

УДК 621.313.33

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММЫ «ELCUT»

Татевосян А.С., Татевосян А.А., Захарова Н.В., Шелковников С.В.

ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск, e-mail: ast_51@mail.ru, karo1@mail.ru, nvzdm@mail.ru, serj85_85@inbox.ru

Предложено решение задачи оптимального управления электромагнитным приводом вибрационного движения колебательной механической системы на заданный закон движения якоря, состоящего из импульсного источника питания, электромагнитного двигателя и компрессора. Задача оптимального управления формулируется как задача установления взаимосвязи между обобщенными параметрами привода, при которой обеспечивается максимально возможный КПД электромагнитного двигателя. При решении задачи оптимального управления получены в аналитическом виде временные зависимости оптимальной формы импульсов напряжения источника питания, тока и напряжений на участках эквивалентной схемы замещения электромагнитного двигателя, в которой учитываются магнитные потоки рассеяния, потери в катушке и стали. На основе решения задачи оптимального управления предложена методика и алгоритм проектирования оптимальных конструкций электромагнитных двигателей с максимально возможным КПД. В разработанном алгоритме определение обобщенных параметров электромагнитного двигателя базируется на решении задачи линейной магнитостатики с применением комплекса программ «ELCUT 6.0» (профессиональная версия). Для оптимальной конструкции электромагнитного двигателя проведен анализ процессов энергопреобразования с учетом особенностей рабочего процесса.

Ключевые слова: задача оптимального управления, закон движения якоря, обобщенные параметры электромагнитного привода, оптимальная форма импульса источника питания на катушке, анализ процессов энергопреобразования, максимально возможный КПД электромагнитного двигателя

THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF OPTIMUM CONTROL OF THE ELECTROMAGNETIC DRIVE OF THE OSCILLATING MOTION ON THE BASIS OF APPLICATION OF THE «ELCUT» PROGRAM

Tatevosyan A.S., Tatevosyan A.A., Zaharova N.V., Selkovnikov S.V.

Federal state budgetary educational institution of higher education «Omsk state technical university»,
Omsk, e-mail: ast_51@mail.ru, karo1@mail.ru, nvzdm@mail.ru, serj85_85@inbox.ru

The solution of a problem of optimum control of the electromagnetic drive of the vibration movement of oscillatory mechanical system on the set law of the movement of the anchor consisting of the pulse power supply, the electromagnetic engine and the compressor is proposed. The problem of optimum control is formulated as a problem of establishment of interrelation between the generalized drive parameters, at which the greatest possible efficiency of the electromagnetic engine is provided. At the solution of a problem of optimum control temporary dependences of an optimum form of impulses of tension of the power supply, current and tension on sites of an equivalent equivalent circuit of the electromagnetic engine are received in an analytical look, in which magnetic fluxes of dispersion, loss in the coil and steel are considered. On the basis of the solution of a problem of optimum control the technique and algorithm of design of optimum designs of electromagnetic engines with the greatest possible efficiency is offered. In the developed algorithm determination of the generalized parameters of the electromagnetic engine is based on the solution of a problem of linear magnetostatics with application of a complex of the programs «ELCUT 6.0» (the professional version). For an optimum design of the electromagnetic engine the analysis of processes of power transformation taking into account features of working process is carried out.

Keywords: problem of optimum control, the law of the movement of an anchor, the generalized parameters of the electromagnetic drive, optimum form of an impulse of the power supply on the coil, the analysis of processes of power transformation, the greatest possible efficiency of the electromagnetic engine

Электромагнитный привод колебательного движения используется в строительстве, машиностроении, горной технике, медицине и других отраслях промышленности. По существу, он представляет собой силовую электромагнитную импульсную систему, в которой генератором импульсов силы служит линейный электромагнитный двигатель. В конструкции двигателя содержится одно подвижное звено – якорь, совершающий возвратно-поступательное движение под действием электромагнитной

тяговой силы и упругой силы сжимаемой пружины. В отличие от электрических машин вращательного движения линейный электромагнитный двигатель выполняется не в виде самостоятельного изделия, а комплектуется с рабочей машиной (например, компрессором) как единое устройство определенного функционального назначения.

