УДК 621.318.3

А. С. ТАТЕВОСЯН
А. А. ТАТЕВОСЯН
Н. В. ЗАХАРОВА

Омский государственный
технический университет

СИНТЕЗ МНОГОКОНТУРНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С МАССИВНЫМ ЯКОРЕМ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ ELCUT

В статье дается решение цепно-полевой задачи расчета нестационарного магнитного поля в линейном электромагнитном двигателе с массивным якорем, возникающего вследствие переходного процесса при подключении его обмотки к источнику постоянного напряжения при фиксированной величине рабочего зазора, изменяющейся в пределах хода якоря. Линейные электромагнитные двигатели с массивным якорем являются неотъемлемой частью силовых электромагнитных импульсных систем, получивших широкое применение во многих областях техники, где существует необходимость генерации силовых ударных нагрузок заданной частоты, воздействующих на исполнительные органы технологических машин или обрабатываемую среду. При расчете нестационарного магнитного поля в пакете ELCUT 6.0 (профессиональная версия) учитывается осевая симметрия магнитной системы электромагнитного двигателя, вихревые токи в стали, возникающие в массивном якоре. Исследование переходного процесса в электрической цепи обмотки на основе численного расчета нестационарного магнитного поля в пакете ELCUT направлено на получение временной зависимости тока обмотки, выделения из нее свободной составляющей и разложения затухающей кривой в экспоненциальный ряд. По операторному сопротивлению цепи устанавливаются уравнения связи между амплитудными значениями и коэффициентами затухания экспонент, участвующих в разложении кривой тока обмотки. По ним определяются параметры многоконтурной схемы замещения электромагнитного двигателя с массивным якорем.

Ключевые слова: электромагнитный двигатель, массивный якорь, переходный процесс, многоконтурная схема замещения, рабочий зазор, ход якоря.

Линейные электромагнитные двигатели (ЛЭМД) являются составной частью силовых электромагнитных импульсных систем (СЭМИС), генерирующих импульсы силы определенной частоты и интенсивности, воздействующей на исполнительный орган машины или на обрабатываемую среду. Совпадение параметров движения исполнительного и рабочего органов обеспечило широкое применение СЭМИС в различных областях техники [1–4]. Якорь в ЛЭМД может быть одновременно рабочим органом машины: бойком в молотах, поршнем в компрессорах и насосах, пуансоном в прессах, вытеснителем в газовых криогенных машинах. Создание силовых, зачастую ударных нагрузок исполнительных органов технологических машин ведет к необходимости использования в конструкциях ЛЭМД массивного якоря, изготовленного из нешихтованного магнитопровода, предотвращающего его разрушение в процессе эксплуатации [5–8].

Особенности импульсного питания обмотки ЛЭМД, сложная геометрия элементов магнитной системы при наличии в ней переменной величины рабочего зазора, обусловленной движением якоря под действием электромагнитных сил и упругих сил сжимаемой пружины, вихревые токи в массивном якоре создают большие математические трудности для определения его динамических характеристик [4, 6, 7, 9].

Несмотря на то что работы по созданию оптимальных СЭМИС и развитию их теории ведутся давно [1–5], проблема поиска решения задачи динамики ЛЭМД с массивным якорем остается до сих пор актуальной. Появление на потребительском рынке новых пакетов прикладных программ исследования динамики сложных систем (пакеты ELCUT, Matlab/Simulink и др.) позволяет надеяться, что построенная полная математическая модель динамики ЛЭМД с массивным якорем будет успешно

