

УДК 621.318.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИЙ

Нейман Людмила Андреевна,

канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов
Новосибирского государственного технического университета, Россия,
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: neyman@ngs.ru

Нейман Владимир Юрьевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ
электротехники Новосибирского государственного технического
университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.
E-mail: nv.nstu@ngs.ru

При сейсморазведке полезных ископаемых широко применяется технология формирования сейсмических волн источниками механических воздействий на землю. Для генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций целесообразно использование линейных электромеханических преобразователей энергии электромагнитного типа. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования методик расчета электромагнитных преобразователей в динамических процессах. В особенности это касается вопросов учета влияния насыщения стальных элементов конструкции магнитопровода и потерь активной мощности от действия вихревых токов динамические характеристики преобразователя.

Цель работы заключается в схемной реализации динамической модели электромагнитного преобразователя и разработке устойчивых алгоритмов расчета модели методами структурного моделирования в среде Matlab Simulink, позволяющих производить анализ электромагнитных процессов в нестационарных режимах с учетом насыщения в стальных элементах конструкции и потерь мощности от действия вихревых токов.

Методы исследований. Расчет электромагнитных процессов выполнен с помощью программы Simulink, входящей в состав программного пакета Matlab7.12.0(R211a).

Результаты. Приведено математическое описание мощности потерь из условия равенства потерь в ферромагнитных элементах конструкции магнитопровода и потерь в короткозамкнутом контуре при синусоидальном изменении тока. Учет данных потерь приближенно рассматривается как действие дополнительного короткозамкнутого контура, сцепленного с основным магнитным потоком, созданным намагничивающей обмоткой катушки. Основу расчетной математической модели составляют дифференциальные уравнения электрического и магнитного равновесия, полученные для обобщенной нелинейной схемы замещения катушки и позволяющие учесть влияние возникающих в массивном магнитопроводе вихревых токов, а также потоков рассеяния. Предложены алгоритмы расчета и варианты схемной реализации динамических моделей нелинейной катушки индуктивности с использованием аппарата структурного моделирования, которые могут быть положены в основу расчета динамических рабочих процессов силовых электромагнитных виброударных приводов с целью улучшения их характеристик. Результаты расчетов по представленным в работе алгоритмам полностью согласуются с классическими положениями теории нелинейной электротехники и результатами физического эксперимента. В качестве примера приведены результаты расчета, подтверждающие качественное соответствие результатов моделирования с использованием аппарата структурных схем известным результатам физического эксперимента. В работе также получены рекомендации по выбору параметров структурной модели электромагнитного преобразователя, гарантирующие устойчивые алгоритмы при его расчетах.

Ключевые слова:

Сейсморазведка полезных ископаемых, механическое воздействие на грунт, электромагнитный преобразователь энергии, нелинейная катушка индуктивности, нестационарный режим работы, мощность потерь, методы структурного моделирования.

В отрасли разведки полезных ископаемых широко используется технология формирования сейсмических волн источниками мощных механических воздействий на землю [1, 2]. В качестве возбудителей низкочастотных вибраций и систем генерирования механических воздействий на грунт лидирующую позицию заняли сейсмоисточники, созданные на базе линейных электромеханических преобразователей энергии электромагнитного типа [3, 4].

В настоящее время импульсные и виброимпульсные технологии, созданные на основе линейных электромагнитных преобразователей, являются перспективным направлением современного производства для генерации силовых механических воздействий различных по амплитуде и частоте [5–14].

Вопросы, связанные с совершенствованием методик расчета электромагнитных преобразователей, по-прежнему сохраняют свою актуальность [15–25].

Для корректного исследования динамических процессов электромагнитных преобразователей используется математическое описание, в рамках которого приходится учитывать потери, возникающие в ферромагнитных элементах конструкции массивного магнитопровода. Наибольшие трудности, возникающие при расчете, связаны с учетом потерь от вихревых токов, зависящих от частоты и степени насыщения материала магнитопровода. Особенно эта задача актуальна при расчетах нестационарных режимов [26–32].

Известные в литературе точные методы расчета, учитывающие потери и степень насыщения магнитной цепи, связаны с длительными и трудоемкими вычислениями, так как большинство из них базируются на численном решении уравнений электромагнитного поля [33, 34].

Сложность протекающих в электромагнитном преобразователе нестационарных процессов, неразрывно связанных с параметрами электрической и магнитной цепей, конструкцией и свойствами материала магнитопровода, затрудняет точный учет вихревых токов, обусловленных активными потерями мощности в ферромагнитном сердечнике. Возникновение данных потерь может приближенно рассматриваться как действие вторичного короткозамкнутого контура, сцепленного с тем же магнитным потоком, что и намагничивающая обмотка [35–37].

Основу расчетной модели при таком рассмотрении, как правило, составляют дифференциальные уравнения, полученные для обобщенной схемы замещения электромагнитного преобразователя, представленного в простейшем случае нелинейной катушкой индуктивности с массивным магнитопроводом. Преимущественным способом построения и расчета таких моделей следует признать использование аппарата структурных схем [38].

