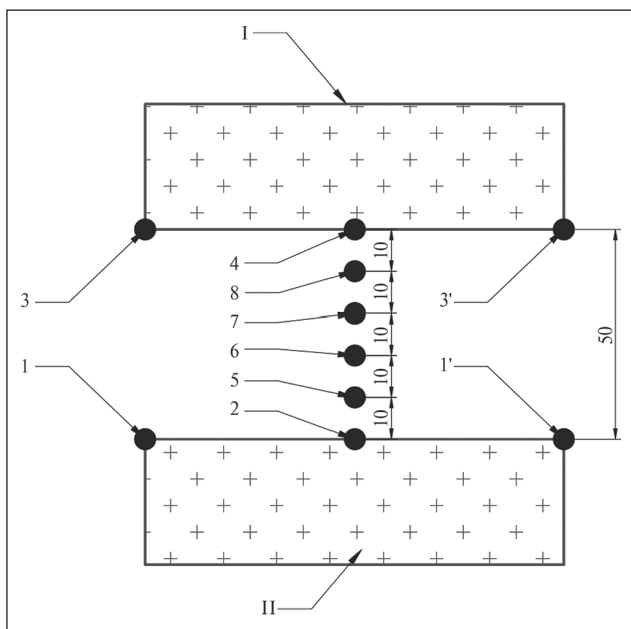


Рис. 4. Расположение линий измерения магнитной индукции между верхней подвижной (I) и нижней неподвижной (II) магнитными сборками (вид сбоку): 1 – линия на поверхности нижней сборки по левому краю магнитов; 1' – линия на поверхности нижней сборки по правому краю магнитов; 2 – линия, проходящая через центры магнитов на поверхности нижней сборки; 3 – линия на поверхности верхней сборки по левому краю магнитов; 3' – линия на поверхности верхней сборки по правому краю магнитов; 4 – линия, проходящая через центры магнитов на поверхности верхней сборки; 5, 6, 7 и 8 – линии равномерно расположены по высоте рабочего зазора между сборками с шагом 10 мм.

чения левитирующего эффекта, которые применяют, например, в магнитах Вигглера для ускорения элементарных частиц [9] и на высокоскоростных транспортных средствах на магнитном подвесе [10]. Двойные сборки Хальбаха могут быть как симметричными (5×5 – пять магнитов вверх, пять магнитов вниз), так и несимметричными (например, 9×5 – девять магнитов вверх, пять – вниз) [11].

Измерения магнитной индукции в рабочем зазоре между сборками проводили по 10 линиям (рис. 4), расположенным по длине сборок: для прямоугольных магнитов длина составляла 800 мм, для цилиндрических – 900 мм; для сборки Хальбаха – 125 мм. Количество и шаг между точками варьировались программой в зависимости от геометрических размеров сборки, конфигурации магнитов и особенностей создаваемого ими поля.

Результаты и обсуждение. Анализ распределения линий магнитной индукции (B) магнитных сборок, представленных в виде 3D-моделей, позволяет оценить общую картину создаваемых магнитных полей в воздушном (рабочем) зазоре и за его пределами, а также оценить среднюю величину магнитной индукции в воздушном рабочем зазоре между сборками для расчета сил отталкивания, необходимых для левитации доильной платформы.

Максимальная плотность линий магнитного поля, создаваемого прямоугольными магнитами (рис. 5 а), наблюдается вблизи их краев, где концентрация силовых линий выше. Поле между ними (в воздушном зазоре) относительно равномерно распределено и ориентировано вдоль направления взаимодействия магнитов. Зона рассеяния магнитного поля за пределами магнитных сборок визуально значительно больше величины воздушного зазора 50 мм. Для цилиндрических магнитов распределение магнитного поля внутри воздушного зазора и за его пределами не существенно отличается от аналогичного для прямоугольных магнитов (рис. 5 б).

В варианте с двойной симметричной сборкой Хальбаха (5×5) магнитное поле концентрируется преимущественно в воздушном зазоре, за пределами сборки поле рассеяния практически отсутствует (рис. 5 в), что позволяет усилить магнитную индукцию в зазоре, по сравнению с прямоугольными и цилиндрическими магнитами, собранными по однонаправленной схеме, в 1,5...2 раза (см. табл.). Среднее значение магнитной индукции в левитационном зазоре между сборками для прямоугольных магнитов составило 0,306 Тл, для цилиндрических – 0,233 Тл, для двойной сборки Хальбаха – 0,539 Тл.

