

УДК 621.313.282.2

Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем

Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман

Сведения об авторах

Нейман Людмила Андреевна — кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета

Нейман Владимир Юрьевич — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета, e-mail: nv.nstu@ngs.ru

Актуальность исследований обусловлена необходимостью совершенствования и расширения возможностей динамического расчета для решения комплексной задачи анализа и синтеза линейного электромагнитного привода колебательного движения, применяемого в технических системах для возбуждения низкочастотных колебаний и вибраций. В качестве объекта исследований рассматривается одномассовая колебательная система с электромагнитным приводом, получающим питание от синусоидального источника напряжения по однополупериодной схеме выпрямления. Основу динамической модели электропривода составляют дифференциальные уравнения, записанные для электрического равновесия нелинейной цепи и по принципу Даламбера для механической системы с упругими связями. Для реализации модели с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля рассчитаны массивы значений потокосцепления и электромагнитного усилия при варьировании величинами тока и координаты положения якоря, которые затем интерполированы при расчете динамики электромагнитного привода. Особенностью модели является возможность учета взаимосвязанных электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах работы, которые учитывают нелинейность магнитной цепи, потоки рассеяния, свойства упругих связей, трение, внешнее воздействие и потери энергии в электрической и механической подсистемах электромагнитного привода. На примере расчета периодических электромеханических процессов рассмотрены возможности динамической модели для проведения всестороннего анализа рабочих процессов в переходных и квазиустановившихся режимах методами и средствами структурного моделирования в среде Matlab Simulink. Установлено, что точность при динамических расчетах в значительной степени определяется точностью воспроизведения математических аналогов механических характеристик упругих связей и сил трения скольжения. На основании разработанной динамической модели получены рабочие характеристики электропривода и выполнено сравнение результатов компьютерного моделирования с данными физического эксперимента. Полученные результаты по реализации динамической модели и возможности расчета рабочих характеристик можно широко использовать и для других типов машин и устройств с электромагнитным приводом возвратно-поступательного действия.

Ключевые слова: вибрационные процессы и технологии, линейный электромагнитный привод, динамическая модель, электромеханические процессы, методы структурного моделирования, анализ рабочих режимов.

A dynamic analysis of a vibratory electromagnetic drive powered from a half-wave rectifier

L.A. Neyman, V.Yu. Neyman

Information about authors

Neyman Lyudmila A. — Ph.D. (Techn.), associate professor, doctoral student in electrical systems dept., Novosibirsk State Technical University

Neyman Vladimir Yu. — Dr.Sci. (Techn.), professor, head of theoretical foundations of electrical engineering dept., Novosibirsk State Technical University, e-mail: nv.nstu@ngs.ru

The urgency of the present study is stemming from the need to improve and extend the capabilities of dynamic calculation for solving the comprehensive problem of analyzing and synthesizing a vibratory electromagnetic drive applied in engineering systems for exciting low-frequency oscillations and vibrations. A single-mass vibratory system with an electromagnetic drive is considered as a studied subject. The drive is powered from a sine-wave voltage source through a half-wave rectifier. The electric drive's dynamic model is represented by differential equations written for the electrical balance of a non-linear circuit and equations constructed for a mechanical system with spring linkages in accordance with the d'Alambert principle. To implement the model, the arrays of flux linkage and electromagnetic force values were calculated using the finite-element magnetic field modeling techniques with varying the current and the armature position coordinate, which afterwards were interpolated in calculating the electromagnetic drive dynamics. The model's distinctive feature lies in its ability to take into account the interrelated electromechanical processes in transient and steady-state modes of operation, including the magnetic circuit nonlinearity, leakage fluxes, properties of elastic links, friction, external actions, and power loss in the electromagnetic drive's electrical and mechanical subsystems. An example of calculating periodic electromechanical processes is presented as an illustration of the dynamic model capabilities for comprehensively analyzing the working processes in transient and quasi steady-state modes using the structural modeling methods and tools in the Matlab Simulink environment. It is determined that the dynamic analysis accuracy depends to a significant extent on how accurately the mechanical characteristics of elastic links and sliding friction forces are represented by their mathematical models. The electric drive performance characteristics are obtained from the developed dynamical model. The computer simulation results are compared with the physical experiment data. The results obtained from implementing the dynamical model and the possibilities of calculating the performance characteristics can also be widely used for other types of machines and devices fitted with reciprocated electromagnetic drives.