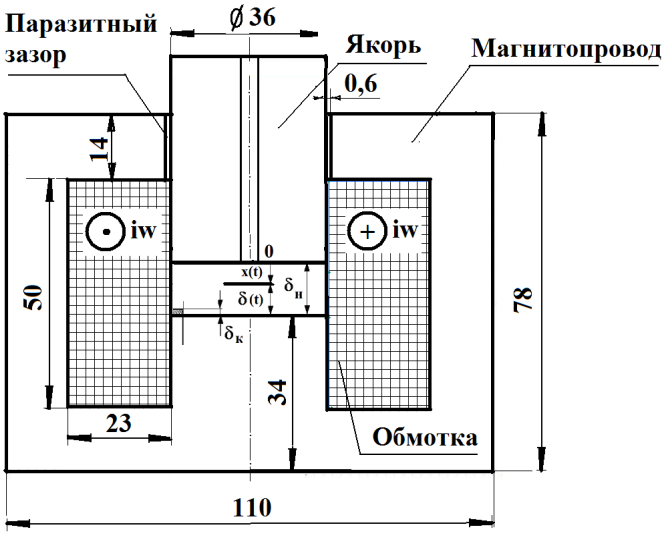


Рис. 1. Геометрия магнитной системы ЛЭМД втяжного типа:
прямоугольный магнитопровод собран из тонких листов электротехнической стали;
якорь — цельнометаллический изготовлен из стали той же марки;
$\delta_н \le x(t) \le \delta_к$ — ход якоря,
$\delta_н$ и $\delta_к$ — соответственно начальный и конечный рабочий зазор;
δ_0 — паразитный зазор



Рис. 2. Присоединенная электрическая цепь, содержащая пассивные элементы, источник постоянного напряжения и массивный якорь

решена. Однако в настоящее время при построении модели приходится использовать упрощающие задачу допущения, при которых ее решение распадается на несколько этапов [6–8].

Вариант синтеза многоконтурной схемы замещения ЛЭМД с массивным якорем с последующим составлением на ее основе системы уравнений динамики СЭМИС и применения численных методов анализа для определения ее динамических характеристик представляется целесообразным [10–13].

В данной статье предлагается методика определения параметров многоконтурной схемы замещения ЛЭМД с массивным якорем, основанная на решении задачи нестационарного магнитного поля в комплексе программ ELCUT 6.0 (профессиональная версия) [14] при фиксированной величине рабочего зазора, изменяющегося в пределах хода якоря.

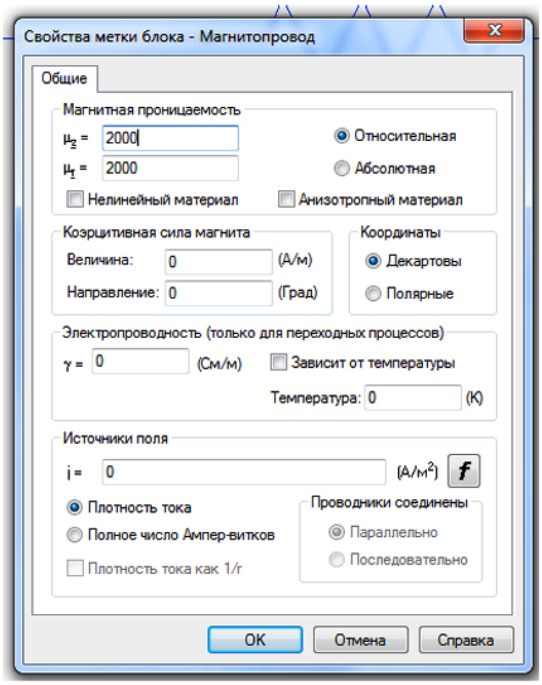
Решение задачи рассмотрим на примере магнитной системы ЛЭМД с массивным якорем, эскиз которой показан на рис. 1.

Расчет нестационарного магнитного поля ЛЭМД с массивным якорем в комплексе программ ELCUT связан с необходимостью определения временной зависимости тока переходного процесса при подключении обмотки к источнику постоянного напряжения с заданием фиксированной величины рабочего зазора, изменяющейся в пределах хода якоря.

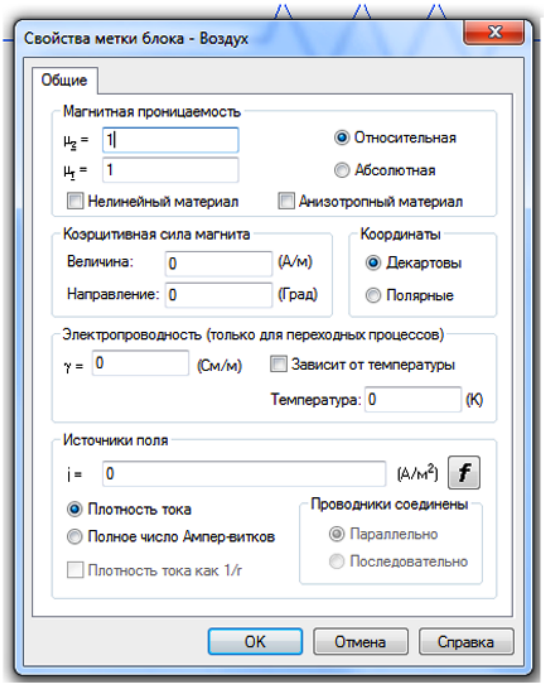
Наличие в конструкции магнитной системы ЛЭМД обмотки и якоря, выполненных в форме цилиндров, позволяет в классе модели Elcut задать магнитное поле осесимметричным. Насыщение стали при расчете нестационарного магнитного поля не учитывается.