Цель настоящих исследований заключается в схемной реализации динамической модели линейного электромагнитного преобразователя и разработке устойчивых алгоритмов расчета модели методами структурного моделирования в среде *Matlab Simulink*, позволяющих производить анализ электромагнитных процессов в нестационарных режимах с учетом насыщения в стальных элементах конструкции и потерь мощности от действия вихревых токов.

В качестве базовой модели катушки выбрана конструкция электромагнитного преобразователя с П-образной формой магнитопровода и внешним притягивающимся якорем. При соотношениях размеров магнитной цепи, когда рабочий воздушный зазор $\delta=0$, базовой модели преобразователя соответствует нелинейная катушка индуктивности с массивным магнитопроводом, схема замещения которой изображена на рис. 1.

В схеме (рис. 1) кроме основной обмотки включена короткозамкнутая обмотка, в которой под воздействием переменного магнитного потока наводится ЭДС, вызывающая ток i_B . Исследования показывают, что такая схема замещения катушки соответствует действительным физическим процессам [35].

Магнитодвижущая сила короткозамкнутого контура препятствует прохождению основного магнитного потока, замедляя процесс его изменения.

Уравнения электрического и магнитного равновесия при таком представлении описываются системой уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа

$$u = ir_k + L_s \frac{di}{dt} + w \frac{d\Phi}{dt}; \quad (1)$$

$$iw = \Phi R_M - i_B w_B; \quad (2)$$

$$i_B r_B + w_B \frac{d\Phi}{dt} = 0, \quad (3)$$

где $u = U_m \sin \omega t$ – напряжение источника питания; U_m – амплитудное значение напряжения; ω – циклическая частота источника; i, i_B – токи в обмотке катушки и короткозамкнутом контуре; r_k, r_B – сопротивления катушки и короткозамкнутого контура, связанного с активными потерями в ферромагнитном сердечнике; w, w_B – число витков катушки и короткозамкнутого контура; Φ – основной магнитный поток; R_M – магнитное сопротивление стального сердечника магнитопровода; L_s – индуктивность рассеяния катушки.

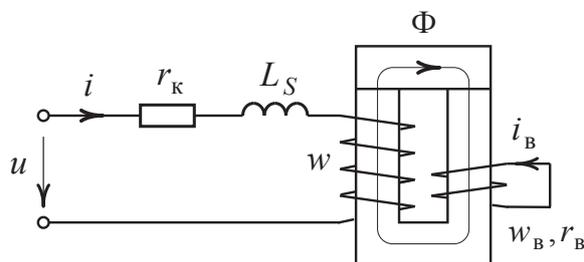


Рис. 1. Схема замещения катушки индуктивности с массивным магнитопроводом

Fig. 1. Equivalent circuit of an inductor with a massive magnetic circuit

Из выражения (3) ток короткозамкнутого контура определится, как

$$i_B = - \frac{w_B}{r_B} \frac{d\Phi}{dt}$$

и уравнения электрического и магнитного равновесия нелинейной цепи (1)–(3) принимают вид

$$\begin{cases} u = ir_k + L_s \frac{di}{dt} + w \frac{d\Phi}{dt}, \\ iw = \Phi R_M + \frac{w_B^2}{r_B} \frac{d\Phi}{dt}. \end{cases} \quad (4)$$

Оперировав понятием реактивного магнитного сопротивления цепи, можно записать [35]

$$x_\mu = \omega \frac{w_B^2}{r_B}. \quad (5)$$

Из выражения для реактивного магнитного сопротивления (5) следует, что величина индуктивности магнитной цепи, введенная для учета потерь энергии в сердечнике, может быть определена как

$$L_M = \frac{w_B^2}{r_B}. \quad (6)$$

Приближенное решение для индуктивности магнитной цепи может быть получено из условия равенства потерь в стальном магнитопроводом и по-

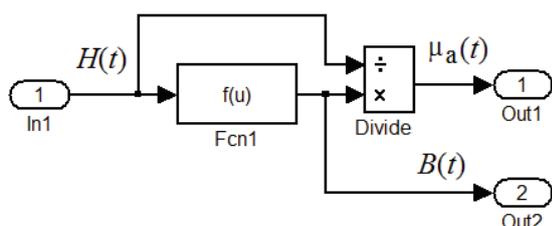


Рис. 3. Детализированная структурная схема учета нелинейных свойств модели «Subsystem1»

Fig. 3. Detailed block diagram of taking into account nonlinear properties of the model «Subsystem1»

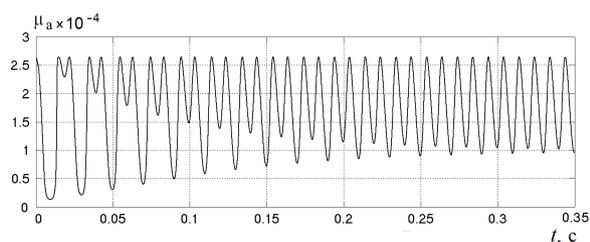


Рис. 4. Зависимость $\mu_a(t)$ в переходном режиме

Fig. 4. Dependence of $\mu_a(t)$ in transition mode

Основу алгоритма приближенного учета потерь мощности в массивном ферромагнитном магнитопроводе составляет подсистема «Subsystem 2» (рис. 2), которая в развернутом виде представлена на рис. 5.