Key words: vibratory processes and technologies, linear electromagnetic drive, dynamic model, electromechanical processes, structural modeling methods, operating modes analysis.

Линейные электромеханические системы с электромагнитным приводом широко применяются в промышленности для обеспечения многих технологических процессов и производств [1—3]. Опыт эксплуатации машин и механизмов с электромагнитным приводом показывает относительно высокую его надежность, повышенный ресурс работы, низкие затраты при производстве и эксплуатации, повышенный ресурс работы и т.д. [4—7]. Методы расчета систем с электромагнитным приводом широко известны и, несмотря на это, продолжают совершенствоваться [8—12]. Существующие подходы точного учета конструктивных параметров электромагнитного привода позволяют в различной степени улучшить его силовые и энергетические показатели, однако расчет нестационарных режимов, зависящих от скорости и частоты, нагрева, свойств упругих связей, объединяющий все подсистемы электропривода, по-прежнему остается в приоритете [13—20]. Одним из перспективных направлений исследований в данной области является создание и совершенствование энергосберегающих электромагнитных машин и механизмов, работающих в резонансном или околорезонансном режиме с частотой до 100 Гц.

Эффективность работы электромагнитного привода колебательного движения существенно зависит от выбора тесно связанных конструктивных соотношений и параметров электрической, магнитной и механической подсистем. Поэтому еще на стадии проектирования электропривода необходимо решать задачу динамического моделирования и анализа его работы с последующей корректировкой связанных параметров, что является решением актуальной задачи.

В качестве объекта исследования рассматривается одномассовая колебательная система с электромагнитным приводом, получающим питание от источника напряжения промышленной частоты по однополупериодной схеме выпрямления.

Целью исследований является проведение всестороннего анализа рабочих режимов динамической модели одномассовой колебательной системы с электромагнитным приводом методами и средствами структурного моделирования.

Эскиз одного из вариантов безударного электромагнитного привода с одномассовой колебательной системой приведен на рис. 1, а.

Электропривод содержит магнитопровод 1, набранный из листов электротехнической стали, закрепленную на магнитопроводе катушку 2 и установленный в воздушном промежутке, образованном полюсными наконечниками, якорь 3, связанный с системой его возврата в исходное положение. Механическая система возврата якоря 3 содержит упругий элемент 4 и жестко связанную с якорем присоединенную массу 5.

Для реализации динамической модели использовался подход, рассмотренный авторами при создании аналогичной (рис. 1, а) модели электропривода, получающим питание от источника напряжения в форме периодических однополярных импульсов прямоугольной формы.

Суть данного подхода состоит в том, что на первом этапе с помощью численного метода определяются электромагнитное усилие и потокосцепление в зависимости от тока и перемещения подвижной системы, которые затем представляются в виде некоторого массива значений опорных точек статических параметров. На втором этапе полученные массивы значений статических параметров используются при расчете динамических характеристик, а в случае удаления расчетных значений от опорных точек интерполируются. Для решения полевой задачи при определении статических параметров применялась стандартная программа конечно-элементного моделирования FEMM [21], для решения динамической части задачи разрабатывался алгоритм расчета, реализованный с помощью аппарата