Зная магнитную индукцию в зазоре и площадь магнитов (магнитных сборок), можно определить силу отталкивания магнитов, расположенных один над другим (магнитных сборок) по выражению [12]:

$$F_{1-2} = \frac{B^2 F}{2\mu_0} \quad (1),$$

где F_{1-2} – площадь каждой поверхности магнита (магнитной сборки), м²; μ_0 – магнитная постоянная ($4\pi \cdot 10^{-7}$), Гн/м; B – магнитная индукция в зазоре, Тл.

Площади взаимодействующих магнитов определяем с использованием известных зависимостей для прямоугольника и круга. Для сборки Хальбаха площадь одного магнита умножаем на их число в элементарной сборке. Подставив соответствующие значения в выражение (1), получим величины сил отталкивания F_{1-2} элементарных сборок: для прямоугольных магнитов –

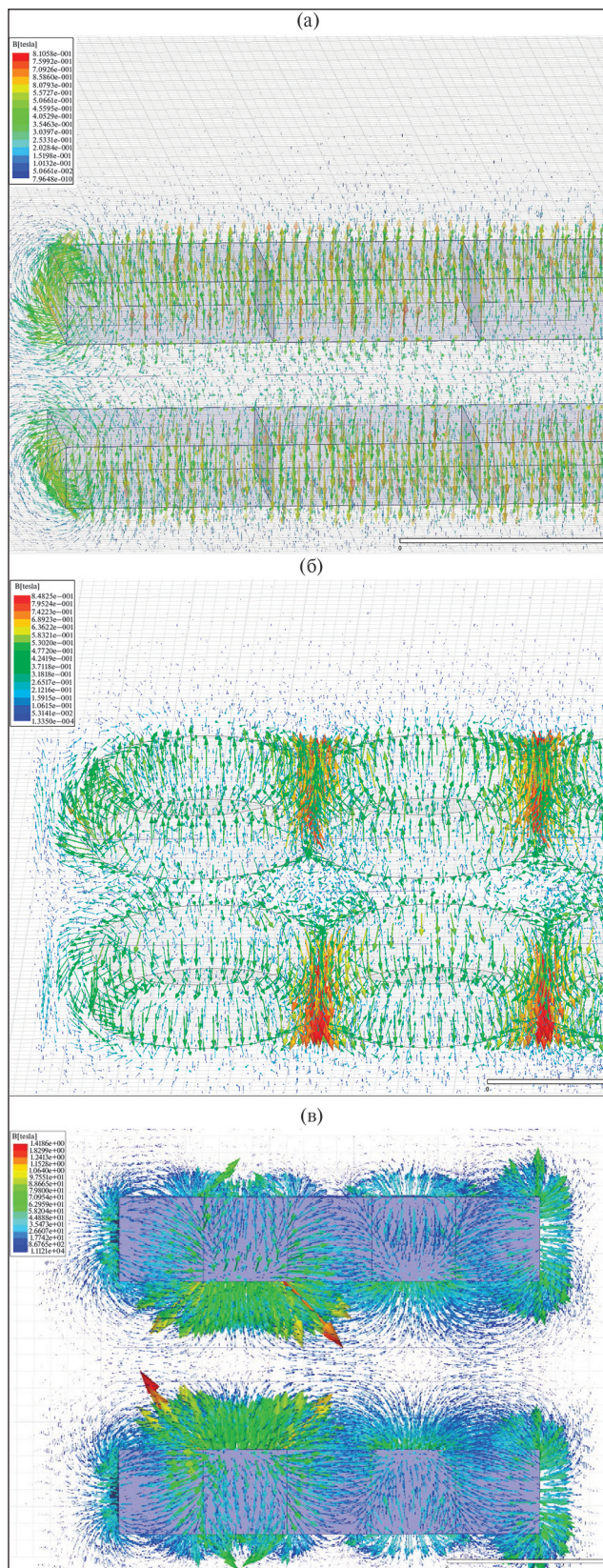


Рис. 5. Результаты 3D-моделирования линий магнитной индукции (B) магнитных сборок: а) постоянные прямоугольные магниты, б) постоянные цилиндрические магниты, в) двойные симметричные сборки Хальбаха (5×5).