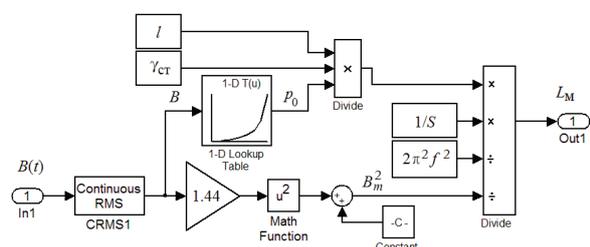


Рис. 5. Детализированная структурная схема подсистемы «Subsystem 2»

Fig. 5. The detailed block diagram of the subsystem «Subsystem 2»

Входной величиной этой подсистемы является вектор индукции магнитного поля. Значение магнитной индуктивности, получаемое на выходе подсистемы (рис. 5), пропорционально потерям от вихревых токов в массивном магнитопроводе.

Нелинейность зависимости удельных потерь $p_0(B)$ в материале магнитопровода от степени его насыщения учтена с помощью блока одномерной таблицы «Table». Для использования нелинейного блока в него необходимо внести параметры, соответствующие конкретному материалу магнитопровода.

Результаты моделирования базовой модели катушки (рис. 2) в виде переходных графиков тока и магнитного потока при нулевых начальных условиях приведены на рис. 6, 7.

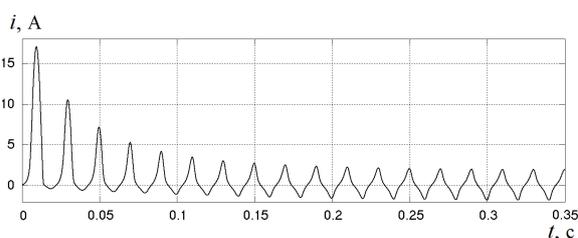


Рис. 6. Расчет тока в катушке при синусоидальном напряжении

Fig. 6. Calculation of current in the coil with sinusoidal voltage

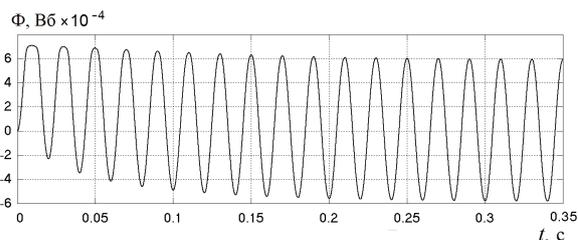


Рис. 7. Расчет потока катушки при синусоидальном напряжении

Fig. 7. Calculation of the coil flow with sinusoidal voltage

В примере приняты следующие значения параметров модели катушки индуктивности с массивным магнитопроводом: $U_m=40$ В; $f=50$ Гц; $r_k=0,5$ Ом; $L_s=0,005$ Гн; $w=200$; $l=0,25$ м; $S=4 \cdot 10^{-4}$ м²; сердечник магнитопровода выполнен из электротехнической стали марки «1212» с толщиной листов 0,5 мм; $\gamma_{ст}=7750$ кг/м³.

Анализ результатов моделирования показывает, что влияние вихревых токов на форму и величину тока, определяющего намагничивающую силу, становится заметным при индукциях $B > 1$ Тл. Качественное сравнение результатов расчета методами структурного моделирования полностью согласуется с известными результатами физического эксперимента [39].

В случае упрощения математической модели катушки (8), если принять $L_s=0$, может быть предложен более устойчивый алгоритм расчета, реализованный с помощью структурной схемы, изображенной на рис. 8.

Реализация алгоритма вычислений в такой структуре не вызывает особых затруднений. В отличие от структурной схемы рис. 2 нелинейные свойства материала магнитопровода учтены с помощью блока одномерной таблицы в виде зависимости $H=f(B)$ (рис. 8).

При этом полученные временные зависимости для тока и магнитного потока в достаточной степени точности повторяют характер аналогичных зависимостей, рассчитанных по структурной схеме рис. 2 для случая $L_s \approx 0$.

Реализация алгоритма расчета с использованием операций дифференцирования представлена на рис. 9.