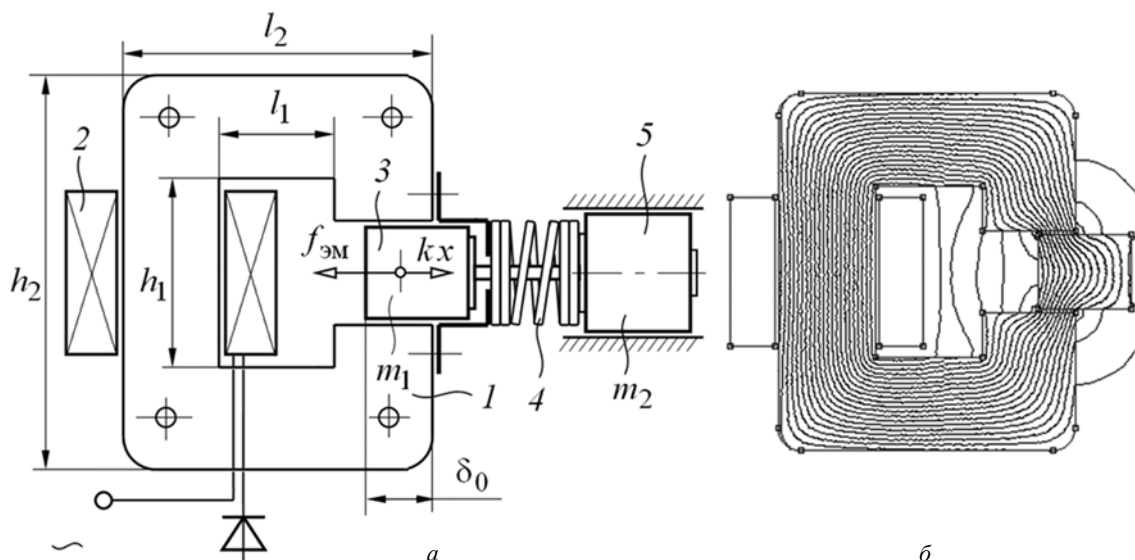


Рис. 1. Электромагнитный привод колебательного движения

структурного моделирования в среде Matlab Simulink [22].

Следует отметить, что точность воспроизведения динамических режимов во многом будет зависеть от точности динамической модели, которая наиболее объективно будет отражать взаимосвязи всех ее подсистем. В результате ранее выполненных исследований было установлено, что использование данного подхода позволяет с минимальным числом ограничений создавать динамические модели, наиболее полно и точно описывающие электромеханические процессы. Установленная совокупность взаимосвязанных электромагнитных и механических величин позволяет достаточно просто производить исследования рабочих режимов, как в установившихся, так и в переходных режимах с большим без ограничений набором входных и выходных переменных, а также их интегральных параметров. Также установлено, что точность при динамических расчетах в существенной степени зависит от точности воспроизведения математических аналогов механических характеристик. В особенности это касается учета процессов, связанных с рассеянием энергии, как за счет собственных демпфирующих свойств отдельных звеньев и упругих связей, зависящих от скорости движения, так и за счет сил сухого трения.

Основу динамической модели электропривода составляют дифференциальные уравнения, записанные для электрического равновесия нелинейной цепи и по принципу Даламбера для механической системы с одной степенью свободы

$$u(t) = ir + \frac{d\psi(i, x)}{dt}; \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = f_{эм}(i, x) - kx - b_0 \frac{dx}{dt} - f_{тр} \operatorname{sgn} \frac{dx}{dt}, \quad (2)$$

где $u(t)$ — напряжение на обмотке катушки; i — ток катушки; $\psi = f(i, x)$ — потокосцепление, зависящее от величины протекающего тока и положения якоря; r — активное сопротивление катушки; $m = m_1 + m_2$ — масса движущихся частей, m_1 — масса якоря; m_2 — присоединенная масса; $f_{эм} = f(i, x)$ — электромагнитная сила, зависящая от величины протекающего тока и положения якоря; k — коэффициент жесткости упругого элемента (пружины); b_0 — коэффициент вязкого трения упругих связей; $f_{тр}$ — сила сухого трения.

Расчет статических параметров $\psi = f(i, x)$ и $f_{эм} = f(i, x)$ для различных положений сердечника якоря осуществлялся через интегральные характеристики поля в режиме параметров блока по средневзвешенному тензору натяжения [21, 23]. В качестве примера на рис. 1, б показана расчетная область модели при плоскопараллельной постановке решения задачи и результаты построения картины линий магнитного потока. Для моделирования динамики электропривода для каждого статического параметра использовался массив значений (13×14) , содержащий сто восемьдесят две опорные точки.

Вариант структурной схемы динамической модели одномассовой колебательной системы с электромагнитным приводом в программе Matlab Simulink представлен на рис. 2. Питание модели осуществляется от однофазного источника напряжения промышленной частоты 50 Гц по однополупериодной схеме выпрямления, реализованной с помощью блока Electrical subsystem.

Учет нелинейных свойств модели реализован в программе с помощью подсистемы Magnetic subsystem. Детализированная структурная схема подсистемы в соответствии с уравнением (1) представлена на рис. 3. Задание функции двух аргументов и интерполяция статических параметров модели