В данной конструкции магнитной системы ЛЭМД (рис.1) число витков обмотки $w = 500$. Активное сопротивление обмотки $R = 4{,}5$ Ом. Напряжение источника питания $U = 8$ В. Физические свойства используемых сред относительные магнитные проницаемости стали $\mu'_c = 2000$ и воздуха $\mu'_в = 1$, электропроводность стали якоря $\gamma_c = 8 \cdot 10^6$ Ом·м, электропроводность медного обмоточного провода $\gamma_м = 57 \cdot 10^6$ Ом·м. Паразитный зазор $\delta_0 = 1$ мм. Фиксированная величина рабочего зазора δ в модели изменяется в пределах хода якоря $0 \le x(t) \le 12$ мм. Значения рабочего зазора δ в расчете заданы 2, 6 и 12 мм.

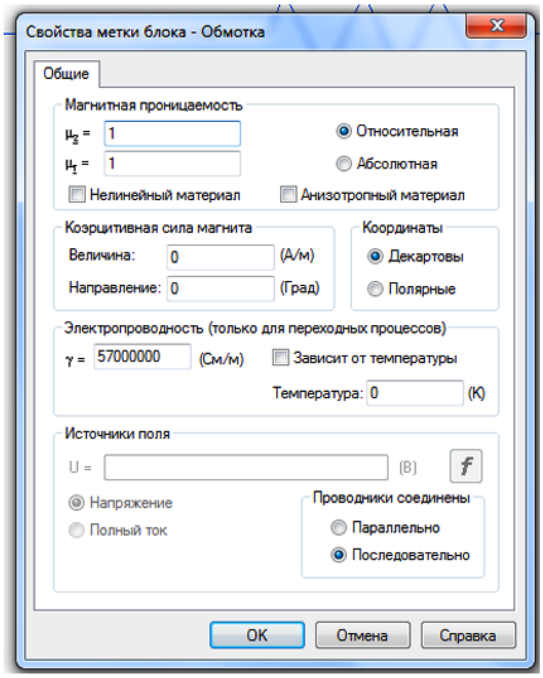
Нестационарное магнитное поле ЛЭМД моделируется в пакете ELCUT совместно с присоединенной электрической цепью, показанной на рис. 2.



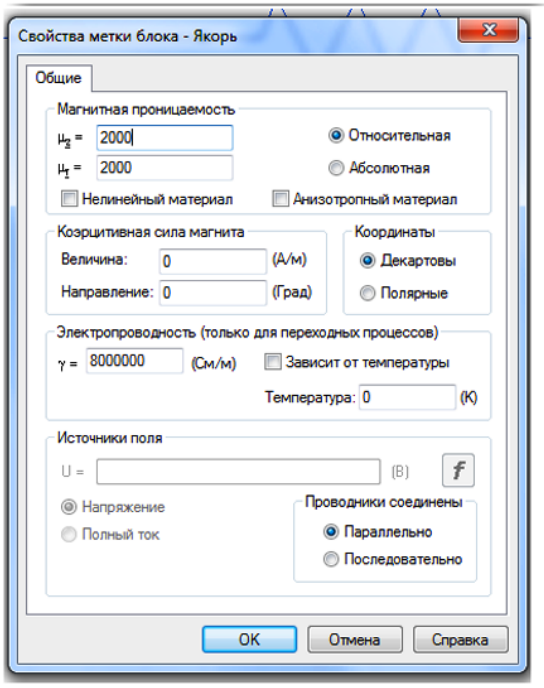
а



б



в



г

Рис. 3. Физические свойства выделенных блоков в модели ЛЭМД
а — магнитопровод, б — воздух, в — обмотка, г — якорь

