

Численное моделирование динамического режима работы линейного электромагнитного двигателя лабораторного шейкера

ИВАНОВ А.С., ШИТОВ Е.М., МИЛЬШИН А.Ю., КНЯЗЕВ В.О., СИДОРОВ А.О.

В статье предложена конструкция механической части линейного электропривода лабораторного шейкера, приведена ее математическая модель и показан алгоритм расчета динамических характеристик линейного электромагнитного двигателя (ЛЭМД). Выполнено его компьютерное моделирование с использованием программы конечно-элементного моделирования COMSOL Multiphysics. Исследован динамический режим работы двигателя возвратно-поступательного действия, приведены динамические характеристики (механическая и скоростная характеристики). Исследования показали, что привод лабораторного шейкера на основе линейного электромагнитного двигателя обладает сопоставимыми свойствами с приводом серийных шейкеров. Причем по некоторым показателям, таким как максимальная частота колебаний и пиковая потребляемая мощность, спроектированный привод обладает лучшими характеристиками.

К л ю ч е в ы е с л о в а: линейный электромагнитный двигатель, лабораторный шейкер, тяговое усилие, моделирование, динамические характеристики, метод конечных элементов

Лабораторный шейкер относится к особому классу устройств, которые используются в медицинских, биологических и химических лабораториях для перемешивания, разделения, рассеивания, разрушения и еще целого ряда технологических операций с растворами или сыпучими веществами. При этом шейкеры создают возвратно-поступательное или вращательное (орбитальное) движение рабочего органа, которым обычно является столик, специальная площадка или держатель штативов. Возвратно-поступательное движение якоря осуществляется в результате воздействия электромагнитных сил на рабочий орган при подаче на катушку возбуждения напряжения определенной формы.

Для реализации того или иного процесса необходимо обеспечить движение рабочего органа с заданной частотой. По числу перемещений в единицу времени шейкеры бывают высокочастотными, среднечастотными и низкочастотными. Принято считать, что устройства с частотой ниже 1 Гц являются низкочастотными, от 1 до 10 Гц – среднечастотными и с частотой выше 10 Гц – высокочастотными [1].

Помимо частоты перемещения рабочего органа (интенсивности смешивания) лабораторный шейкер определяется также:

траекторией и амплитудой встряхивания (перемещения подвижной части линейного электромагнитного двигателя — ЛЭМД);

размерами платформы и максимально допустимой механической нагрузкой;

продолжительностью работы в режиме непрерывного смешивания.

Привод подавляющего большинства шейкеров содержит вращающийся электродвигатель и кинематическое звено, которое преобразует вращательное движение рабочего органа в возвратно-поступательное [2, 3]. Наличие промежуточного механического звена снижает надежность и ресурс, ухудшает массогабаритные показатели и технологичность. По статистике именно выход из строя кинематического звена шейкера, как наиболее нагруженного элемента привода, приводит к потере устройством работоспособности. Как правило, лабораторные шейкеры не подлежат ремонту и требуют замены. Для устранения указанных недостатков, а также расширения диапазона динамических характеристик предлагается использовать линейный электромагнитный двигатель [4], конструкция которого приведена ниже.

В качестве шейкера-прототипа для сравнения основных показателей был выбран лабораторный шейкер ПЭ-6500, его технические характеристики [5]:

тип движения платформы	возвратно-поступательный
максимальная частота колебаний	350 колебаний /мин (≈ 6 Гц)
максимальное перемещение платформы (амплитуда)	10 мм
размеры платформы	315×210 мм
вместимость платформы	плоскодонные колбы от 100÷1000 мм
габаритные размеры	360×270×120 мм
масса	7 кг
питание от сети переменного тока (50 Гц)	220 ± 10 В
потребляемая мощность, Вт	30