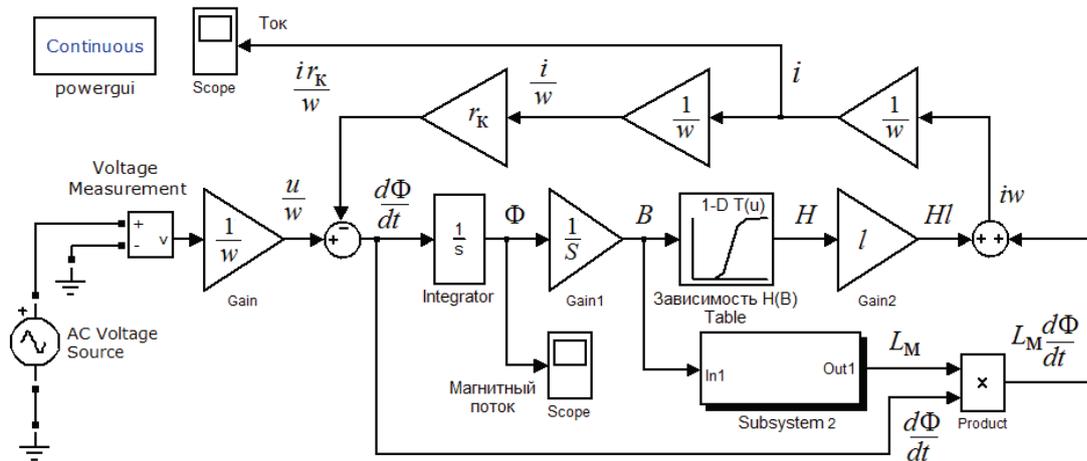


Рис. 8. Структурная схема упрощенной динамической модели катушки с массивным магнитопроводом

Fig. 8. Block diagram of a simplified dynamic model of the coil with a massive magnetic circuit

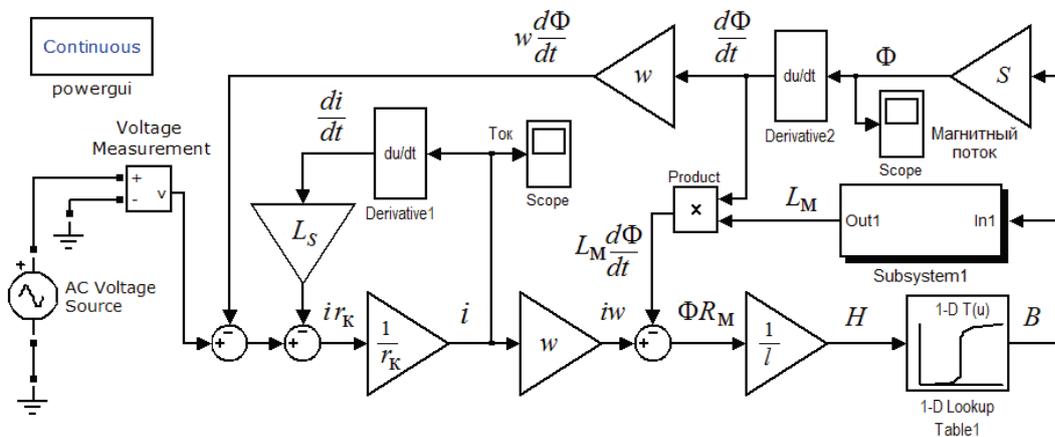


Рис. 9. Структурная схема динамической модели катушки

Fig. 9. Block diagram of the coil dynamic model

Нелинейные свойства материала магнитопровода учтены с помощью блока одномерной таблицы «Table1» в виде зависимости $B=f(H)$. Результаты моделирования по данному алгоритму полностью соответствуют переходным графикам, представленным на рис. 6, 7.

Численные расчеты на модели с дифференцированием (рис. 9) демонстрировали высокую вычислительную устойчивость предложенного алгоритма.

Для количественной оценки в адекватности представленных динамических моделей на рис. 10 приведена осциллограмма тока нелинейной катушки индуктивности, имеющая следующие параметры: $r_k=140$ Ом; $L_s=0,004$ Гн; $w=1100$; сердечник магнитопровода выполнен из электротехнической стали, близкой по магнитным свойствам к стали марки «1212», и с толщиной листов 0,5 мм; $\gamma_{ст}=7750$ кг/м³; длина сердечника $l=120$ мм; сердечник имеет прямоугольное сечение со сторонами 20×25 мм. Катушка получает питание от синусоидального источника напряжения амплитудой $U_m=155$ В промышленной частоты $f=50$ Гц.

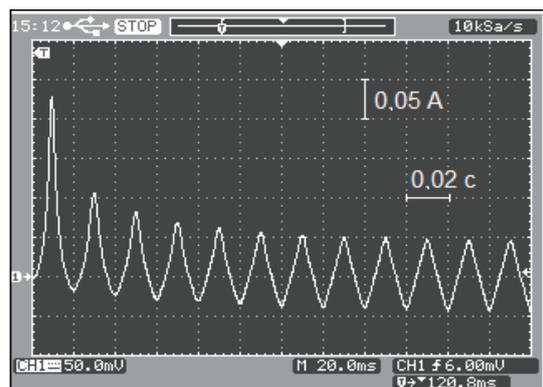


Рис. 10. Осциллограмма тока

Fig. 10. Current oscillogram

С учетом допущения о возможности замены контуров вихревых токов эквивалентным короткозамкнутым контуром на рис. 11 рассмотрена численная реализация расчета для тока в среде «Simulink» с использованием структурной схемы рис. 2. Аналогичные результаты наблюдались при расче-

тах с использованием структурной схемы рис. 9. Расчетные и экспериментальные данные практически совпадают. Погрешность вычисления динамических характеристик моделей уменьшается с повышением точности учета нелинейных свойств сердечника магнитопровода.