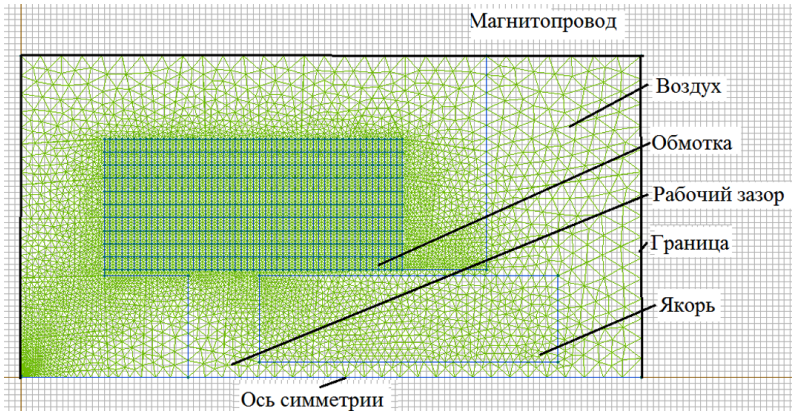


Рис. 4. Расчетная область с сеткой конечных элементов в пакете ELCUT

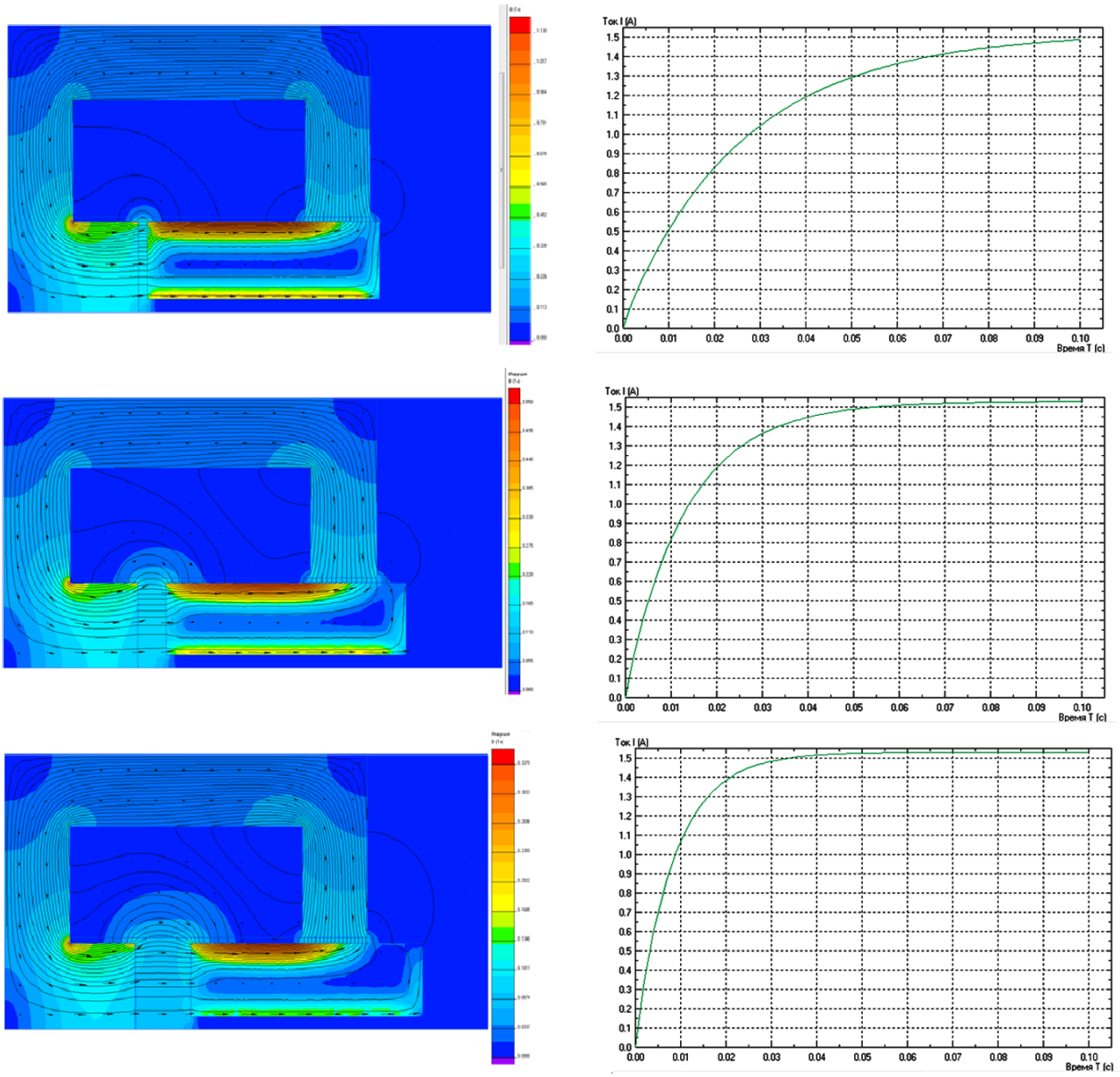


Рис. 5. Цветные картины нестационарного магнитного поля ЛЭМД распределения магнитной индукции по окончании времени интегрирования (слева) и временных зависимостей тока в обмотке ЛЭМД (справа) при переходном процессе для различных фиксированных значений рабочего зазора (сверху вниз) соответственно 2, 4 и 6 мм

Обмотка ЛЭМД моделируется в пакете ELCUT, состоящая из 500 соединенных последовательно проводников (рис. 3).

Расчетная область модели ЛЭМД в задаче ELCUT ограничена прямоугольником площадью 104×54 мм^2 и покрывается автоматически сеткой конечных элементов, содержащей 8886 узлов (рис. 4).

На границе расчетной области принимается условие, что функция магнитного потока $\psi = r \cdot A_0 = 0$ Вб.

Временные параметры модели в задаче ELCUT заданы при условии, что максимальное время интегрирования составляет 0,1 с, шаг интегрирования 0,001 с, запоминание решения задачи каждые 0,001 с.

Результаты расчета нестационарного магнитного поля ЛЭМД при переходном процессе включения обмотки ЛЭМД на постоянное напряжение при рабочих зазорах 2, 6 и 12 мм показаны на рис. 5.

