

УДК 621.313.282.2

Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман

Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе

Работа направлена на повышение точности учета потерь энергии в магнитопроводе от действия вихревых токов и гистерезиса при моделировании динамических процессов в электромагнитных вибрационных преобразователях, используемых для генерирования механических колебаний, а также в иных электромагнитных устройствах дросселей или трансформаторов, применяемых в системах автоматики и радиоэлектроники. Рассмотрена схемная реализация динамических моделей, преимущественным способом расчета которых является возможность использования аппарата структурного моделирования в Matlab Simulink. Выполнено сравнение вариантов моделей между собой, учитывающее степень насыщения материала магнитопровода, нелинейность удельных потерь в стали, несинусоидальность изменения магнитного потока, а также форму периодического сигнала напряжения на входе преобразователя. Несмотря на разницу в подходах, показано, что ошибка в расчетах при сравнении вариантов моделей между собой не превышает 5%. Сделан вывод о целесообразности использования вариантов динамических моделей, исключающих неизбежные ошибки вычисления мощности потерь при наличии постоянной составляющей магнитного потока.

Ключевые слова: электромагнитный вибрационный преобразователь, электромагнитные устройства, потери энергии в магнитопроводе, динамические модели, методы структурного моделирования в Matlab Simulink.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-1-73-78

Постановка задачи

Электромагнитные вибрационные преобразователи энергии являются основным структурным звеном многих электромеханических систем и устройств, применяемых для генерирования низкочастотных механических колебаний и вибраций, различных по амплитуде и частоте [1–4].

В качестве исполнительных двигателей вибрационных преобразователей применяются электромагниты с подвижным сердечником, который взаимодействует с магнитным полем катушки или системой катушек получающих питание от периодического источника напряжения или тока. В конструктивном отношении электромагниты очень близки к электромагнитным устройствам дросселей или трансформаторов, широко применяемых в системах автоматики и радиоэлектроники.

Наибольшие трудности, возникающие при расчете динамических процессов подобных систем и устройств, связаны с количественным учетом магнитных потерь энергии в ферромагнитных элементах конструкции магнитопровода, вызванных вихревыми токами и гистерезисом.

В результате экспериментальных исследований электромагнитных вибрационных преобразователей, используемых в приводе ударных устройств, установлено, что потери энергии в стальных элементах магнитопровода составляют до 30–40% от всех видов потерь [5]. В целом это в два и более раз выше аналогичных потерь в отношении номинального режима для двигателей общепромышленного исполнения при питании от полупроводниковых преобразователей [6]. Очевидно, что расчет электромагнитных вибрационных преобразователей без учета процессов в стали может рассматриваться только в рамках качественного анализа. Важной составляющей такого учета является возможность применения в

схемной реализации динамических моделей, преимущественным способом расчета которых рассматривается использование аппарата структурного моделирования. Актуальность проводимых исследований обусловлена необходимостью совершенствования динамических моделей по количественному учету потерь энергии в магнитопроводе.

Целью проводимых исследований является сравнение подходов при моделировании динамических процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink.

Структурные схемы динамических моделей преобразователей с потерями энергии в магнитопроводе

Действие вихревых токов может приближенно рассматриваться как действие дополнительной короткозамкнутой обмотки. При допущении возможности замены контуров вихревых токов и полной магнитной связи намагничивающей и короткозамкнутой обмотки электрическая и магнитная цепи преобразователя при таком представлении описываются системой уравнений электрического и магнитного равновесия [7, 8]:

$$\begin{cases} u(t) = ir + w \frac{d\Phi}{dt}, \\ iw = i_{\mu} w + L_{\mu} \frac{d\Phi}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где Φ — полный магнитный поток; w — число витков катушки преобразователя; iw — м.д.с. обмотки; $i_{\mu} w$ — намагничивающая сила; L_{μ} — индуктивность магнитной цепи.