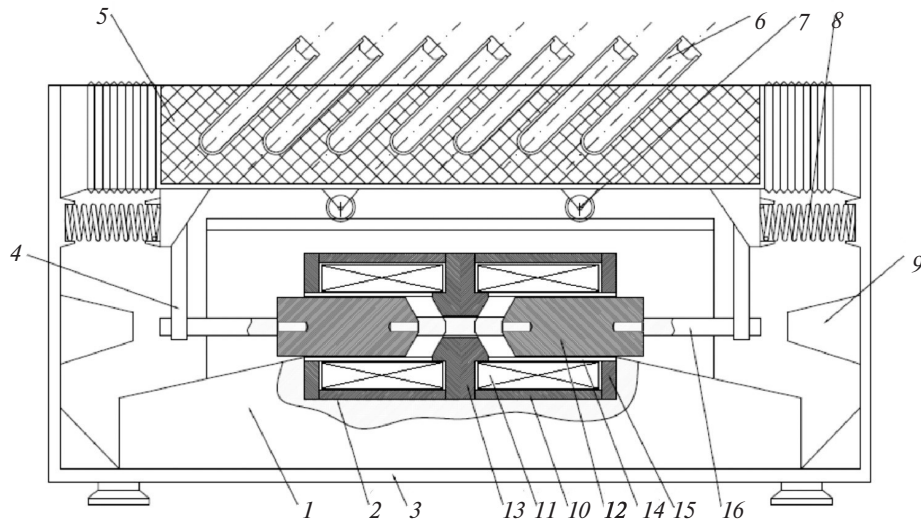


Рис. 1. Лабораторный шейкер: 1 – станина; 2 – ЛЭМД; 3 – корпус; 4 – скоба; 5 – столик; 6 – пробирки со штативом; 7 – ролики; 8 – пружины; 9 – резиновые демпферы; 10 – магнитопровод; 11 – катушки; 12 – якорь (шток); 13 – полюс (стоп); 14 – немагнитная гильза; 15 – проходной фланец; 16 – рабочий орган (направляющий вал)

Схема привода шейкера и конструкция ЛЭМД.

На рис. 1 схематично изображен разработанный лабораторный шейкер возвратно-поступательного действия с приводом ЛЭМД. На станине 1 закреплен ЛЭМД малой мощности (до 0,1 кВт) 2 и корпус шейкера 3. Специальная скоба 4 соединена с якорем ЛЭМД и столиком шейкера 5, на котором располагается штатив с пробирками 6. Столик перемещается в горизонтальном направлении по станине на роликах 7. Пружины 8 и резиновые демпферы 9 необходимы для смягчения соударений в крайних положениях якоря.

Двигатель имеет цилиндрическую форму и состоит из магнитопровода 10, катушек 11, якоря (штока) 12, полюса (стопа) 13, немагнитной гильзы 14, проходного фланца 15. Магнитопровод, якорь и стоп изготовлены из низкоуглеродистой конструкционной стали, обмотка (одно- или двухкатушечная) выполнена из медного провода. На обмотки ЛЭМД поочередно подаются импульсы напряжения с заданной частотой. Якорь ЛЭМД совершает возвратно-поступательное движение, которое с помощью специальных скоб 4 передается столику шейкера с пробирками 6. Движение рабочего органа 16 происходит в горизонтальном направлении — в одну сторону за счет электромагнитных сил, созданных обмоткой, в обратную — за счет упругих сил демфирующего устройства (пружины). Перемещение определяется шириной рабочего воздушного зазора и в рассматриваемой конструкции составляет 10 мм.

Моделирование ЛЭМД. Штатным режимом работы ЛЭМД является постоянное включение и отключение катушки или катушек для создания возвратно-поступательного движения якоря. Каждое переключение катушки сопровождается электроме-

ханическим переходным процессом. Для корректной работы ЛЭМД крайне важно решать комплексную задачу расчета как электромагнитных, так и механических переходных процессов.