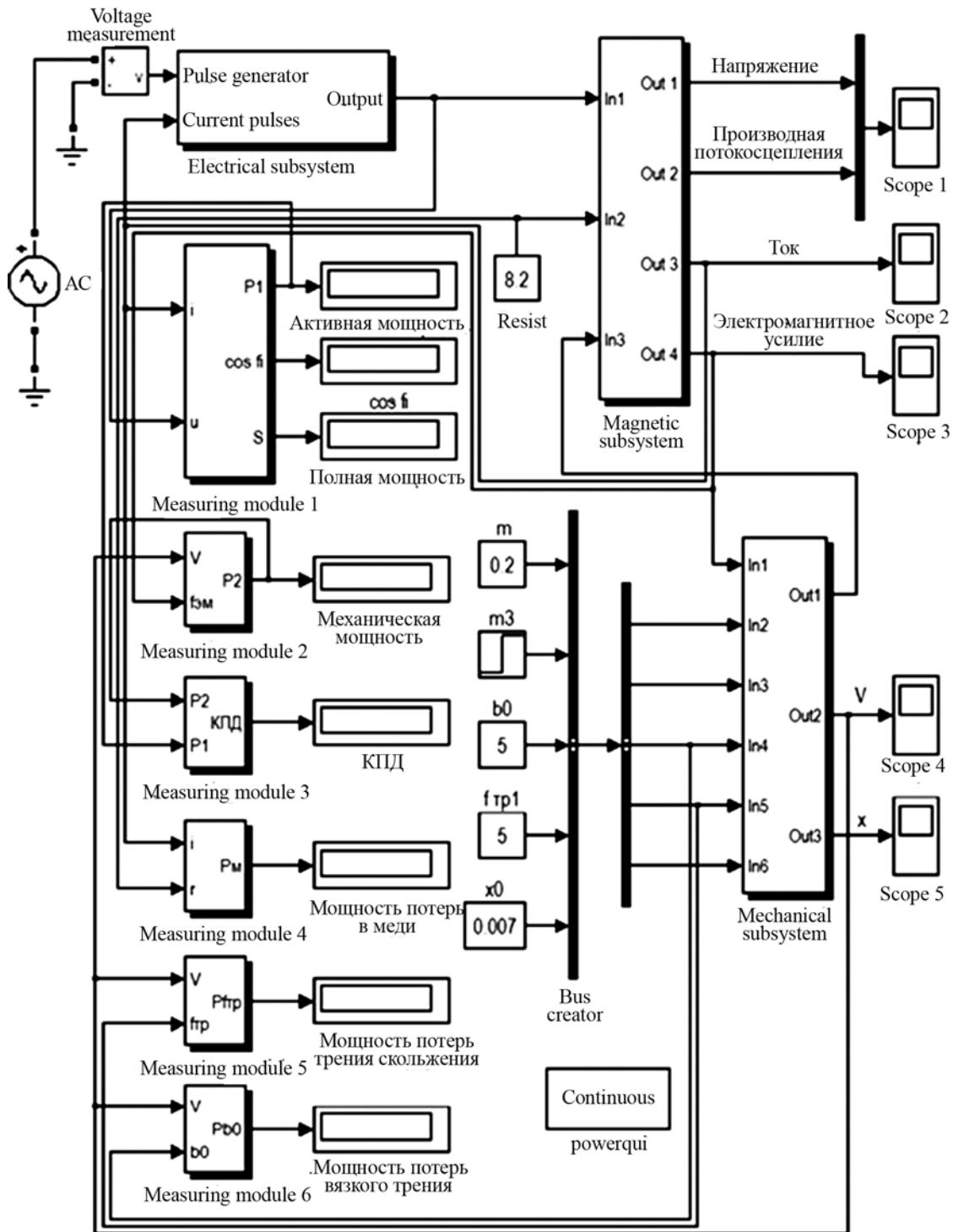


Рис. 2. Структурная схема динамической модели безударного электромагнитного привода колебательного движения

$\psi = f(i, x)$ и $f_{\omega m} = f(i, x)$ в процессе счета осуществляется с помощью блока двумерной таблицы. Учет механических свойств модели реализован с помощью подсистемы Mechanical subsystem (см. рис. 2). В соответствии с уравнением (2) детализированная структурная схема механической подсистемы изображена на рис. 4.

Для оценки эффективности работы электропривода и анализа рабочих режимов динамической мо-

дели использовалась система общепринятых показателей, реализованных в среде Simulink с помощью измерительных модулей Measuring module (1–6) (см. рис. 2).