При допущении синусоидальности магнитного потока

$$L_M = \frac{2P_{ст}}{\omega^2 \Phi_m^2} = \frac{p_0 \gamma_{ст} l_{ст}}{2\pi^2 f^2 B_m^2 S_{ст}},$$

где $P_{ст}$ – мощность потерь в стальном магнитопроводе; p_0 – удельная мощность потерь; $\gamma_{ст}$ – плотность стали; $l_{ст}$, $S_{ст}$ – средняя длина и сечение магнитопровода; $\omega = 2\pi f$ – частота источника; Φ_m – амплитудное значение магнитного потока; B_m – амплитудное значение индукции.

В соответствии с системой (1) один из вариантов структурной схемы динамической модели электромагнитного преобразователя с потерями представлен на рис. 1.

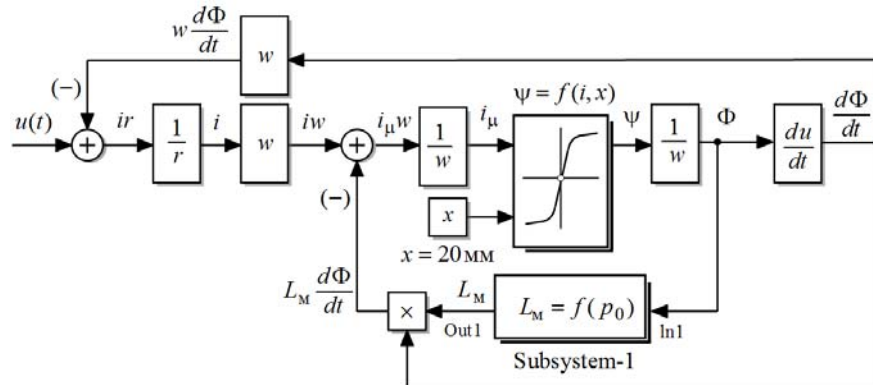


Рис. 1. Структурная схема динамической модели электромагнитного преобразователя с потерями энергии в короткозамкнутом контуре

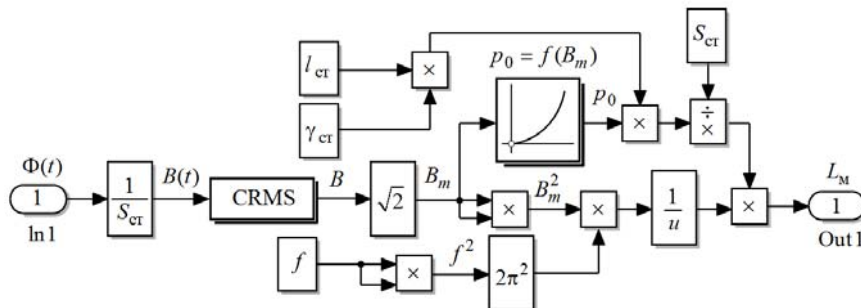


Рис. 2. Детализированная структурная схема подсистемы «Subsystem-1»

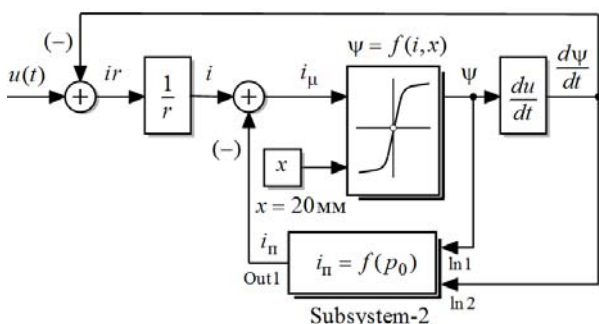


Рис. 3. Структурная схема динамической модели электромагнитного преобразователя с потерями

$$u(t) = ir + \frac{d\psi(i_\mu, x)}{dt}. \quad (2)$$

Учет потерь энергии в массивном магнитопроводе осуществляется подсистемой «Subsystem-2». Действующий ток в катушке на входе преобразователя

Учет потерь энергии в массивном магнитопроводе осуществляется подсистемой «Subsystem-1». Детализированная структурная схема подсистемы «Subsystem-1» представлена на рис. 2. Входной величиной подсистемы является вектор магнитного потока. Величина, получаемая на выходе подсистемы, пропорциональна потерям энергии в стальном магнитопроводе.