Обработка текстовых файлов временных зависимостей тока в обмотке при переходном процессе для различных значений рабочего зазора позволила выделить из общего решения свободную составляющую тока, которую в общем виде можно представить в виде экспоненциального ряда

$$i_{cB}(t) \approx \sum_{k=1}^{n} I_k e^{-\lambda_k \cdot t},$$

где $I_k, \lambda_k, k = 1, 2, \ldots n$ определяются последовательным выделением из исходной временной зависимости свободной составляющей тока обмотки экспоненты с большим значением λ_k на основе выполнения операции логарифмирования и аппроксимации функции на участке уравнением прямой линии по методу наименьших квадратов, так что функционал

$$F = \sum_{j=1}^{N} \left[i(t_j) - \sum_{k=1}^{n} I_k e^{-\lambda_k \cdot t_j} \right] \leq \varepsilon$$

принимает наименьшее значение, лежащее в пределах допустимой ошибки ε.

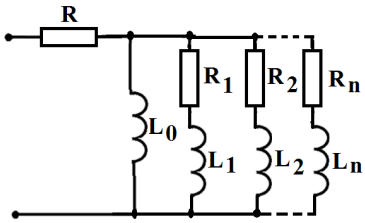


Рис. 6. Многоконтурная схема замещения ЛЭМД с массивным якорем

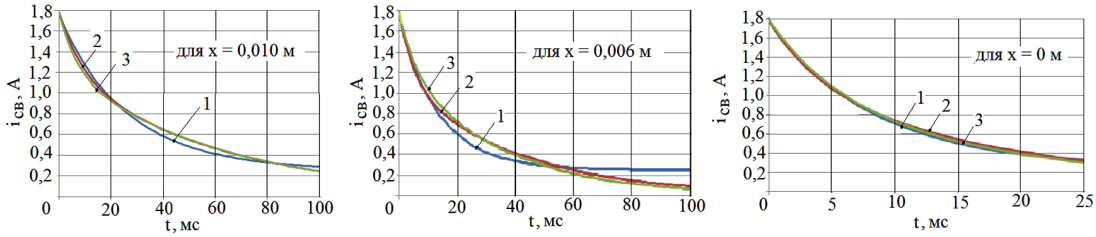


Рис. 7. Временные зависимости свободной составляющей тока в обмотке:
1 — кривая, полученная расчетом нестационарного магнитного поля в пакете ELCUT;
2 — кривая, полученная разложением исходной кривой на сумму двух экспонент;
3 — кривая, построенная на основе аналитического расчета переходного процесса в цепи с использованием вычисленных параметров многоконтурной схемы замещения ЛЭМД