Модуль Measuring module 1 реализует измерительную систему из трех интегральных показателей: потребляемую электроприводом электрическую активную мощность

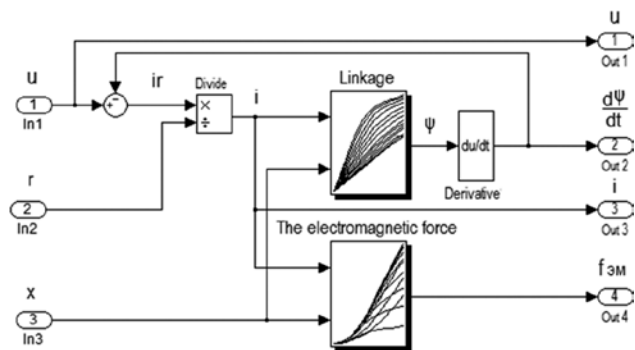


Рис. 3. Детализированная структурная схема учета нелинейных свойств модели Magnetic subsystem

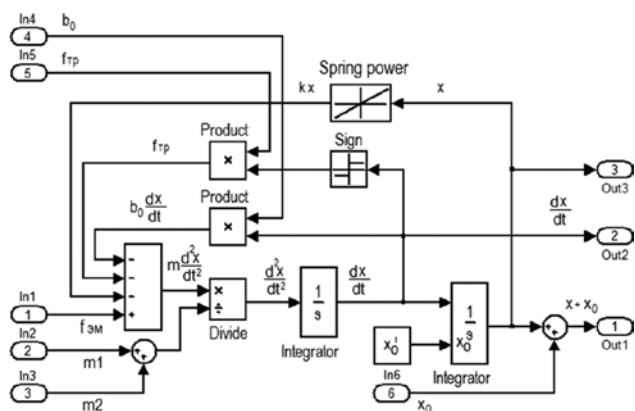


Рис. 4. Детализированная структурная схема учета механических свойств модели Mechanical subsystem

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt;$$

потребляемую от источника полную мощность электропривода

$$S = UI,$$

где $U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$ — действующее значение напряжения;

$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$ — действующее значение тока;

коэффициент мощности

$$\cos\varphi = P_1/S.$$

Модуль Measuring module 2 реализует расчет механической мощности электропривода

$$P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T f_{эм}(t) v(t) dt,$$

где $v(t)$ — скорость перемещения якоря.

Модуль Measuring module 3 рассчитывает относительный КПД

$$\eta = P_1/P_2.$$

Модуль Measuring module 4 выполняет расчет мощности потерь в меди

$$P_m = I^2 r = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) r dt.$$

Модуль Measuring module 5 рассчитывает механические потери мощности от действия силы трения скольжения

$$P_{f_{тр}} = \frac{1}{T} \int_0^T f_{тр} [\text{sgn } v] v(t) dt.$$

Модуль Measuring module 6 рассчитывает механические потери мощности, вызванные вязким трением

$$P_{b_0} = \frac{1}{T} \int_0^T b_0 v^2(t) dt.$$

При необходимости количество измерительных модулей динамической модели (рис. 2) может быть существенно расширено. В первую очередь это будет определяться постановкой задачи исследований.

Анализ рабочих режимов методами и средствами структурного моделирования выполнен при следующих параметрах динамической модели: $U_m = 175$ В; $m = 0,2$ кг; $r_m = 175$ Ом; $k = 1250$ Н/м; $b_0 = 5$ Н·с/м; $f_{тр} = 5$ Н; начальная глубина внедрения якоря $x_0 = 7 \cdot 10^{-3}$ м. Линейные размеры магнитопровода $l_1 = 45 \cdot 10^{-3}$ м; $l_2 = 95 \cdot 10^{-3}$ м; $h_1 = 46 \cdot 10^{-3}$ м; $h_2 = 96 \cdot 10^{-3}$ м; толщина пакета, набранного из листов электротехнической стали, $L = 30 \cdot 10^{-3}$ м. Характеристика намагничивания соответствует свойствам электротехнической стали марки 1212. Частота собственных колебаний механической системы $\omega_0 = 250$ с⁻¹.

Катушка получает питание от однофазного источника синусоидального напряжения частотой 50 Гц по однополупериодной схеме выпрямления. В качестве примера по результатам моделирования на рис. 5 приведена диаграмма, позволяющая наблюдать в переходном режиме изменение во времени перемещение якоря $x(t)$. На диаграмме (рис. 5) момент времени $t = 0,6$ с характеризуется присоединением к якорю массы $m_2 = 0,05$ кг, что естественным образом отразилось на изменении частоты собственных колебаний механической системы и амплитуды колебаний. Исследования-