Основываясь на уравнении электрического равновесия (2), на рис. 3 рассмотрена структурная схема преобразователя, отражающая физическую связь параметров электрической и магнитной цепей, основанная на параллельной схеме замещения [9].

$$I = \sqrt{I_\pi^2 + I_\mu^2}.$$

где I_π – действующее значение тока потерь, совпадающего по фазе с напряжением, которое непосредственно связано с изменением основного магнитного потока; I_μ – действующее значение намагничивающего тока.

Составляющая тока потерь определяется из следующего соотношения:

$$I_\pi = \frac{P_{ст}}{E},$$

где $E = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{d\psi}{dt} \right)^2 dt}$ – ЭДС, связанная с изменением основного магнитного потока.

Ввиду малости активного сопротивления катушки и сопротивления рассеивания для рассматриваемых преобразователей энергии напряжение, связанное с изменением основного магнитного потока

и находящееся в противофазе с ЭДС, будет незначительно различаться по фазе с напряжением на входе цепи, и это позволяет с большой долей вероятности принять, что ток потерь и напряжение на входе цепи также совпадают по фазе.

При данном допущении один из вариантов детализированной структурной схемы, учитывающей потери энергии в стальном магнитопроводе модели рис. 3, приведен на рис. 4. Расчет потерь энергии в структурной схеме рис. 4 выполняется относительно основной гармоники магнитного потока, совпадающей с периодом напряжения на входе цепи. Выделение сигнала осуществляется с помощью блока

$F^{(1)}$ разложением несинусоидальной функции в ряд Фурье. Достоинством такого построения является отсутствие всякого рода ограничений по форме и симметрии несинусоидальной периодической кривой напряжения на входе преобразователя.

В предлагаемом варианте структурной схемы на рис. 5 действие магнитного потока предлагается рассматривать в виде эквивалентной синусоиды с действующим значением этого потока, равным действующему значению несинусоидальной функции

$$\Phi(t): \Phi_{\text{экр}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [\Phi(t)]^2 dt}.$$

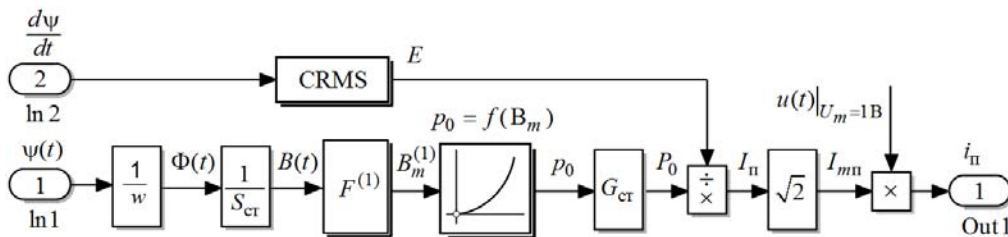


Рис. 4. Структурная схема модели подсистемы «Subsystem-2» (вариант-1) учета потерь энергии в магнитопроводе

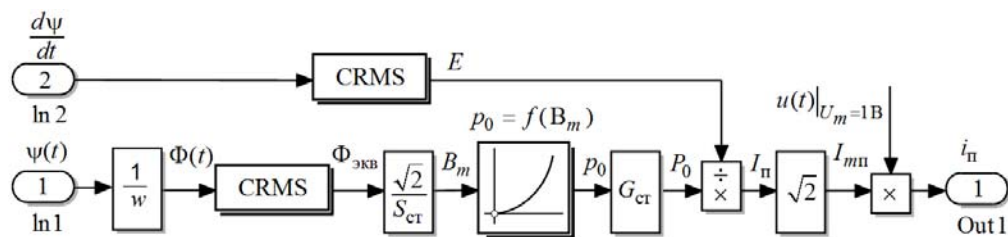


Рис. 5. Структурная схема модели подсистемы «Subsystem-2» (вариант-2) учета потерь энергии в магнитопроводе