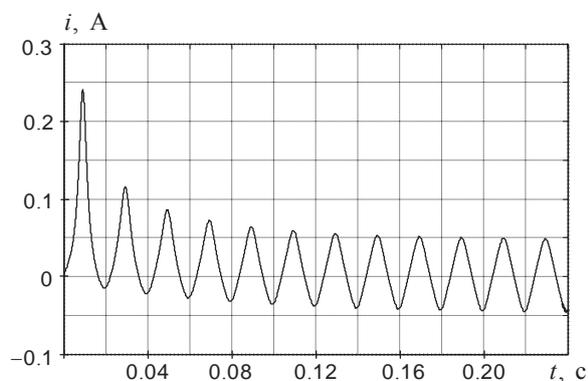


Рис. 11. Расчет тока в катушке

Fig. 11. Calculation of current in the coil

Выводы

1. Рассмотренный вариант математического описания потерь в массивном магнитопроводе электромагнитного преобразователя позволяет

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичев А.П. Технологическое применение колебаний или вибрационные технологии // Вестник ДГТУ. – 2005. – Т. 5. – № 3 (25). – С. 289–306.
2. Шнейерсон М.Б. Теория и практика наземной сейсморазведки. – М.: Недра, 1988. – 527 с.
3. Щадин П.Ю. Импульсные электромагнитные сейсмоисточники «Енисей». Обзор моделей и опыт практического применения // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2005. – № 4. – С. 6–12.
4. Певчев В.П., Ивашин В.В. Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – 142 с.
5. Усанов К.М., Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган: Изд-во Курганского госуниверситета, 2006. – 284 с.
6. Усанов К.М., Каргин В.А. Силовая электромагнитная импульсная система для погружения стержневых элементов в грунт // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2005. – № 3. – С. 59–61.
7. Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
8. Pevchev V.P. The superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source // Journal of Mining Science. – 2010. – V. 46. – № 6. – P. 656–665.
9. Pevchev V.P. Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator // Journal of Mining Science. – 2009. – V. 45. – № 4. – P. 372–381.
10. Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
11. Нейман В.Ю., Скотников А.А., Нейман Л.А. Тенденции в развитии конструкций синхронных двухобмоточных электромагнитных машин для импульсных технологий // Актуальные проблемы энергетики АПК: Матер. II Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2011. – С. 209–211.
12. Нейман Л.А. Оценка конструктивного совершенства систем охлаждения синхронных электромагнитных машин ударного действия // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 4. – С. 177–183.
13. Нейман Л.А., Нейман В.Ю. Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 48–52.
14. Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2013. – № 29. – С. 88–90.
15. Pevchev V.P. The use of micro-CAP software to simulate operating processes of electromechanical impulse devices // Russian Electrical Engineering. – 2010. – V. 81. – № 4. – P. 213–216.
16. Кудинов А.К., Певчев В.П. Составление схем замещения электромагнитных систем // Электротехника. – 2012. – № 3. – С. 32–36.
17. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. К выбору основных базисных размеров линейных электромагнитных двигателей // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2011. – Т. 8. – № 3. – С. 108–111.
18. Мошкин В.И. К расчету усилия удержания интегрированного линейного электромагнитного двигателя // Электротехника. – 2013. – № 8. – С. 60–64.
19. Мошкин В.И., Егоров А.А., Угаров Г.Г. Исследование режимов форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях // Вест-

производить их количественный учет при анализе электромагнитных процессов в нестационарных режимах методами структурного моделирования.

2. Использование наиболее распространенного способа математического описания обобщенной нелинейной модели катушки на базе уравнений электрического и магнитного равновесия и численная реализация расчета с помощью операции интегрирования или дифференцирования показывают высокую вычислительную устойчивость предложенных алгоритмов методами структурного моделирования.
3. Предложенные алгоритмы электромагнитного расчета и варианты схемной реализации динамической модели нелинейной катушки методами структурного моделирования, позволяющие учесть насыщение и влияние вихревых токов, возникающих в массивном магнитопроводе, могут быть положены в основу расчета динамических рабочих процессов электромагнитных виброударных приводов с целью улучшения их характеристик.
4. Расчеты по представленным в работе алгоритмам полностью согласуются с классическими положениями теории нелинейных цепей и результатами физического эксперимента.