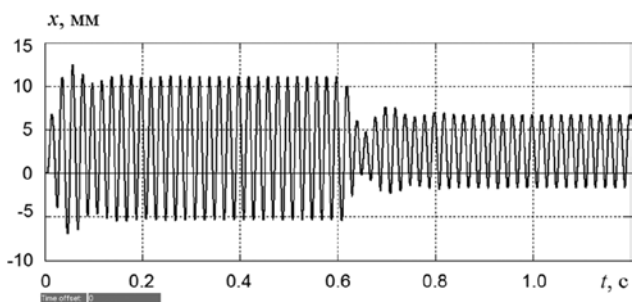


Рис. 5. Временная диаграмма перемещения якоря $x(t)$

ми установлено, что амплитуда колебаний A_m и максимальная скорость колебаний v_{\max} в большой степени зависят от массы подвижных частей механической системы. В меньшей степени этой зависимости подвержены максимальные значения тока в цепи катушки i_{\max} и электромагнитного усилия $f_{\text{эм макс}}$.

На рисунке 6 показаны изменения величин амплитуды и максимальной скорости колебаний якоря электропривода в зависимости от величины коэффициента вязкого трения упругих связей b_0 и силы трения скольжения $f_{\text{тр}}$, возникающих в механической системе вибратора.

Из представленных зависимостей $A_m = f(b_0, f_{\text{тр}})$ и $v_{\max} = f(b_0, f_{\text{тр}})$ видно, что они имеют явно зависимый характер.

Несложно показать (рис. 6, а), что изменение силы трения скольжения в пределах $f_{\text{тр}} = 3 \dots 12$ Н приводит к разнице вычисления амплитуды колебаний A_m , которая в зависимости от величины коэффициента b_0 может составлять от 8 до 45%. Также существенное влияние процессы рассеяния энергии в механической системе оказывают на максимальную скорость колебаний v_{\max} (рис. 6, б). Здесь важно указать, что точность динамической модели в значительной степени зависит от правильности выбора коэффициента вязкости упругих связей и силы трения скольжения.

На рисунке 7 получены рабочие характеристики электропривода для случая, когда частота собственных колебаний механической систем (частота механического резонанса $\omega_0 = 250 \text{ с}^{-1}$) отличается от частоты вынужденных колебаний якоря $\omega = 1,256\omega_0$. В качестве условной полезной мощности P_2 здесь рассматриваются суммарные потери мощности от вязкого трения упругих связей P_{b_0} и трения скольжения $P_{f_{\text{тр}}}$.

С целью верификации динамической модели (рис. 2) выполнялось сравнение рабочих характеристик электропривода, приведенных на рис. 7, а, б, полученных с помощью компьютерного расчета (сплошные линии), с данными физического эксперимента (пунктирные линии).

Экспериментальная установка физической модели электропривода идентична представленному на рис. 1 варианту эскиза. При проведении физического эксперимента регулирование условной полезной мощности осуществлялось изменением силы трения скольжения $f_{\text{тр}}$, возникающего между поверхностями присоединенной массы m_2 и направляющей втулкой.

Используемый при моделировании, коэффициент вязкого трения упругих связей b_0 определялся экспериментально на основании исследования затухающего колебательного процесса механической системы по методике, рассмотренной в [24]. По результатам измерений определялись действующие значения напряжения, тока в катушке и активной мощности P_1 . Затем производился расчет полной мощности и коэффициента мощности. В связи с тем, что потери в магнитопроводе на вихревые токи относительно невелики, то полезная мощность электропривода приближенно определялась как разность потребляемой активной мощности P_1 и мощности омических потерь в катушке $P_m = I^2 r_m$ по выражению:

$$P_1 \approx P_1 - P_m.$$

Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей показывает хорошее соответствие качественных и количественных результатов, что стало возможным только при точном учете аналогов механических характеристик модели. Расхождение расчетных и экс-