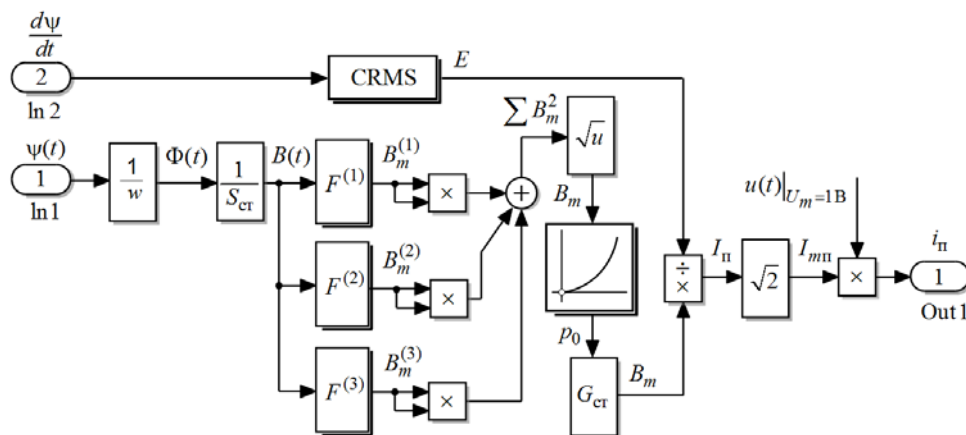


Рис. 6. Структурная схема модели подсистемы «Subsystem-2» (вариант-3) учета потерь энергии в магнитопроводе

Данное решение в некоторой степени позволяет учесть влияние гармоник более высокого порядка и этим скомпенсировать недостатки структурной схемы рис. 4. Однако на использование структурной схемы рис. 5 имеются ограничения по форме и симметрии кривой входного сигнала, который при разложении в ряд Фурье не должен содержать постоянной составляющей.

Избежать перечисленные недостатки вариантов схем на рис. 4 и 5 позволяет структурная схема, представленная на рис. 6. Учет потерь энергии в стальном магнитопроводе основан на разложении

несинусоидальной функции $B(t)$ в ряд Фурье до третьей гармоники включительно. При необходимости учтенный состав гармоник может быть значительно расширен.

Результирующее значение индукции определяется в виде эквивалентной синусоиды с амплитудным значением, равным $B_m = \sqrt{\sum_{k=1}^m [B_m^k]^2}$.

Для сравнения подходов к расчету магнитных потерь в стальных элементах рассматривалась тестовая модель электромагнита с фиксированным по-

ложением подвижного сердечника относительно неподвижного магнитопровода с координатой положения $x = 20$ мм [12].

В качестве исходных данных этой модели использовался массив значений опорных точек статических параметров потокоцепления $\psi(i, x)$, полученных с помощью расчета магнитного поля электромагнитного преобразователя с вполне определенной конфигурацией и размерами магнитной цепи [12, 13]. Задание функции двух аргументов $\psi(i, x)$ и интерполяция статических параметров в процессе счета осуществлялись с помощью блока двумерной таблицы $\psi(i, x)$ для фиксированных положений сердечника якоря. Электромагнитные характеристики материала магнитопровода соответствуют электротехнической стали марки «1212».

Учет потерь мощности в магнитопроводе осуществлялся через удельные потери в зависимости от степени его насыщения. Нелинейность характеристики потерь учитывалась с помощью блока одномерной таблицы $p_0 = f(B_m)$.

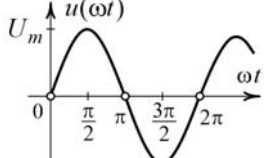
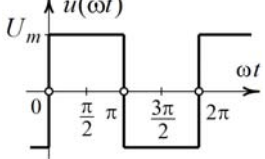
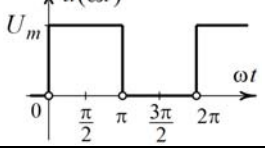
При расчете магнитных потерь исходили из суммарных потерь от гистерезиса и вихревых токов при различной частоте перемагничивания с использованием каталожных данных [10, 11], т.е. при до-

пущении равноценного влияния изменения индукции в материале магнитопровода как на одну, так и на вторую составляющие потерь.