Исследования по разработке и созданию электромагнитного привода колебательного движения проводятся давно [1, 2], однако на современном уровне не все проблемы

решены. Особенно актуальна проблема оптимального проектирования, связанная с поиском оптимальных режимов энергопреобразования и оптимальных конструкций линейных электромагнитных двигателей, учитывающих особенности рабочего процесса.

Развитие современных информационных технологий по исследованию электромагнитных полей с помощью комплекса программ «ELCUT» [3] позволяет существенным образом изменить состояние вопроса по совершенствованию методики оптимального проектирования электромагнитных двигателей и количественному анализу происходящих в них процессов энергопреобразования. Для достижения поставленной цели в данной статье использовано решение задачи оптимального управления электромагнитным приводом колебательного движения [4], полученное на приближенных моделях магнитного поля электромагнитного двигателя и их расчета аналитическими методами, каким является метод вероятных путей магнитного потока [5].

Задача оптимального управления электромагнитным приводом может быть рассмотрена как задача установления взаимосвязи между обобщенными параметрами импульсного источника питания (U_d , α , ωt_k , f), линейного электромагнитного двигателя (a , m , ρ) и рабочей машины (P_m , $2x_m$), удовлетворяющей критерию оптимальности – максимуму КПД электро-механического преобразователя на заданный во времени закон движения якоря. Обобщенными параметрами импульсного источника питания являются U_d – максимальное значение напряжения на катушке, α – угол укорочения импульса напряжения, ωt_k – фазовый угол сдвига между квадратом потокосцепления $\Psi^2(t)$ и законом движения якоря $x(t)$ во времени; f – частота питающего напряжения; a – среднее значение инверсной индуктивности (величина обратная индуктивности) катушки на середине хода якоря; m – глубина модуляции инверсной индуктивности катушки; $\rho = Ra/\omega$ – добротность двигателя; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; R – активное сопротивление, учитывающее потери в катушке и стальном сердечнике; P_m – среднее значение мощности, передаваемой в механическую подсистему, $2x_m$ – ход поршня компрессора.

При решении задачи оптимального управления зависимость инверсной индуктивности катушки двигателя от хода якоря электромагнитного двигателя представлена уравнением прямой линии

$$\Gamma(x) = L^{-1}(x) = a \left[1 + m \left(1 - \frac{x(t)}{x_m} \right) \right],$$

где $0 \leq x(t) \leq 2 \cdot x_m$ – граничные значения хода якоря.

Такое допущение правомерно при выполнении инженерных расчетов ненасыщенных магнитных систем, в линейном электромагнитном двигателе оно справедливо на значительной части хода якоря, вследствие наличия большой величины рабочего зазора. Это обстоятельство позволяет получить аналитическое решение задачи оптимального управления, соответствующее максимально возможному КПД электромагнитного привода колебательного движения при заданном во времени законе движения якоря

$$\eta_{\max} = [1 + P_r^*(\omega t_k)]^{-1},$$

где $P_r^*(\omega t_k) = \frac{P_r(\omega t_k)}{P_m(\omega t_k)}$ – минимально возможные относительные потери в электромагнитном двигателе, $P_r(\omega t_k)$ – мощность тепловых потерь, $P_m(\omega t_k)$ – среднее значение мощности, передаваемой в механическую подсистему, ωt_k – корень уравнения, определяемый условием поиска экстремума (минимума) функции $\frac{dP_r^*(\omega t_k)}{d(\omega t_k)} = 0$.