Результаты моделирования параметров магнитного поля (магнитной индукции B , мТл), создаваемого сборками из прямоугольных, цилиндрических магнитов и массивов Хальбаха

	Линия									
L, мм*	1	1'	2	3	3'	4	5	6	7	8
постоянные прямоугольные магниты										
0	311	316	473	349	1180	885	287	196	210	285
42	527	497	147	622	993	144	100	73	74	101
84	504	487	103	553	1077	105	63	37	37	62
126	480	477	95	526	879	104	63	24	27	59
168	560	512	92	575	1020	102	54	25	25	60
211	512	510	92	558	1046	99	55	26	27	56
253	520	502	94	572	924	92	43	14	15	46
295	474	524	92	547	940	98	49	21	22	51
337	535	539	93	549	1115	100	55	32	32	58
379	497	522	91	488	957	100	53	20	21	55
421	592	514	91	527	985	101	53	21	21	55
463	562	580	91	658	1063	99	54	27	28	56
505	513	536	94	563	1000	91	49	20	21	51
547	554	490	93	538	911	91	44	16	16	46
589	579	476	93	601	1050	91	54	26	27	56
632	550	505	94	530	1028	102	58	24	25	55
674	536	495	98	477	950	100	62	24	23	56
716	530	493	102	558	1045	102	61	35	35	63
758	550	503	157	561	1091	142	99	70	69	98
800	371	356	424	376	1190	893	290	214	208	290
Средняя	523	501	116	542	1015	145	70	38	38	71
В зазоре	306									
постоянные цилиндрические магниты										
0	440	458	452	472	811	957	223	136	159	251
89	411	406	-*	434	424	-	-	-	-	-
100	-	-	56	-	-	237	87	26	31	72
178	419	364	-	429	365	--	-	-	-	-
200	-	-	58	-	-	245	94	33	32	86
267	321	326	-	319	332	-	-	-	-	-
300	-	-	52	-	-	260	66	35	33	63
356	279	233	-	222	218	-	-	-	-	-
400	-	-	48	-	-	266	82	26	18	87
444	230	218	-	239	216	-	-	-	-	-
500	-	-	51	-	-	262	65	35	34	63
533	342	336	-	338	293	-	-	-	-	-
600	-	-	56	-	-	235	66	34	35	68
622	378	398	-	392	367	-	-	-	-	-
700	-	-	49	-	-	251	79	30	34	81
711	455	409	-	430	396	-	-	-	-	-
800	394	377	58	396	424	252	82	35	33	97
900	-	-	411	-	-	832	289	205	196	265
Средняя	367	352	129	367	385	380	113	59	60	113
В зазоре	233									
двойные симметричные сборки Хальбаха										
0	314	330	423	395	326	408	213	82	77	217
7	321	340	487	1021	1003	920	235	127	115	258
13	343	354	467	967	957	837	249	144	124	212
20	438	446	716	863	854	593	238	140	127	251
26	494	489	869	1387	1465	1147	315	118	107	312
33	525	481	709	1225	1255	771	288	86	66	314
39	511	487	728	1211	1198	681	288	104	100	333
46	505	523	789	1417	1335	1019	313	153	140	350
53	491	547	840	781	734	429	320	184	182	340
59	463	459	626	839	798	717	322	208	211	333
66	461	475	622	831	793	701	325	201	211	326
72	487	574	857	755	719	402	339	179	172	337
79	518	508	844	1329	1315	1001	341	163	163	384
86	534	457	705	1193	1176	710	336	81	98	347
92	544	460	657	1226	1201	779	310	80	76	307
99	505	470	742	1399	1373	1118	373	137	115	308
105	446	423	682	884	848	621	281	115	133	290
112	339	375	461	984	959	834	241	134	150	223
118	361	344	499	1036	1014	921	220	119	120	203
125	387	331	458	1039	1015	904	203	91	82	207
Средняя	460	456	683	1075	1055	789	296	137	134	302
В зазоре	0.539									

*Пустые ячейки таблицы связаны с отсутствием данных после их выгрузки из программы моделирования (магнитная индукция в этих точках равна 0).

373 Н, для цилиндрических – 169,6 Н, для сборок Хальбаха (5 × 5) – 361,4 Н.

Количество элементарных магнитных сборок в расчете на одно доильное место определяем по выражению:

$$n_{\text{сб}} = \frac{P}{(F_{1-2} - n_m \cdot m_m \cdot g)} \quad (2),$$

где P – грузоподъемность платформы в расчете на одно доильное место (принимаем ≈ 1200 кг или 11772 Н в соответствии с рекомендациями, представленными в [2]), n_m , m_m – соответственно количество (шт.) и масса одного магнита в элементарной сборке (для прямоугольных и цилиндрических магнитов – $n_m = 2$, $m_m = \rho \cdot V$, ($\rho = 7400$ кг/м³), V – объем магнита, м³ (определяется по известным формулам для параллелепипеда и цилиндра), для сборки Хальбаха (5 × 5) – $n_m = 10$).