Обобщенная система уравнений (1) является базовой для расчета и анализа электромагнитных устройств, к которым относятся ЛЭМД [6]. Система (1) состоит из уравнений Максвелла с граничными условиями; уравнения, устанавливающего взаимосвязь между изменением во времени напряженности магнитного поля и изменением в пространстве напряженности электрического поля; выражения для электромагнитной силы; дифференциального уравнения движения:

$$\begin{aligned}
 \vec{J} &= \gamma \vec{E}; \\
 \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{J}; \\
 \operatorname{div} \vec{B} &= 0; \\
 \vec{B} &= \mu \vec{H}; \\
 \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{d\vec{B}}{dt} + \operatorname{rot}(\vec{V} \times \vec{B}); \\
 \vec{F}_{\text{ЭМ}} &= \frac{1}{\mu_0} \int \left[(\vec{B}\vec{n}) - \frac{1}{2} B^2 \vec{n} \right] ds; \\
 m \frac{dV_x}{dt} &= \sum_{i=1}^n F_i(V_x, x, t); \\
 \frac{dx}{dt} &= V_x,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где J — плотность тока; γ — электрическая проводимость; H — напряженность магнитного поля; B — магнитная индукция; μ — магнитная проницаемость среды; μ_0 — магнитная проницаемость воздуха; E — напряженность электрического поля; V_x — скорость передвижения рабочего органа в на-

правления x ; $F_{ЭМ}$ — электромагнитная сила; s — площадь поверхности, на которую воздействует $F_{ЭМ}$.

Система (1) в представленном виде является достаточно сложной. Ее аналитическое решение сопряжено с существенными трудностями, а иногда и невозможностью определения ряда параметров.

Широкими возможностями анализа динамических характеристик электродвигателя обладают численные методы, реализованные в большинстве современных программных комплексов. Наиболее удобным с точки зрения получения этих характеристик является метод конечных элементов, используемый для исследования модели линейных электромагнитных двигателей [7].

Моделирование ЛЭМД проводилось с помощью программного средства COMSOL Multiphysics, представляющего собой среду конечно-элементного анализа. Выбор программы объясняется реализованной в ней концепцией мультифизического моделирования, которая позволяет учитывать широкий диапазон рабочих условий и физических явлений. Программа COMSOL Multiphysics позволяет создавать численные модели на основе математических уравнений, добавлять и настраивать выражения в физических интерфейсах. Компьютерная модель, созданная в программе COMSOL Multiphysics, является удобным инструментом для исследования динамических характеристик ЛЭМД при изменении его параметров или характеристик питания.

Для ЛЭМД важный фактор, определяющий форму динамических характеристик, — геометрия якоря; размеры и параметры ЛЭМД могут быть изменены при проведении оптимизации. Такая программная возможность позволяет автоматически перестраивать расчетную область модели без потери свойств объекта моделирования.

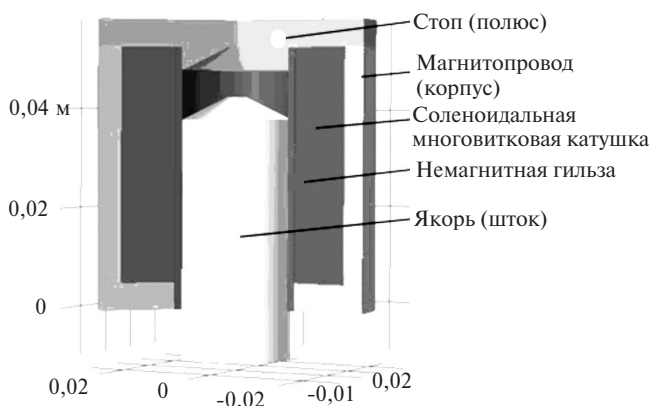


Рис. 2. Модель ЛЭМД

Модель ЛЭМД (рис. 2) упрощена относительно общей конструкции лабораторного шейкера, приведенной на рис. 1. Объект моделирования (ЛЭМД) построен на основе данных, полученных в результате его проектирования по методике [8], с помощью инструментов встроенного графического редактора с использованием двумерной осесимметричной геометрии. Параметры рассматриваемой модели двигателя:

продолжительность импульса тока	0,035 с
время нарастания/спада	0,001 с
диаметр якоря	22 мм
длина якоря	52,5 мм
диаметр наконечника якоря	4 мм
угол среза наконечника якоря	30 град.
число витков катушки	1710
диаметр обмоточного провода	0,45 мм
амплитуда питающего напряжения	24 В
ширина гильзы	1,5 мм
ширина магнитопровода	5,5 мм
высота катушки	47 мм
ширина катушки	11 мм
высота стопа	5 мм
высота магнитопровода	52,5 мм
начальный воздушный зазор	0,5 мм
максимальное перемещение	9,5 мм
воздушный зазор до стопа	0,5 мм