Решение задачи управления для тока в катушке имеет вид:

$$i(t) = \sqrt{2} \psi_k \cdot \Gamma(x) \cdot \cos \frac{k\omega(t-t_k)}{2},$$

Напряжения на участках эквивалентной схемы замещения электромагнитного двигателя, состоящей из последовательного соединения активного и индуктивного сопротивлений

$$u_R(t) = \sqrt{2} \cdot \psi_k \cdot R \cdot \Gamma(x) \cdot \cos \frac{k\omega(t-t_k)}{2},$$

$$u_L(t) = - \frac{k\omega \cdot \psi_k \sin \frac{k\omega(t-t_k)}{2}}{\sqrt{2}}.$$

Оптимальная форма импульсов напряжения источника питания определяется из уравнения электрического равновесия

$$u(t) = u_L(t) + u_R(t).$$

Временная зависимость потокосцепления катушки

$$\psi(t) = \sqrt{2} \psi_k \cdot \cos \frac{k\omega(t-t_k)}{2},$$

где $\psi_k = \sqrt{2} \cdot U_d / (k\omega)$ – действующее значение потокосцепления, $k = \frac{\pi}{\pi - \alpha}$ – коэффициент скважности импульсов.

Приведенные математические выражения для тока, напряжений на участках схемы замещения линейного электромагнитного двигателя, оптимальной формы импульса источника питания и потокосцепления катушки справедливы на интервале времени $-\pi + \alpha + \omega t_k \leq \omega t \leq \pi - \alpha + \omega t_k$, вне этого интервала они обращаются в нуль.

В решении задачи оптимального управления заданный закон движения якоря в установившемся режиме есть несинусоидальная периодическая функция во времени. Если она задается табличным способом,

то ее дальнейшее использование требует аппроксимации рядом Фурье

$$x(t) = x_0 + \sum_{v=1}^N [x_{vs} \cdot \sin v\omega t + x_{vc} \cos v\omega t].$$

При синусоидальном законе движения якоря $x(t) = x_m(1 + \sin \omega t)$ среднее значение мощности, поступающей в механическую подсистему, значительно упрощается

$$P_m(\omega t_k) = \frac{\omega}{2\pi} am \psi_k^2 \frac{k^2}{k^2 - 1} \cos(\omega t_k) \sin \alpha.$$

Среднее значение мощности тепловых потерь при этом будет

$$P_r(\omega t_k) = R \psi_k^2 a^2 m \left[\left(\frac{1}{m} + \frac{m}{2} \right) \frac{1}{k} + \frac{k^2}{\pi} \frac{2 \sin \omega t_k \sin \alpha}{(1 - k^2)} - \frac{k^2}{4\pi} \cdot \frac{m(\cos 2\omega t_k \sin 2\alpha)}{(4 - k^2)} \right].$$

Минимально возможные относительные потери определяются отношением средних значений мощностей

$$P_r^*(\omega t_k) = \frac{P_r(\omega t_k)}{P_m(\omega t_k)} = \rho \cdot \left[\frac{\pi \left(\frac{2}{m} + m \right) (k^2 - 1)}{k^3 \cos(\omega t_k) \sin \alpha} - 4 \operatorname{tg}(\omega t_k) - \frac{m(k^2 - 1) \cos(2\omega t_k) \cos \alpha}{(4 - k^2) \cos(\omega t_k)} \right].$$

Решение задачи оптимального управления определяет фазовый угол сдвига между квадратом потокосцепления $\Psi^2(t)$ и синусоидальным во времени законом движения якоря $x(t)$ как корень тригонометрического уравнения

$$\sin^3(\omega t_k) - \left[\frac{\pi(4 - k^2)}{k^3 \sin(2\alpha)} \left(\frac{2}{m^2} + 1 \right) + \frac{3}{2} \right] \sin(\omega t_k) + \frac{2}{m} \frac{(4 - k^2)}{(k^2 - 1) \cos \alpha} = 0.$$