Разложение временной зависимости свободной составляющей тока обмотки на сумму экспонент позволяет записать операторное сопротивление схемы замещения

$$z(p)=\frac{R\left[A_1p^n+A_2p^{n-1}+...+A_np\right]}{(I_0B_1-A_2)p^{n-1}+(I_0B_2-A_3)p^{n-2}+...+I_0B_n},$$

где R — активное сопротивление обмотки;
I_0 — начальное значение свободной составляющей тока обмотки, соответствующее моменту времени t=0; A_1, A_2, A_3,..., A_n и B_1, B_2,..., B_n — коэффициенты, определяемые по найденным значениям амплитуд I_k и показателей степени λ_k разложения свободной составляющей тока в экспоненциальный ряд.

По операторному сопротивлению синтезируется многоконтурная схема замещения ЛЭМД с массивным якорем (рис. 6).

По результатам расчета нестационарного магнитного поля в пакете ELCUT для различных фиксированных значений рабочего зазора операция разложения свободной составляющей тока обмотки в экспоненциальный ряд позволяет представить ее в виде суммы двух экспонент (рис. 7):

$$i_{св}(t)\approx 0{,}9\cdot e^{-45{,}6t}+0{,}877\cdot e^{-170t} \quad \text{при } \delta=0{,}012\text{ м},$$
$$\text{то есть } x=0\text{ м}.$$

$$i_{св}(t)\approx 1{,}24\cdot e^{-29{,}4t}+0{,}530\cdot e^{-158t} \quad \text{при } \delta=0{,}006\text{ м},$$
$$\text{то есть } x=0{,}006\text{ м}.$$

$$i_{св}(t)\approx 1{,}22\cdot e^{-16{,}2t}+0{,}537\cdot e^{-152t} \quad \text{при } \delta=0{,}002\text{ м},$$
$$\text{то есть } x=0{,}010\text{ м}.$$

Полученные временные зависимости $i_{св}(t)$ позволяют по операторному сопротивлению $Z(p)$ определить параметры двухконтурной схемы замещения ЛЭМД с массивным якорем.

Результатами расчета являются (рис. 6):

— активные сопротивления ветвей R=4,5 Ом, R_1=14,5 Ом;

— индуктивность участка цепи L_1=0, 13 Гн;

— зависимость инверсной индуктивности участка цепи от хода якоря

$$\Gamma_0(x)=L_0^{-1}(x)=15{,}9-1100x\ [\text{Гн}^{-1}],$$

где x — перемещение якоря (задается в метрах).

Выводы.

1. Использование цепно-полевого подхода и возможности комплекса программ ELCUT 6.0 (профессиональная версия) расчета нестационарного магнитного поля позволяют синтезировать многоконтурную схему замещения ЛЭМД с массивным якорем, в которой инверсная индуктивность одного из участков цепи в зависимости от перемещения якоря может быть аппроксимирована уравнением прямой линии, другие параметры цепи являются константами.

2. При разложении свободной составляющей тока обмотки ЛЭМД с массивным якорем в экспоненциальный ряд для инженерных расчетов достаточной точностью является представление кривой тока в виде суммы двух (как в рассмотренном примере) или трех экспонент, причем с ростом степени λ_k при экспоненте ее амплитуда I_k уменьшается.

Библиографический список

1. Ряшенцев, Н. П. Динамика электромагнитных импульсных систем / Н. П. Ряшенцев, Ю. З. Ковалев. — Новосибирск : Наука, 1974. — 186 с.

2. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н. П. Ряшенцев [и др.]. — Новосибирск : Наука, 1981. — 150 с.

3. Манжесов, В. К. Динамика и синтез электромагнитных генераторов силовых импульсов / В. К. Манжесов, Н. О. Лукутина, Т. О. Невенчанная. — Фрунзе : Илим, 1985. — 185 с.