В качестве материала штока, магнитопровода и стопа была использована низкоуглеродистая конструкционная сталь марки Ст10 с удельной плотностью 7850 кг/м^3 . Частота колебаний рабочего органа $5\text{--}10 \text{ Гц}$ ход штока $\delta=10 \text{ мм}$. Соленоидальная обмотка на статоре состоит из 1710 витков медного провода диаметром 0,45 мм. Допустимое превышение температуры обмотки $105 \text{ }^\circ\text{C}$.

Поле в якоре, стопе и магнитопроводе ЛЭМД моделировалось с учетом нелинейной характеристики намагничивания $B=f(H)$. Напряжение питания катушки возбуждения ЛЭМД представляет собой прямоугольный импульс с амплитудой 24 В.

На модели были исследованы физические процессы, протекающие при «срабатывании» электромагнитного устройства. Значения электромагнитной силы F_z , действующей на шток по оси z , подсчитаны с помощью уравнения движения штока ЛЭМД [9, 10]. В общем случае оно имеет вид:

$$M \frac{d^2 p}{dt^2} - F_z(p, v, t) + F_{пр}(v) = 0, \quad (2)$$

где p — положение штока в направлении оси z ; v — линейная скорость перемещения штока; M — масса штока с рабочим органом (стол с пробирками); $F_z(p, v, t)$ — действующая на шток электромагнитная сила, зависящая в общем случае от значения

рабочего хода, скорости штока и времени импульса напряжения; $F_{пр}(p, v)$ — сила сопротивления движению штока.

Уравнение (2) можно представить в виде системы дифференциальных уравнений для положения штока и его скорости:

$$\begin{aligned} M \frac{dv}{dt} - F_z(p, v, t) + F_{пр}(v) &= 0; \\ \frac{dp}{dt} - v &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Шток может занимать два крайних положения. Для описания его смещения задавались условия состояния вспомогательной переменной p от 0 до 1 либо наоборот. Состояние «открыто» или «закрыто» определялось на основании положения штока p по оси z , т.е. $z_{max} - p = 0$ — якорь втянут в катушку; $z_{max} - p = 1$ — якорь находится в разомкнутом состоянии.

При перемещении штока сетка конечных элементов между якорем и стопом перестраивалась и магнитное поле рассчитывалось в разные моменты времени. Минимальное расстояние между якорем и стопом составляет 0,5 мм. Такое допущение необходимо для достижения приемлемой точности расчетов характеристик магнитного поля в этой зоне. Сетка области расчета приведена на рис. 3.

Индукция магнитного поля в элементах конструкции линейного двигателя в наиболее нагруженном режиме работы не выходит за колено кривой намагничивания стали Ст10 и составляет $B_{max} = 1,39$ Тл.

Динамические параметры. Анализ результатов. В построенной геометрии ЛЭМД моделировалось возвратно-поступательное движение рабочего органа за цикл перемещения. В процессе исследования контролировались зависимости напряжения и тока в катушках от времени $U(t)$, $i(t)$, а также тягового

усилия, скорости и перемещения штока от времени $F_{эм}(t)$, $v(t)$, $\delta(t)$, зависимость тягового усилия от перемещения штока $F_{эм}(\delta)$.

В результате расчетов получены кривые динамических характеристик (рис. 4–6). На рис. 4 представлены зависимости напряжений $U(t)$ (рис. 4,а) и токов $i(t)$ (рис. 4,б) в катушках линейного электромагнитного двигателя от времени. Длительность импульса напряжения для обеих катушек составляет 0,035 с, амплитуда напряжения $U_{max} = 24$ В. За время переходного процесса ток в катушках достигает $I_{max} = 0,558$ А. Потребляемая мощность в пике:

$$P_{пик} = I_{max} U = 0,558 \cdot 24 = 13,4 \text{ Вт.}$$

Зависимости тока от времени для второй и первой катушек аналогичны (рис. 4,а), но при этом смещены по временной оси на значение периода между импульсами $T = 0,065$ с.