- ник Саратовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 1. – № 1. – С. 39–44.
20. Мошкин В.И. Сравнение магнитных циклов импульсного линейного электромагнитного двигателя с учетом мощности потерь в его обмотке // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 93–96.
 21. Мошкин В.И., Егоров А.А., Угаров Г.Г. Об оптимальных условиях энергопреобразования в электромагнитных приводах // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2005. – № 29. – С. 239–240.
 22. Ивашин В.В., Певчев В.П. Анализ влияния неравномерности зазора мощного электромагнитного двигателя на развиваемую механическую силу и энергию // Электротехника. – 2010. – № 9. – С. 9–12.
 23. Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А. О методике к выбору типа электромагнита по значениям конструктивного фактора // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 310–313.
 24. К вопросу учета главных размеров при выборе типа электромагнита по значению конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, А.А. Скотников, О.В. Рогова // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 50а–53.
 25. Нейман Л.А. К решению задачи рационального выбора электромагнитного двигателя заданного габарита и веса на основе численного эксперимента // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 4. – С. 184–190.
 26. 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.
 27. Мошкин В.И., Угаров Г.Г. Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с возвратной пружиной // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – № 2 (66). – С. 130–135.
 28. Нейман Л.А., Скотников А.А., Нейман В.Ю. Исследование нагрева электромагнитного двигателя в переходных режимах // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 50–54.
 29. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM. – М.: ИЦ «Академия», 2005. – 336 с.
 30. Малинин Л.И., Нейман В.Ю. Предельные силовые характеристики электромагнитных двигателей постоянного тока // Электротехника. – 2009. – № 12. – С. 61–67.
 31. Ряшенцев Н.П., Мирошниченко А.Н. Введение в теорию энергопреобразования электромагнитных машин. – Новосибирск: Наука. 1987. – 160 с.
 32. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицын А.В. Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
 33. О проектировании электромагнитов с заданными динамическими свойствами / А.Г. Никитенко, Ю.А. Бахвалов, Ю.А. Никитенко и др. // Электротехника. – 1998. – № 9. – С. 53–58.
 34. Корсун М.М., Ступаков И.М., Рояк М.Э. Об использовании граничных элементов при моделировании электромагнитных процессов с существенным влиянием вихревых токов // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 2 (39). – С. 101–109.
 35. Гринченков В.П., Ершов Ю.К. Метод расчета динамических характеристик электромагнитов с массивным магнитопроводом // Известия вузов. Электромеханика. – 1989. – № 8. – С. 61–68.
 36. Климеко Б.В. Интегрирование уравнений динамики электромагнитов при наличии вторичных контуров // Электричество. – 1984. – № 11. – С. 51–55.
 37. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
 38. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
 39. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. – Л.: Энергия, 1967. – Т. 2. – 407 с.

Поступила 20.10.2014 г.

UDC 621.318.4

SIMULATION OF DYNAMIC PROCESSES IN ELECTROMAGNETIC ENERGY CONVERTERS FOR FORCE EFFECTS AND LOW-FREQUENCY VIBRATIONS GENERATION SYSTEMS

Lyudmila A. Neyman,

Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Prospect,
Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: neyman@ngs.ru

Vladimir Yu. Neyman,

Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Prospect,
Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nv.nstu@ngs.ru

Mechanical source effect on the ground is a seismic wave generation technology widely used in minerals seismic exploration. Force effect and low-frequency vibration generation systems are advantageous because of electromagnet-based electromechanical energy converters. The improvement of such converters design methods is an actual problem. This concerns especially the issues of considering the influence of steel elements saturation in magnetic core construction and losses of active power caused by eddy currents.

The aim of the research is to design the electromagnetic converter dynamic model and to develop stable design algorithms with structure modeling methods in Matlab Simulink which are capable of analyzing non-stationary electromagnetic processes with respect to steel elements saturation and eddy-current losses.

Research methods. Electromagnetic processes have been simulated in Matlab 7/12/0 (R2011a) Simulink.

Results. The paper introduces the mathematical description of power losses with respect to equality of losses in magnetic core ferromagnetic elements and in the short-circuit contour when current is sinusoidal. The losses influence is approximately taken into account as an additional short-circuit contour linked with the main magnetic flux generated by the magnetizing winding of the inductor. The design model consists of electrical and magnetic balance differential equations derived for a non-linear equivalent circuit of the inductor. This model permits to take into account eddy currents in the solid magnetic core and leakage fluxes. The proposed design algorithms and circuit implementation of dynamical models of a non-linear inductor obtained by structured simulation can be accepted as the base of the design of dynamical operation processes in power electromagnetic vibroimpact drives to improve their characteristics. The results of calculations with the algorithms stated in the paper completely agree with classical statements of the non-linear electrical circuit theory and physical experiments results. Some examples of calculations approving structured simulation results coincide qualitatively with physical experiment results. There are several recommendations for choosing electromagnetic converter structured model parameters providing design algorithms stability.

Key words:

Minerals seismic exploration, mechanical effect on the ground, energy electromagnetic converter, non-linear inductor, non-stationary operation mode, power loss, structured simulation methods.