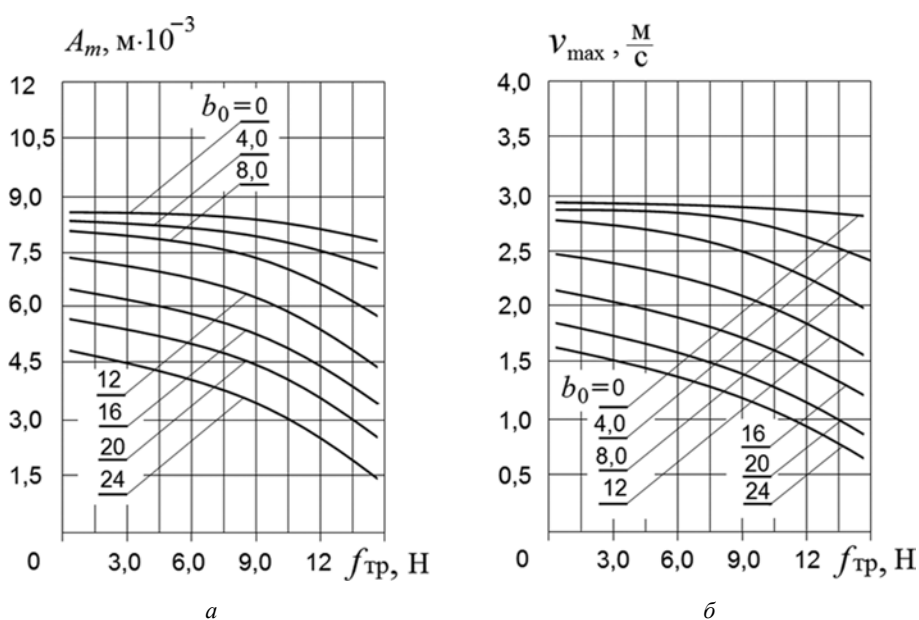


Рис. 6. Графики влияния демпфирующих свойств упругих связей и трения скольжения на амплитуду колебаний A_m (а) и максимальную скорость колебаний v_{\max} (б)

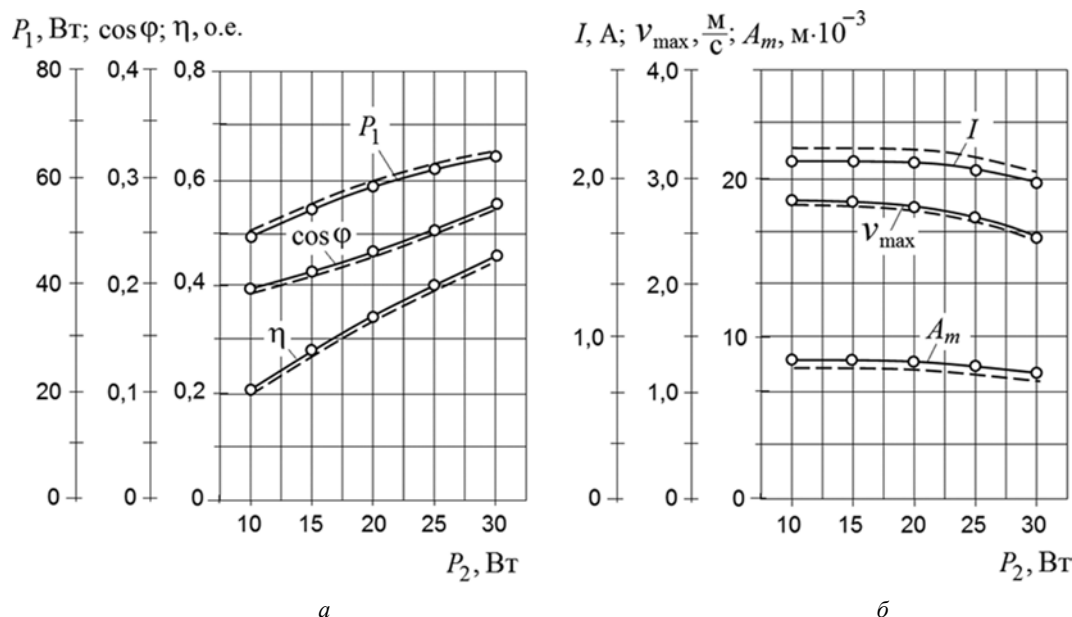


Рис. 7. Рабочие характеристики электропривода:

a — зависимости $P_1 = f(P_2)$, $\cos \varphi = f(P_2)$ и $\eta = f(P_2)$; b — зависимости $I = f(P_2)$, $v_{\max} = f(P_2)$ и $A_m = f(P_2)$

периментальных характеристик модели не превышает погрешности 5—8%, общепринятой для инженерной практики.

Таким образом, на примере расчета периодических электромеханических процессов в одномассовой колебательной системе с электромагнитным приводом, получающим питание от синусоидального источника напряжения по однополупериодной схеме выпрямления, рассмотрены возможности динамического расчета для проведения всестороннего анализа рабочих режимов в переходных и квазиустановившихся процессах методами и средствами структурного моделирования.