График тока от времени на рис. 4,б показывает основные этапы электромеханического переходного процесса в ЛЭМД на единичном цикле его работы. Цикл состоит из нескольких этапов. Необходимость его разбиения связана с тем, что для отдельного промежутка времени работы ЛЭМД характерны различные переходные процессы. Первый этап начинается в момент подачи напряжения на катушку и заканчивается в момент, когда ток достигает значения $i_{тр} = i_{max}$ и якорь начинает движение за время $t_{тр}$. При начальном неподвижном положении якоря рабочий зазор δ относительно велик, поэтому магнитная цепь считается ненасыщенной, а индуктивность обмотки $L = const$. Уравнение, описывающее ток на этом временном участке, имеет вид:

$$i_{тр} = I_y \left(1 - e^{-\frac{t_{тр}}{T}} \right), \quad (4)$$

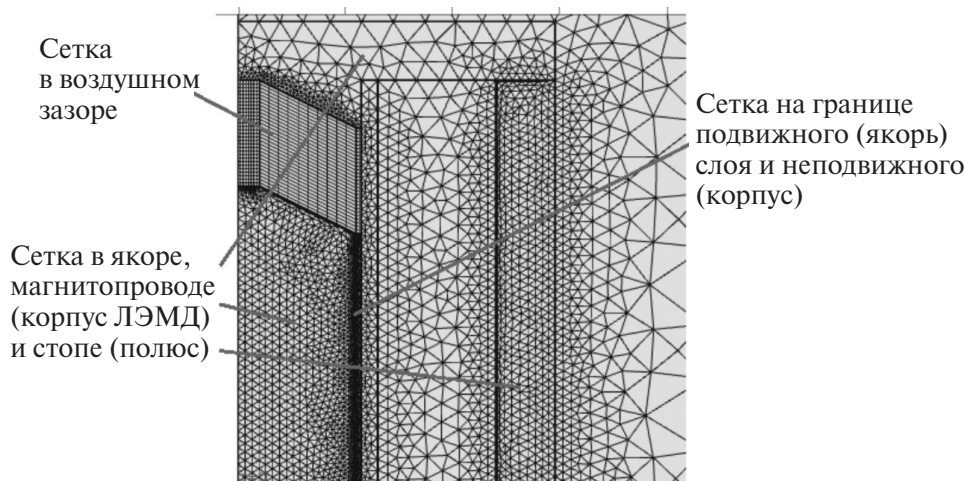


Рис. 3. Сетка конечных элементов области расчета ЛЭМД

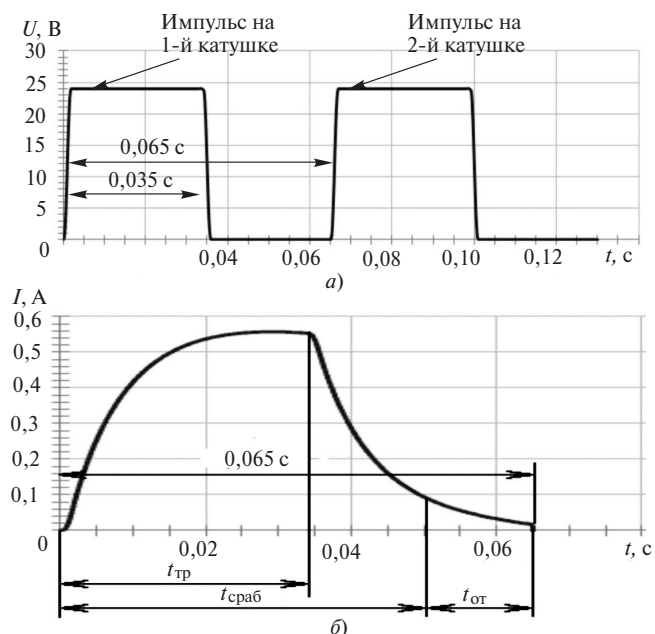


Рис. 4. Зависимость напряжения и тока от времени на катушках возбуждения ЛЭМД

где $I_y = U/R$ — установившееся значение тока; $T = L/R$ — постоянная времени цепи.