REFERENCES

- Babichev A.P. Tekhnologicheskoe primeneniye kolebany ili vibratsionnyye tekhnologii [Technological application of vibration or oscillation technology]. *Vestnik DGTU*, 2005, vol. 5. no. 3 (25), pp. 289–306.
- Shneerson M.B. *Teoriya i praktika nazemnoy seysmorazvedki* [Theory and practice of seismic survey]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 527 p.
- Shhadin P.Yu. Impulsnyye elektromagnitnyye seysmoistochniki «Enisey». Obzor modeley i opyt prakticheskogo primeneniya [Pulsed electromagnetic source array «Yenisei». Overview of models and practical experience]. *Pribery i sistemy razvedochnoy geofiziki*, 2005, no. 4, pp. 6–12.
- Pevchev V.P., Ivashin V.V. *Proektirovaniye moshchnyykh korotkokohtovyykh impulsnykh elektromagnitnykh dvigateley* [Designing powerful short-stroke pulsed electromagnetic motors]. Tolyatti, TGU Press, 2012. 142 p.
- Usanov K.M., Ugarov G.G., Moshkin V.I. *Lineyny impulsnyy elektromagnitnyy privod mashin s avtonomnym pitaniem* [Linear pulse electromagnetic drive cars with independent power supply]. Kurgan, Kurgan State University Press, 2006. 284 p.
- Usanov K.M., Kargin V.A. Silovaya elektromagnitnaya impulsnaya sistema dlya pogruzheniya sterzhnevyykh elementov v grunt [Power electromagnetic pulse system for immersion rod elements in the soil]. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova*, 2005, no. 3, pp. 59–61.
- Ivashin V.V., Pevchev V. P., Kudinov A. K. Elektromagnitnyye privody dlya impulsnykh i vibroimpulsnykh tekhnology [Electromagnetic actuators for pulse and vibro-pulse technologies]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
- Pevchev V.P. The superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 656–665.
- Pevchev V.P. Principal dimensions of the short-stroke electromagnetic motor for a seismic wave generator. *Journal of Mining Science*, 2009, vol. 45, no. 4, pp. 372–381.
- Ivashin V.V., Pevchev V.P., Kudinov A. K. Elektromagnitnyye privoda dlya impulsnykh i vibroimpulsnykh tekhnology [Electromagnetic drive for pulse and vibro-pulse technologies]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
- Neyman V.Yu., Skotnikov A.A., Neyman L.A. Tendentsii v razvitiy konstruktsiy sinkhronnykh dvukhobmotochnyykh elektromagnitnykh mashin dlya impulsnykh tekhnology [Trends in development of structures of synchronous two-winding machines for pulsed electromagnetic technology]. *Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktualnyye problemy energetiki APK»* [Proc. of the II Intern. scientific-practical. conf. Actual problems of energy APC]. Saratov, 2011. pp. 209–211.
- Neyman L.A. Otsenka konstruktivnogo sovershenstva sistem okhlazhdeniya sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deystviya [Evaluation of structural perfection of the cooling systems in synchronous machines of electromagnetic percussion]. *Nauchnyy vestnik NGTU*, 2013, no. 4, pp. 177–183.
- Neyman L.A., Neyman V.Yu. Rabochy tsikl dvukhkatyushechnoy sinkhronnoy elektromagnitnoy mashiny so svobodnym vybegom boyka [Duty cycle of two-coil synchronous electromagnetic