С учетом плотности материала масса элементарной сборки из прямоугольных магнитов, расположенных по схеме (1 × 1), будет равна 4,44 кг, из цилиндрических (1 × 1) – 3,48 кг, из сборок Хальбаха (5 × 5) – 1,15 кг. Удельная сила отталкивания в расчете на 1 кг магнитов – соответственно 84 Н, 48,7 Н и 314,3 Н.

Выводы. По результатам моделирования магнитного поля разных типов постоянных магнитов средняя величина магнитной индукции в левитационном воздушном зазоре доильной платформы «Карусель» для прямоугольных магнитов (100 × 100 × 30) NdFeB52 составляет 0,306 Тл, для цилиндрических магнитов (100 × 30 мм) – 0,233 Тл, для сборок Хальбаха из пяти магнитов кубической формы (25 × 25 × 25) – 0,539 Тл. Удельные величины сил отталкивания элементарных магнитных сборок в расчете на 1 кг магнитных сборок для прямоугольных магнитов составляют 84 Н/кг, для цилиндрических – 48,7 Н/кг, сборок Хальбаха – 314,3 Н/кг. Это открывает возможности для оптимизации массы и общего количества магнитных сборок в расчете на одно место левитирующей доильной платформы «Карусель». В целом для магнитного подвеса вращающейся доильной платформы «Карусель» более целесообразно использование сборок Хальбаха, магнитное поле которых характеризуется меньшей зоной рассеяния за пределами сборки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Морозов Н. М., Кирсанов В. В., Ценч Ю. С. Историко-аналитическая оценка развития процессов автоматизации и роботизации в молочном животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. № 1. С. 11–18.
2. Лобачевский Я. П., Кирсанов В. В., Кирсанов С. В. платформы Карусель на принципах магнитной левитации // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024. № 2. С. 63–67.
3. Зайцев А. А., Соколова Я. В., Пантина Т. А. Инновационное развитие транспортной системы с применением технологии магнитной левитации // *Мир транспорта*. 2019. Т. 17. № 4(83). С. 36–45.
4. Исследование магнитных полей в новой конструкции гомополярного магнитного подшипника / В. Е. Вавилов, Ф. Р. Исмаилов, А. А. Жеребцов и др. // *Авиакосмическое приборостроение*. 2023. № 8. С. 50–61.
5. Черкасова О. А. Сравнительное исследование нелинейных магнитных характеристик для магнитного подвеса при помощи численного моделирования // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. Т. 183. 2021. № 4. С. 20–25.
6. Кирсанов В. В., Федоренко В. Ф., Кирсанов С. В. Магнитостатический расчет левитирующей вращающейся доильной платформы карусель на постоянных магнитах // *Техника и оборудование для села*. 2024. № 6(324). С. 29–32.
7. Микроскопическая структура магнитного поля на поверхности постоянного магнита / Б. А. Гинзбург, Т. П. Каминская, П. А. Поляков и др. // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2018. Т. 82. № 2. С. 226–231.
8. Моделирование магнитного поля в нелинейных ферромагнитных средах с использованием блочных элементов и их схем замещения / А. Н. Ткачев, А. В. Пашиковский, Д. Н. Черноиван и др. // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2020. Т. 63. № 2–3. С. 44–54.
9. Сверхпроводящие многополюсные вигглеры для генерации синхротронного излучения в ИЯФ СО РАН / В. А. Шкаруба, А. В. Брагин, А. А. Волков и др. // *Письма в журнал физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2020. Т. 17. № 4. С. 567–575.
10. Зайцев А. А. Грузовая транспортная платформа на магнитно-левитационной основе: опыт создания // *Транспортные системы и технологии*. 2015. Т. 1. № 2. С. 5–15.
11. Брюханов С. А. Устройство магнитной левитации на постоянных магнитах // *Патент РФ 2743104*. Оpubл. 15.02.2021. бюлл. № 5.
12. Коротченя В. М., Ценч Ю. С., Лобачевский Я. П. Система машин как фактор научно-технического прогресса в агропромышленном комплексе // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2024. № 4. С. 67–72.

Поступила в редакцию 18.02.2025

После доработки 07.03.2025

Принята к публикации 01.04.2025