Второй этап охватывает период движения якоря и занимает время $t_{дв} = t_{сраб} - t_{гр}$, индуктивность обмотки является величиной переменной ($\frac{dL}{dt} \neq 0$), вследствие чего характер кривой имеет отличный от первого этапа вид.

Третий этап начинается в момент достижения якорем крайнего положения (индуктивность обмотки $L = \text{const}$) и заканчивается, когда ток спадает до нулевого значения:

$$i = I_{отк} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (5)$$

где $I_{отк}$ — ток перед отключением обмотки возбуждения.

Стоит заметить, что момент прекращения подачи напряжения может не совпадать с моментом достижения якорем крайнего положения; время третьего этапа $t_{от}$.

С энергетической точки зрения полезная работа совершается только на этапе движения, несмотря на то, что ЛЭМД будет потреблять энергию на всех этапах. С точки зрения быстродействия особое внимание нужно уделить второму этапу, так как именно частота перемещения якоря (бойка или рабочего органа) является важнейшим фактором, определяющим использование ЛЭМД для решения технологических задач.

На рис. 5 приведены зависимости тягового усилия от времени $F_{эм}(t)$ (рис. 5,а) и перемещения штока электродвигателя $F_{эм}(\delta)$ (рис. 5,б). Посколь-

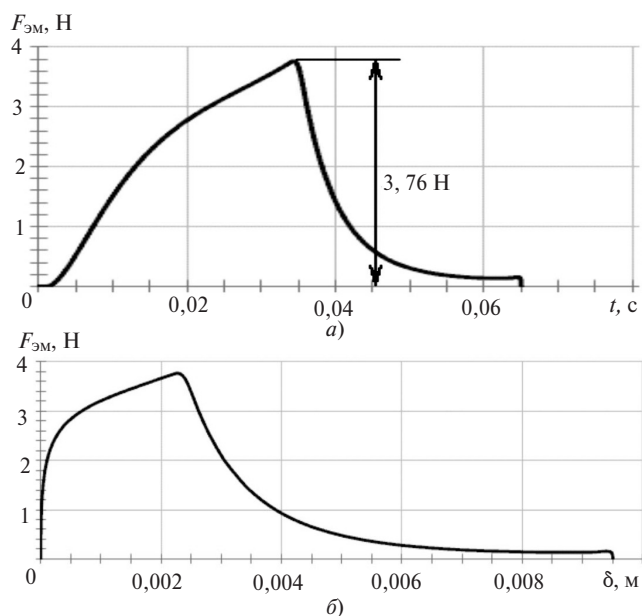


Рис. 5. Зависимость тягового усилия: а — от времени для 1-й катушки ЛЭМД; б — от перемещения штока ЛЭМД

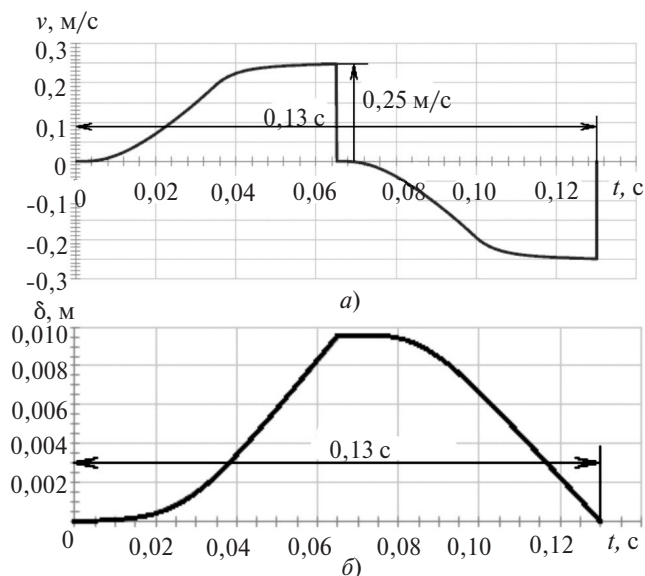


Рис. 6. Зависимости скорости перемещения штока от времени (за время рабочего цикла ЛЭМД) — а и перемещения штока от времени (за время рабочего цикла ЛЭМД) — б

ку обе половины ЛЭМД симметричны, то кривые тягового усилия имеют также одинаковую форму и отличаются только по знаку (за положительное направление принято движение штока слева направо). Максимальное усилие, развиваемое ЛЭМД за время импульса напряжения питания, достигает $F_{\max} = 33,76$ Н (рис. 5,а). На характеристике электромагнитного усилия от перемещения $F_{эм}(\delta)$ (рис. 5,б) сила тяги при пуске составляет примерно $F_{пуск} \approx 1,5$ Н/м.