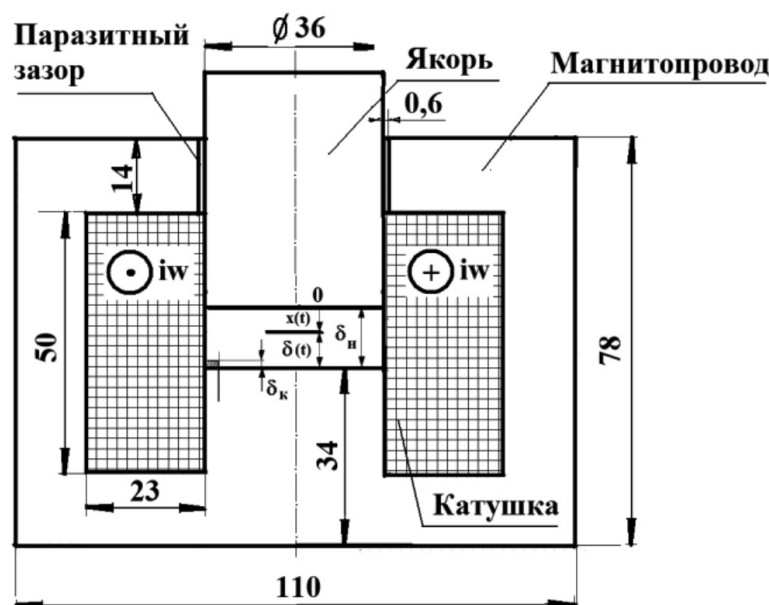


Рис. 1. Оптимальная конструкция линейного электромагнитного двигателя

Решение задачи оптимального управления положено в основу алгоритма проектирования линейных электромагнитных двигателей, имеющих максимально возможный КПД при удовлетворении условия минимума массы активных материалов, необходимых для его изготовления. Предложенный алгоритм реализован в программе «Анализ» на языке визуального программирования Borland Delphi 7.0 в среде Windows XP.

Демонстрацию основных возможностей программы «Анализ» рассмотрим на конкретном примере, в котором на предварительном этапе с помощью программы выполнен расчет основных геометрических размеров магнитной системы и обмоточных данных оптимальной конструкции

линейного электромагнитного двигателя с использованием упрощенной модели магнитного поля, рассчитанной методом вероятных путей магнитного потока. На рис. 1 приведена оптимальная конструкция линейного электромагнитного двигателя, соответствующая техническому заданию, а именно: среднее значение мощности, поступающей в механическую подсистему $P_m = 180$ Вт, частота следования импульсов напряжения $f = 50$ Гц, синусоидальный во времени закон движения якоря $x(t) = 5 \cdot 10^{-3}(1 + \sin 314t)$ м, коэффициент заполнения $k_z = 0,6$, плотность тока в катушке $J = 6 \cdot 10^6$ А/м², максимальное значение напряжения на катушке $U_d = 27$ В, угол укорочения импульса $\alpha = 30$ град.

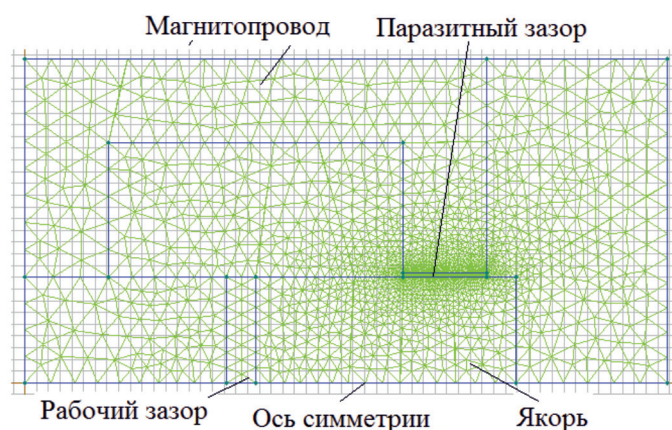


Рис. 2. Расчетная область с сеткой конечных элементов в пакете «ELCUT»