Для случая приближенного характера учета аналогов механических характеристик модели или учета только преобладающих сил сопротивления движению решение задачи динамического расчета может существенно отличаться от процессов в реальных физических системах и иметь скорее качественные, чем количественные результаты.

Для повышения точности динамической модели при рассмотрении параметров упругих связей необходимо также учитывать процессы рассеяния энергии, как за счет собственных демпфирующих свойств упругих связей, так и за счет сил сухого трения.

Полученные результаты структурного моделирования и рассмотренные предложения по реализации динамической модели можно широко использовать, как в инженерной практике при проектировании, так и для решения комплексных задач анализа и синтеза безударного электромагнитного привода колебательно-го движения, а также других типов электромагнитных машин и устройств возвратно-поступательного, колебательного и ударного принципов действия.

Литература

1. Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. 2013. № 29. С. 88—90.
2. Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные привода для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия вузов. Серия «Электромеханика». 2012. № 1. С. 72—75.
3. Нейман Л.А. Синхронный электромагнитный механизм для виброударного технологического оборудования // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2014. № 6 (207). С. 17—19.
4. Усанов К.М., Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. Курган: Изд-во Курганского ун-та, 2006.
5. Аксютин В.А. и др. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. №2. С. 220—224.
6. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии // Актуальные проблемы в машиностроении. 2014. № 1. С. 256—259.
7. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий // Электротехника. 2014. № 12. С. 45—49.
8. Мошкин В.И. К расчету усилия удержания интегрированного линейного электромагнитного двигателя // Электротехника. 2013. № 8. С. 60—64.

9. **Кудинов А.К., Певчев В.П.** Составление схем замещения электромагнитных систем // *Электротехника*. 2012. № 3. С. 32—36.
10. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита // *Вестник Иркутского государственного технического ун-та*. 2015. № 2 (97). С. 214—218.
11. **Малинин Л.И., Нейман В.Ю.** Предельные силовые характеристики электромагнитных двигателей постоянного тока // *Электротехника*. 2009. № 12. С. 61—67.
12. **Соловейчик Ю.Г. и др.** Оптимизация геометрии линейных электромагнитных двигателей с использованием конечноэлементного моделирования магнитного поля // *Известия вузов. Серия Электромеханика*. 2005. № 2. С. 24—28.
13. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю., Шабанов А.С.** Упрощенный расчет электромагнитного ударного привода в повторно-кратковременном режиме работы // *Электротехника*. 2014. № 12. С. 50—53.
14. **Мошкин В.И., Егоров А.А., Угаров Г.Г.** Исследование режимов форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях // *Вестник Саратовского государственного технического ун-та*. 2006. Т. 1. № 1. С. 39—44.
15. **Ивашин В.В., Певчев В.П.** Особенности динамики работы и энергетических диаграмм импульсного электромагнитного привода при параллельном и последовательном соединении обмоток возбуждения // *Электротехника*. 2013. № 6. С. 42—46.
16. **Нейман Л.А.** Приближенный расчет циклического электромагнитного привода с учтенным начальным превышением температуры в переходном тепловом процессе нагрева // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. 2014. № 1 (22). С. 113—122.
17. **Нейман Л.А.** Оценка перегрузочной способности ударного электромагнитного привода по средней температуре перегрева в переходных режимах // *Известия вузов. Серия Электромеханика*. 2013. № 6. С. 58—61.
18. **Соловейчик Ю.Г., Персова М.Г., Нейман В.Ю.** Конечноэлементное моделирование электродинамических процессов в линейном электромагнитном двигателе // *Электричество*. 2004. № 10. С. 43—52.
19. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // *Известия Томского политехнического ун-та*. 2015. Т. 326. № 4. С. 154—162.
20. **Бахвалов Ю.А. и др.** Расчет динамики включения электромагнита постоянного тока // *Электротехника*. 1982. № 1. С. 48—51.
21. **Буль О.Б.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM. М.: Изд. центр «Академия», 2005.
22. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008.
23. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.** Расчет показателя экономичности силового электромагнита постоянного тока с помощью моделирования магнитного поля // *Транспорт: наука, техника, управление*. 2008. № 6. С. 21—24.
24. **Нейман Л.А., Щуров Н.И.** К учету аналогов механических характеристик модели электромагнитного привода колебательного движения // *Фундаментальные проблемы науки*. 2015. С. 43—51.

Статья поступила в редакцию 15.10.2015