На рис. 6 приведены зависимости скорости $v(t)$ (рис. 6,а) и перемещения $\delta(t)$ (рис. 6,б) от времени. Максимальная скорость, развиваемая ЛЭМД за

время импульса напряжения питания, составляет 0,25 м/с (рис. 6,а). Время, за которое шток электромагнитного двигателя совершает возвратно-поступательное движение из одной крайней точки в другую $T=0,13$ с. Частота рабочего цикла ЛЭМД $f=1/T=7,7$ Гц или 461 колебаний/мин (у рассматриваемого прототипа-аналога $f=6$ Гц или 350 колебаний/мин).

Видно, что при сравнении основных параметров привод лабораторного шейкера на основе линейного электромагнитного двигателя обладает сопоставимыми свойствами с приводом серийных шейкеров, где применяется классический механизм преобразования вращательного движения электродвигателя в поступательное с помощью промежуточного кинематического звена [1, 2]. Причем по некоторым показателям, таким как максимальная частота колебаний и пиковая потребляемая мощность, спроектированный привод обладает лучшими характеристиками (461 колебаний/мин и 13,4 Вт против 350 колебаний/мин и 30 Вт у ПЭ-6500).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мошкин В.И., Нейман В.Ю., Угаров Г.Г. Импульсные линейные электромагнитные двигатели. Курган: Курганский государственный университет, 2010, 220 с.
2. Патент на изобретение US6579002. Broad-range large-load fast-oscillating high-performance reciprocating programmable laboratory shaker/ D.Bartick, B.Bartick, 2003, 22 p.
3. Патент на изобретение US5593228. Rotary shaker with flexible strap suspension/M. Tannenbaum, 1997, p. 10.
4. Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В. Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1970, 260 с.
5. Горизонтальные шейкеры фирмы «Экрос аналитика» [Электрон. ресурс] <http://eco-analytika.com/produkcija-ekros/shejker-laboratornyj> (дата обращения 18.10.2019).
6. Старостин А.Г. Методы проектирования электромагнитных механизмов постоянного тока с заданными динамическими параметрами: Автореф. дис.... канд. техн. наук. — Новочеркасск: Южно-Российский государственный технический университет, 2006, 234 с.
7. Фисенко В.Г. Численные расчеты электромагнитных полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов. М.: Изд-во МЭИ, 2002, 44 с.
8. Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока (расчет и элементы проектирования). М.: Энергия, 1968, 152 с.
9. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты: Учебное пос. для студентов вузов. М.: Энергия, 1972, 248 с.
10. Могилевский Г.В. К расчету тяговых сил в электромагнитах. — Вестник Электропромышленности, 1960, № 4, с. 67—70.

[18.11.2019]

А в т о р ы: Иванов Александр Сергеевич — кандидат техн. наук, доцент НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 2012 г.

Шитов Евгений Михайлович — кандидат техн. наук, старший инженер АО «Р-Фарм», диссертацию защитил в 2015 г.

Мильшин Алексей Юрьевич — руководитель отдела сервиса медицинского оборудования АО «Р-Фарм».

Князев Вячеслав Олегович — инженер-испытатель ООО «Техбезопасность».

Сидоров Антон Олегович — кандидат техн. наук, инженер АО «Корпорация «ВНИИЭМ», диссертацию защитил в 2019 г.

Numerical Simulation of the Dynamic Operation Mode of a Laboratory Shaker Linear Electromagnetic Motor

IVANOV Alexander S. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

SHITOV Yeugene M. (JSC «R-FARM», Moscow, Russia) — Senior Engineer, Cand. Sci. (Eng.)