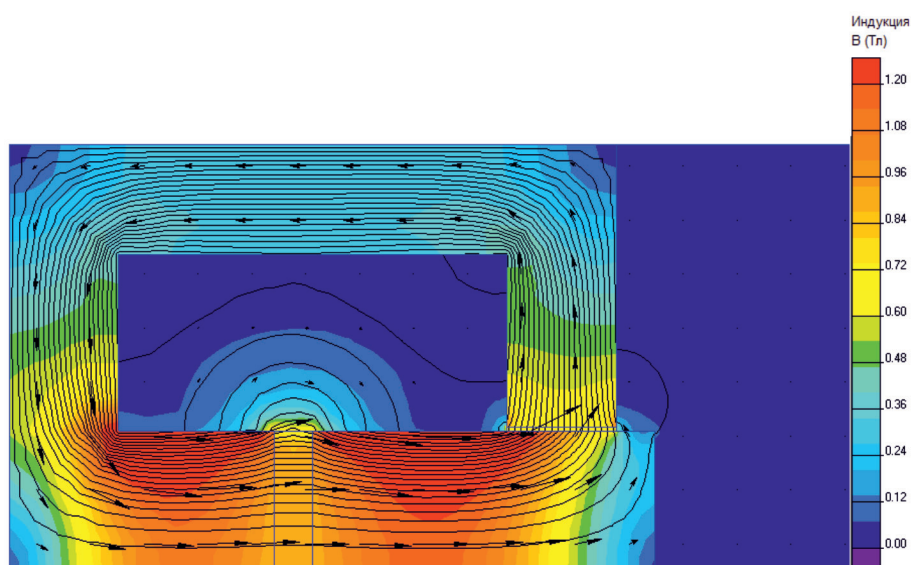


Рис. 3. Картина магнитного поля оптимальной геометрии электромагнитного двигателя на середине хода якоря $x_m = 5$ мм. Полное число ампер витков Iw 3951 А

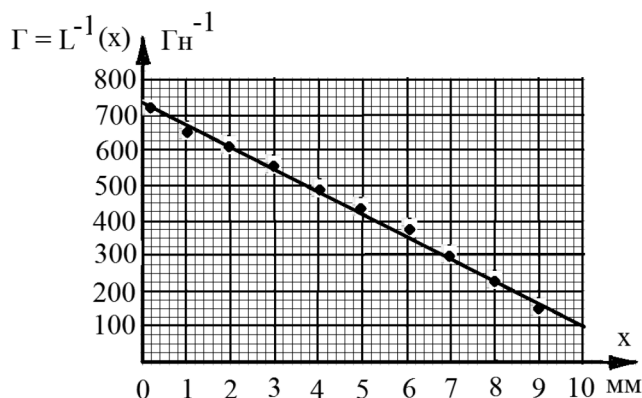


Рис. 4. Зависимость инверсной индуктивности катушки от хода якоря на основе расчета магнитного поля в пакете «ELCUT»

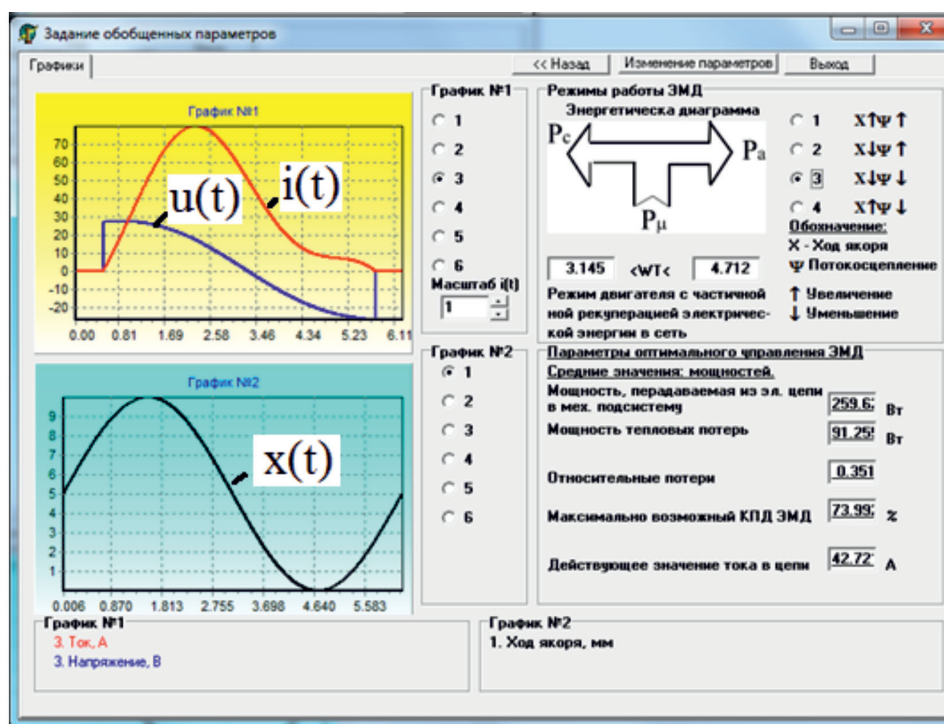


Рис. 5. Результаты исследований рабочего режима электромагнитного в главном окне программы «Анализ»