4. Смелягин, А. И. Синтез и исследование машин и механизмов с электромагнитным приводом / А. И. Смелягин. — Новосибирск : Изд-во Новосибирского ун-та, 1991 — 248 с.

5. Угаров, Г. Г. Анализ показателей электромагнитных ударных машин / Г. Г. Угаров, В. Ю. Нейман // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1996. — № 2. — С. 72–80.

6. Нейман, В. Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с аккумулированием магнитной энергии в динамических режимах / В. Ю. Нейман // Электротехника. — 2002. — № 2. — С. 30—36.

7. Ковалев, Ю. З. Исследование рабочих процессов энергопреобразования в электромагнитном приводе на заданный закон движения якоря при обеспечении максимума к.п.д. / Ю. З. Ковалев, А. С. Татевосян, А. А. Татевосян // Омский научный вестник. — 2002. — Вып. 18. — С. 78—83.

8. Ивашин, В. В. Электромагнитные привода для импульсных и виброимпульсных технологий / В. В. Ивашин, А. К. Кудинов, В. П. Певчев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2012. — № 1. — С. 72—75.

9. Татевосян, А. А. Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения / А. А. Татевосян, А. С. Татевосян // Известия ТПУ. — 2014. — Т. 325, № 4. — С. 121—132.

10. Татевосян, А. С. Анализ процессов энергопреобразования в электромагнитных механизмах с массивным сердечником при заданном законе движения / А. С. Татевосян, А. А. Татевосян, Н. В. Захарова // Динамика систем механизмов и машин : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. — Омск, 2002. — С. 205—207.

11. Татевосян, А. С. Математическое моделирование электромагнитных двигателей с массивными сердечниками / А. С. Татевосян, Ю. З. Ковалев, В. А. Ощепков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 1992. — № 2. — С. 38—44.

12. Татевосян, А. С. Синтез многоконтурной семы замещения электромагнитных двигателей / А. С. Татевосян, В. А. Ощепков // Динамика электрических машин : сб. науч. тр. — Омск : Изд-во ОмПИ, 1985. — С. 136—140.

13. Татевосян, А. С. Программное обеспечение по исследованию моделей электромагнитных устройств / А. С. Татевосян, А. А. Татевосян // Омский научный вестник. — 2001. — Вып. 14. — С. 133—135.

14. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. Версия 6.0. — М., СПб. : ПК ТОР, 2013. — 293 с.

ТАТЕВОСЯН Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры теоретической и общей электротехники.

ТАТЕВОСЯН Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электрической техники, декан энергетического института.

ЗАХАРОВА Наталья Васильевна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры машиноведения.

Адрес для переписки: ast_51@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03.10.2016 г.

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

УДК 621.311

Т. Д. ГЛАДКИХ

Тюменский индустриальный университет, филиал, г. Нижневартовск

ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ОБСЛУЖИВАНИЕМ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Предложен способ корректировки периодичности технического обслуживания и ремонта оборудования электрических сетей нефтепромысловых потребителей на основе качественной оценки риска. Риск определяется вероятностной составляющей отказов и тяжестью их последствий. Вероятность отказа электрооборудования определяется с использованием теории нечетких множеств через оценку статистической вероятности отказа, технического состояния и условий работы электрооборудования. Тяжесть последствий отказов оборудования электрических сетей связана с недоотпуском продукции (нефти, жидкости). Предложенный подход позволяет облегчить организационную работу эксплуатирующих организаций по уменьшению или устранению последствий отказов в нефтепромысловых электрических сетях.

Ключевые слова: риск, техническое состояние, вероятность отказа, нефтепромысловые электрические сети.

Одним из важных направлений повышения эффективности и безопасности работы нефтегазодобывающих предприятий (НГДП) является бесперебойное снабжение электрической энергией нефтепромысловых потребителей.

Основные потребители электроэнергии нефтяных месторождений относятся к первой категории по надежности электроснабжения. Одним из способов поддержания требуемой надежности электрических сетей является выполнение графиков ППР электросетевого оборудования (ЭСО). Нормативы периодичности технического обслуживания (ТО) и ремонта ЭСО приведены в [1] и не учитывают условия эксплуатации (климатические, неравномерность износа,