MIL'SHIN Aleksey Yu. (JSC «R-FARM», Moscow, Russia) — Head of Medical Equipment Service

KNYAZEV Vyacheslav O. (LLC «Tekhbezopasnost'», Moscow, Russia) — Test Engineer

SIDOROV Anton O. (JSC «Corporation «VNIIEМ», Moscow, Russia) — Engineer

The design of the laboratory shaker linear electric drive mechanical part is proposed, its mathematical model is given, and the algorithm for calculating the linear electromagnetic motor's dynamic characteristics is presented. Computer simulation of the drive is carried out using the COMSOL Multiphysics finite element modeling software. The dynamic operation mode of the motor's reciprocating motion is studied, and its dynamic (speed-torque) characteristics are given. The study results have shown that the laboratory shaker drive based on a linear electromagnetic motor has properties commensurable with those of the drive for serially produced shakers. Moreover, in regard of certain indicators, such as the maximum oscillation frequency and peak power consumption, the newly designed drive has better characteristics.

Key words: linear electromagnetic motor, laboratory shaker, pulling force, simulation, dynamic characteristics, finite element method

REFERENCES

1. **Moshkin V.I., Neyman V.Yu, Ugarov G.G.** *Impul'snyye lineynyye elektromagnitnyye dvigateli* (Pulsed linear electromagnetic motors). Kurgan: Kurganskiy gosudarstvennyy universitet, 2010, 220 p.
2. **Patent na izobreneniye US6579002. Broad-range large-load fast-oscillating high-performance reciprocating programmable laboratory shaker/D.Bartick, B. Bartick** (Patent for invention US6579002. Broad-range large-load fast-oscillating high-performance reciprocating programmable laboratory shaker/Bartick D., Bartick B.), 2003, 22 p.
3. **Patent na izobreneniye US5593228. Rotary shaker with flexible strap suspension/M. Tannenbaum** (Patent for invention US5593228. Rotary shaker with flexible strap suspension/M. Tannenbaum). 1997, p. 10.
4. **Ryashentsev N.P., Timoshenko Ye.M, Frolov A.V.** *Teoriya, raschet i konstruirovaniye elektromagnitnykh mashin udarnogo deystviya* (Theory, calculation and design of electromagnetic shock machines). Novosibirsk, Nauka. Sib. otdeleniye, 1970, 260 p.
5. **Gorizonta'l'nyye sheykery firmy «Ekros analitika»** (Horizontal shakers from Ecos Analytics) [Electron. resource] <http://eco-analytika.com/produkcija-ekros/shejker-laboratornyj> (data of apple 18.10.2019).
6. **Starostin A.G.** *Metody proyektirovaniya elektromagnitnykh mekhanizmov postoyannogo toka s zadannymi dinamicheskimi parametrami. Avtoref. dis.... kand. tekhn. nauk* (Design methods for electromagnetic DC mechanisms with specified dynamic parameters. Abstract. dis Cand. tech. sciences). Novocherkassk, Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2006, 234 p.
7. **Fisenko V.G.** *Chislennyye raschety elektromagnitnykh poley v elektricheskikh mashinakh na osnove metoda konechnykh elementov* (Numerical calculations of electromagnetic fields in electric machines based on the finite element method). Moscow, Publ.of MEI, 2002, 44 p.
8. **Lyubchik M.A.** *Silovyye elektromagnitnyye apparatov i ustroystv avtomatiki postoyannogo toka (raschet i elementy proyektirovaniya)* (Power electromagnets of apparatuses and devices for DC automation (calculation and design elements). Moscow, Energiya, 1968, 152 p.
9. **Slivinskaya A.G.** *Elektromagnitnyye i postoyannyye magnity. Uchebnoye posobiye dlya studentov vuzov* (Electromagnets and permanent magnets. Textbook for university students). M.: Energiya, 1972, 248 p.
10. **Mogilevsky G.V.** *Vestnik Elektropromyshlennosti – in Russ. (Bulletin of the Electric Industry)*, 1960, No. 4, pp. 67–70.

[18.11.2019]