Для этой конструкции двигателя расчетом были найдены число витков катушки $w = 85$, активное сопротивление $R = 0,045$ Ом, среднее значение инверсной индуктивности на середине хода якоря $a = 479,2$ Гн⁻¹, глубина модуляции инверсной индуктивности $m = 0,41$, добротность двигателя $\rho = 0,0686$, максимально возможный КПД электромагнитного двигателя $\eta_{\max} = 62,5\%$, масса двигателя $m_{\text{дв}} = 2,78$ кг, масса медного провода $m_{\text{пр}} = 1,14$ кг.

На поверочном этапе уточняются обобщенные параметры линейного электромагнитного двигателя с использованием численного расчета осесимметричной модели магнитного поля для различных фиксированных значений рабочего зазора (линейная магнитостатика) с помощью комплекса программ «ELCUT 6.0» (профессиональная версия). Результаты расчета приведены на рис. 3 и 4.

Задавая в модели линейного электромагнитного двигателя различные значения ра-

бочего зазора в пределах хода якоря, можно по рассчитанным картинам магнитных полей с помощью «Мастера индуктивности» определить зависимость инверсной индуктивности катушки от хода якоря. На графике (рис. 4) расчетные значения инверсной индуктивности катушки показаны точками, между которыми проходит аппроксимирующая прямая.

По результатам расчета среднее значение инверсной индуктивности катушки на середине хода якоря $a = 407 \text{ Гн}^{-1}$, а глубина модуляции инверсной индуктивности оказывается существенно выше прежней $m = 0,71$. Ввод полученных значений в диалоговое окно программы «Анализ» (рис. 5) и последующий пуск программы позволяет более точно определить энергетические показатели работы электромагнитного привода колебательного движения, а также проанализировать с помощью энергетических диаграмм, происходящие в нем процессы энергопреобразования.

Выводы

1. Предложена методика оптимального проектирования электромагнитного привода колебательного движения на заданный во времени закон движения якоря, основанная на установлении взаимосвязи между обобщенными параметрами привода, обеспечивающая максимально возможный его КПД в установившемся режиме работы.

2. На стадии предварительных расчетов оптимальной конструкции электро-

магнитного двигателя использование упрощенной модели магнитного поля и ее расчет методом вероятных путей магнитного потока позволяет существенно сократить объем вычислений и затраты времени на проектирование. Однако, при выполнении поверочных расчетов для надежности полученных результатов необходимо выполнить численный расчет картин магнитного поля для различных фиксированных значений рабочего зазора с использованием комплекса программ «ELCUT 6.0» (профессиональная версия) с возможностью последующей корректировки значений обобщенных параметров электромагнитного двигателя и уточнения геометрии его магнитной системы и обмоточных данных.

Список литературы

1. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. – М.: Энергия, 1974. – 392 с.
2. Ряшенцев Н.П. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин / Н.П. Ряшенцев, А.Н. Мирошников. – Новосибирск: Наука, 1987. – 160 с.
3. Программа «ELCUT». Руководство пользователя. – ООО «Тор», Санкт-Петербург, 2012. – 356 с. URL: http://www.elcut.ru/free_doc_r.htm.
4. Ковалев Ю.З., Татевосян А.А., Татевосян А.С. Исследование рабочих процессов энергопреобразования в электромагнитном приводе на заданный закон движения якоря при обеспечении максимума КПД // Омский научный вестник. – 2002. – № 18. – С. 78–83.
5. Буль Б.К., Буль О.Б., Азанов В.А., Шоффа В.Н. Электромеханические аппараты автоматики. Электрические и электронные аппараты: Учебник для вузов / Под ред. Ю.К. Розанова. – М.: Высшая школа, 1988. – 303 с.