- machine with striker free path]. *Izvestiya vuzov Elektromekhanika*, 2013, no. 6, pp. 48–52.
14. Ugarov G.G., Moshkin V.I. Perspektivy razvitiya silovykh elektromagnitnykh impulsnykh sistem [Prospects for development of power electromagnetic pulse-signal system]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 29, pp. 88–90.
 15. Pevchev V.P. The use of micro-CAP software to simulate operating processes of electromechanical impulse devices. *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, no. 4, pp. 213–216.
 16. Pevchev V.P., Kudinov A.K. Sostavlenie skhem zameshcheniya elektromagnitnykh sistem [Compilation of equivalent circuits of electromagnetic systems]. *Elektrotehnika*, 2012, no. 3, pp. 32–36.
 17. Moshkin V.I., Ugarov G.G. K vyboru osnovnykh bazisnykh razmerov lineynykh elektromagnitnykh dvigateley [On the issue of choosing the size of the main basis of linear electromagnetic motors]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 8, no. 3, pp. 108–111.
 18. Moshkin V.I. K raschetu usliya uderzhaniya integrirovannogo lineynogo elektromagnitnogo dvigatelya [On calculation of hold condition of integrated linear electromagnetic motor]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 8, pp. 60–64.
 19. Moshkin V.I., Egorov A.A., Ugarov G.G. Issledovanie rezhimov forsirovannogo akkumulirovaniya magnitnoy energii v impulsnykh lineynykh elektromagnitnykh dvigatelyakh [Research of modes of accelerated accumulation of magnetic energy in the pulse electromagnetic linear motors]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 39–44.
 20. Moshkin V.I. Sravnenie magnitnykh tsiklov impulsnogo lineynogo elektromagnitnogo dvigatelya s uchetom moshchnosti poter v ego obmotke [Comparing magnetic pulse cycles of linear electromagnetic motor based on the power loss in its winding]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 93–96.
 21. Moshkin V.I., Egorov A.A., Ugarov G.G. Ob optimalnykh usloviyakh energopreobrazovaniya v elektromagnitnykh privodakh [On optimal conditions of energy conversion in electromagnetic actuators]. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2005, no. 29, pp. 239–240.
 22. Ivashin V.V., Pevchev V.P. Analiz vliyaniya neravnomernosti zazorov moshchnogo elektromagnitnogo dvigatelya na razvivaemyu mekhanicheskuyu silu i energiyu [Analysis of impact of gap irregularity in a powerful electromagnetic engine on mechanical strength and energy]. *Elektrotehnika*, 2010, no. 9, pp. 9–12.
 23. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. O metodike k vyboru tipa elektromagnita po znacheniyam konstruktivnogo faktora [On the method to the choice of an electromagnet on the constructive factor]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka*, 2011, no. 2, pp. 310–313.
 24. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A., Skotnikov A.A., Rogova O.V. K voprosu ucheta glavnykh razmerov pri vybore tipa elektromagnita po znacheniyu konstruktivnogo faktora [On the issue of consideration of the main sizes when selecting the type of electromagnet by the value of the constructive factor]. *Elektrotehnika*, 2011, no. 6, pp. 50a–53.
 25. Neyman L.A. K resheniyu zadachi ratsionalnogo vybora elektromagnitnogo dvigatelya zadannogo gabarita i vesa na osnove chislennogo eksperimenta [The solution of the rational choice of electromagnetic motor with the specified dimensions and weight on the basis of the numerical experiment]. *Nauchny vestnik NGTU*, 2013, no. 4, pp. 184–190.
 26. Ivashin V.V., Pevchev V.P. Osobennosti dinamiki raboty i energeticheskikh diagramm impulsnogo elektromagnitnogo privoda pri paralelnom i posledovatelnom soedinenii obmotok vzbuzhdeniya [Features of the operation dynamics and energy diagrams of pulsed electromagnetic actuator for parallel and series connection of excitation windings]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 6, pp. 42–46.
 27. Moshkin V.I., Ugarov G.G. Energeticheskaya i dinamicheskaya effektivnost odnoobmotochnykh lineynykh elektromagnitnykh dvigateley s vozvratnoy pruzhinoy [Energy efficiency and dynamic single-winding linear electromagnetic motor with return spring]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 2 s (66), pp. 130–135.
 28. Neyman L.A., Skotnikov A.A., Neyman V.Yu. Issledovanie nagraeva elektromagnitnogo dvigatelya v perekhodnykh rezhimakh [Study of electromagnetic heating engine in transient modes]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2012, no. 6, pp. 50–54.
 29. Bul O.B. Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov: Magnitnye tsepi, polya i programma FEMM [Methods for calculating the magnetic systems of electrical devices: magnetic circuit and field program FEMM]. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 336 p.
 30. Malinin L.I., Neyman V.Yu. Predelnye silovye kharakteristiki elektromagnitnykh dvigateley postoyannogo toka [Limit power characteristics of DC electromagnetic motors]. *Elektrotehnika*, 2009, no. 12, pp. 61–67.
 31. Ryashentsev N.P., Miroshnichenko A.N. Vvedenie v teoriyu energopreobrazovaniya elektromagnitnykh mashin [Introduction to the theory of energy conversion of electromagnetic machines]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 160 p.
 32. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., Lvitsyn A.V. *Elektromagnitnye pressesy* [Electromagnetic presses]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
 33. Nikitenko A.G., Bakhvalov Yu.A., Nikitenko Yu.A. O proektirovani elektromagnitov s zadannymi dinamicheskimi svoystvami [Design of electromagnets with the specified dynamic properties]. *Elektrotehnika*, 1998, no. 9, pp. 53–58.
 34. Korsun M.M., Stupakov I.M., Royak M. Ob ispolzovanii granichnykh elementov pri modelirovani elektromagnitnykh protsessov s sushchestvennym vliyaniem vikhrevykh tokov [Use of boundary elements when simulating electromagnetic processes with a significant influence of eddy currents]. *Nauchny vestnik NGTU*, 2010, no. 2 (39), pp. 101–109.
 35. Grinchenkov V.P., Ershov Yu.K. Metod rascheta dinamicheskikh kharakteristik elektromagnitov s massivnym magnetoprovodom [The method of calculating the dynamic characteristics of electromagnets with a massive magnetic circuit]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 1989, no. 8, pp. 61–68.
 36. Klimeko B.V. Integrirovaniye uravneniy dinamiki elektromagnitov pri nalichii vtorichnykh konturov [Integration of the dynamics equations of electromagnets with the secondary circuit]. *Elektrichestvo*, 1984, no. 11, pp. 51–55.
 37. Chunikhin A.A. *Elektricheskie apparaty* [Electric vehicles]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 720 p.
 38. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press; St. Petersburg, Piter Publ., 2008. 288 p.
 39. Neyman L.R., Demirchan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. Leningrad, Energiya Publ., 1967. Vol. 2, 407 p.

Received: 20 October 2014.