Результаты исследований

Для анализа вариантов схем рис. 1–6 было выполнено компьютерное моделирование с использованием структурных моделей в среде Matlab Simulink. В ходе численного эксперимента методами структурного моделирования оценивались значения мощности потерь в стальном магнитопроводе $P_{ст}$, действующие значения тока катушки I , намагничивающего тока I_μ и тока потерь I_Π (таблица). Для повышения объективности и расширения границ эксперимента в качестве исходного сигнала на входе электромагнитного преобразователя рассматривались три различных по форме и одинаковых по частоте следования $f = 50$ Гц источника сигнала (см. таблицу). Синусоидальный источник сигнала с амплитудным значением напряжения $U_m = 380\sqrt{2}$ В. Периодический несинусоидальный источник в форме прямоугольных и разнополярных импульсов напряжения с действующим значением этого напряжения, равным действующему значению синусоидального источника и периодический несинусоидальный источник напряжения в форме прямоугольных импульсов напряжения положительной полярности.

Результаты численного анализа вариантов структурных моделей

Форма входного сигнала напряжения	Показатель	Схема варианта модели и подсистемы учета потерь энергии в стальном магнитопроводе				
		Рис. 1, рис. 2	Рис. 3, рис. 4	Рис. 5	Рис. 3, рис. 6	Максимальное расхождение показателя, %
	$P_{ст}, \text{Вт}$	27,330	27,103	27,327	27,104	0,83
	$I, \text{А}$	2,2489	2,2523	2,2522	2,2523	0,42
	$I_\mu, \text{А}$	2,2467	2,2466	2,2466	2,2467	0,004
	$I_\Pi, \text{А}$	0,07241	0,07163	0,07245	0,07163	1,13
	$P_{ст}, \text{Вт}$	20,292	19,413	20,297	19,8731	4,36
	$I, \text{А}$	2,3351	2,3388	2,3384	2,3387	0,16
	$I_\mu, \text{А}$	2,3326	2,3356	2,3350	2,3353	0,13
	$I_\Pi, \text{А}$	0,05406	0,05138	0,05407	0,05260	4,98
	$P_{ст}, \text{Вт}$	–	0,411	–	0,416	1,2
	$I, \text{А}$	–	5,6288	–	5,6289	0,002
	$I_\mu, \text{А}$	–	5,6276	–	5,6275	0,002
	$I_\Pi, \text{А}$	–	0,00975	–	0,00997	2,21

Анализируя значения расчетных показателей для разных вариантов схем (см. таблицу), учитывая равноценное влияние магнитных потерь от явлений, происходящих в стальном магнитопроводе, можно прийти к выводу, что расхождение результатов моделирования по мощности потерь и току для установившегося режима минимальны. Среднее расхождение результатов моделирования между максимальными и минимальными значениями показателей, полученных для различных форм периоди-

ческих сигналов напряжений, не превышает 1%. Максимальное расхождение по величине мощности потерь $P_{ст}$ составляет 4,36%, по току – 4,98%, т.е. меньше 5%. Имеющие место погрешности обусловлены, прежде всего, принимаемыми решениями по количественной оценке удельной мощности потерь, которая в большей степени оказывает влияние на показатель тока потерь I_Π . Величина ошибки до 5%, вызванная различными подходами при учете

удельных магнитных потерь, существенно не сказывается на разнице в определении намагничивающего тока I_μ .

При этом среднее расхождение результатов численного расчета от эксперимента не превышало 5%. Полученные временные зависимости для тока в достаточной степени точности повторяют характер аналогичных зависимостей, рассчитанных по вариантам моделей на рис. 1–6, как и в случае исследования нестационарных процессов [8]. С точки зрения количественной оценки явлений, происходящих в магнитопроводе, в связи с хорошим совпадением результатов моделирования возможности практического использования вариантов схем примерно одинаковы.

Для большей универсальности моделей расчет удельных потерь мощности следует производить относительно основной гармоник индукции, при этом гармоническими составляющими индукции более высокого порядка можно пренебречь. В дальнейшем это позволит предотвратить неизбежные ошибки при вычислениях удельной мощности потерь в стальном магнитопроводе при наличии в составе несинусоидальной периодической функции $B(t)$ постоянной составляющей магнитной индукции, которая, как известно, на мощность потерь влияния не оказывает.

Заключение

1. Рассмотренные подходы и реализованные на их основе варианты схем по учету потерь энергии в магнитопроводе позволяют производить их количественную оценку при анализе электромагнитных процессов методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink. Несмотря на разницу в подходах, расхождение результатов моделирования при сравнении вариантов моделей между собой не превышает 5%. Имеющие место погрешности в расчетах вызваны, прежде всего, различиями в подходах при количественной оценке удельной мощности потерь.

2. Полученные результаты могут оказаться полезными как при построении структурных моделей любых электромагнитных устройств, учитывающих влияние потерь энергии в магнитопроводе, так и при построении их математических аналогов для анализа различных режимов работы.

3. Наиболее предпочтительным подходом при реализации динамической модели электромагнитного преобразователя с потерями следует считать варианты схемной реализации на рис. 4 и 6, исключая неизбежные ошибки вычисления мощности потерь при наличии постоянной составляющей магнитного потока.

Литература

1. Певчев В.П. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий / В.П. Певчев, В.В. Ивашин, А.К. Кудинов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.

2. Угаров Г.Г. Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем / Г.Г. Угаров, В.И. Мошкин // Вестник Курганского государственного университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 29. – С. 88–90.

3. Нейман Л.А. Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 256–259.

4. Прессовое оборудование с линейным электромагнитным приводом для механизации технологических процессов ударной сборки и штамповки мелких изделий / В.А. Аксютин, Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.А. Скотников // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 220–224.

5. Ряшенцев Н.П. Электромагнитный привод линейных машин / Н.П. Ряшенцев, В.Н. Ряшенцев. – Новосибирск: Наука, 1985. – 153 с.

6. Новая серия частотно-регулируемых синхронных двигателей общего применения ОАО «НИПТИЭМ» / А.М. Зайцев, А.В. Захаров, А.С. Кобелев, О.В. Кругликов // Электротехника. – 2008. – № 9. – С. 2–10.

7. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.

8. Нейман Л.А. Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2015. – Т. 326, № 4. – С. 154–162.

9. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

10. Электротехнический справочник: в 2 т. / под ред. П.Г. Грудинского и др. – Т. 1. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1971. – 880 с.

11. Дружинин В.В. Магнитные свойства электро-технической стали. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.

12. Нейман Л.А. Решение задачи учета нелинейных свойств динамической модели электромагнитного привода / Л.А. Нейман, А.С. Шабанов, В.Ю. Нейман // Теория и практика современной науки: матер. XIX Междунар. науч.-практ. конф. / Научно-информационный издательский центр «Институт стратегических исследований». – М., 2015. – С. 58–63.

13. Нейман Л.А. Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3(28). – С. 75–87.

Нейман Людмила Андреевна

Докторант, канд. техн. наук, доцент каф. электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)
Тел.: +7 (383-3) 51-22-66
Эл. почта: neyman@ngs.ru

Нейман Владимир Юрьевич

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. теоретических основ электротехники НГТУ
Тел.: +7 (383-3) 46-04-42
Эл. почта: nv.nstu@ngs.ru

Neyman L.A., Neyman V.Yu.

Simulation of Processes in an Electromagnetic Vibration Converter with Power Loss in the Steel Magnetic Core

The paper is focused on more accurate simulation of magnetic core eddy currents and hysteresis power loss for dynamical processes in electromagnetic vibration converters generating mechanical oscillations and other electromagnetic units of throttles and transformers applied in automatic and radio-electronic systems. The dynamic model circuit designs are analyzed with the structured modeling method using Matlab

Simulink. Several models comparative analysis has been made with respect to magnetic core material saturation degree, specific iron loss non-linearity, magnetic flux non-sinusoidal change and periodical input voltage form. In spite of different approaches calculation error for all considered models is no more than 5%. It has been proved that the dynamic model is free of power loss calculation error when magnetic flux DC component occurs.

Keywords: electromagnetic vibration converter, electromagnetic units, power loss in magnetic core, dynamical model, structured modeling in Matlab Simulink.