

Н.М. Шайтор, Б.А. Якимович

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СТРУКТУР С МАГНИТНОЙ КОММУТАЦИЕЙ

Аннотация. Представлены результаты разработки алгоритмов и фрагменты программных кодов на языке программирования высокого уровня для решения задач параметрического синтеза при эскизном проектировании электромеханических преобразователей с магнитной коммутацией, отличительной особенностью которых являются сосредоточенные электрические обмотки при распределенной магнитной системе, что приводит к необходимости разработки индивидуальных расчетных моделей и программ. Данное алгоритмическое и программное обеспечение является основной структурной частью комплексного параметрического синтеза, направленного на снижение массы материалов и основанного на сочетании оптимизационной процедуры по результатам численного эксперимента с синтезом в направлении от электромагнитных нагрузок к геометрическим размерам электромеханических структур. Алгоритм представляет собой заданную последовательность вычислительных процедур в составе программных блоков, построенных на расчетных формулах в соответствующих методиках расчета. Программное обеспечение реализовано на базе объектно ориентированного языка Delphi. По завершению работы программы результаты расчетов заносятся в файл данных и визуализируются на экране монитора. Кроме того, осуществляется масштабное графическое изображение эскизного чертежа в трех проекциях, а также продольного разреза и характеристики холостого хода. Время решения одного варианта расчета составляет от долей секунды до десятка секунд. Представленные результаты алгоритмического и программного обеспечения параметрического синтеза электромеханических преобразователей с сосредоточенной электрической и распределенной магнитной системой могут найти применение в электромашиностроительной отрасли и будут полезны исследователям и проектировщикам, не имеющим достаточного опыта в разработке машин таких конструкций.

Ключевые слова: алгоритм, программа, расчет, электромагнитное ядро, проектирование, электрические машины.

N.M. Shaitor, B.A. Yakimovich

ALGORITHMIC AND SOFTWARE FOR PARAMETRIC SYNTHESIS OF ELECTROMECHANICAL STRUCTURES WITH MAGNETIC SWITCHING

Abstract. The results of the development of algorithms and program codes in a high-level programming language for solving problems of parametric synthesis in the preliminary design of electromechanical converters with magnetic switching, the distinctive feature of which are lumped electric windings with a distributed magnetic system, which leads to the need to build individual calculation models, are presented. This algorithmic and software is a structural part of a complex parametric synthesis aimed at reducing the mass of active materials and based on a combination of an optimization procedure based on the results of a numerical experiment, with synthesis in the direction from electromagnetic loads to the geometric dimensions of an electromechanical converter. The algorithm is a given sequence of computational procedures as part of software blocks built on the calculation formulas presented in the corresponding calculation methods. The software is implemented on the basis of the object-oriented Delphi language. Upon completion of the program, the calculation results are entered into a data file and visualized on the monitor screen. In addition, a three-dimensional graphical representation of the outline drawing as well as the longitudinal

Шайтор Николай Михайлович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры возобновляемых источников энергии и электрических систем и сетей Института ядерной энергии и промышленности. Севастопольский государственный университет, город Севастополь. Сфера научных интересов: электротехнические системы; моделирование электромеханических структур; системный анализ. Автор более 90 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: shaytor1950@mail.ru

Якимович Борис Анатольевич

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заведующий кафедрой возобновляемых источников энергии и электрических систем и сетей Института ядерной энергии и промышленности. Севастопольский государственный университет, город Севастополь. Сфера научных интересов: системный анализ и управление; автоматизация технологических процессов и производств; математическое моделирование; проектирование технических систем. Автор более 200 опубликованных научных работ.

Электронный адрес: yakimovich52@gmail.com

section and idling characteristics of the magnetically commutated generator is provided. The solution time for one calculation option ranges from fractions of a second to several seconds.

The presented results of the development of algorithmic and software for parametric synthesis of electromechanical converters with a lumped electrical and distributed magnetic system can be used in the electrical engineering industry and will be useful to researchers and designers who do not have sufficient experience in the development of machines of such structures.

Keywords: algorithm, program, payment, electromagnetic core, design, electric cars.

Введение

Практика проектирования электромеханических преобразователей (далее – ЭМП) представляет собой чередование решения задач анализа и синтеза для достижения таких целей, как максимальная эффективность и низкая стоимость с одновременным снижением массы активных материалов [1; 18]. Специалистов и исследователей привлекает надежность, технологичность и возможность преобразования конфигураций при конструировании машин с магнитной коммутацией для различных применений [2; 15; 16]. Математическая модель основной задачи нелинейного программирования, охватывающая проектирование ЭМП, может быть представлена в следующем виде [6; 12]:

$$F(X_1, X_2, \dots, X_p) = \min;$$

$$G_1(X_1, X_2, \dots, X_p) \geq 0;$$

$$G_2(X_1, X_2, \dots, X_p) > 0;$$

$$G_m(X_1, X_2, \dots, X_p) \geq 0;$$

$$X_i \geq 0; \quad i=1,2,\dots,p.$$

Содержанием математической модели применительно к проектированию ЭМП является нахождение совокупности параметров $X=(X_1, X_2, \dots, X_p)$, обеспечивающих экстремальное значение целевой функции $F(X_1, X_2, \dots, X_p) = \min$ при ограничениях $G_m(X_1, X_2, \dots, X_p) \geq 0$.

Проектирование ЭМП сводится к многократному расчету зависимостей между основными показателями, заданных в виде системы формул, эмпирических коэффициентов, графических зависимостей, которые можно рассматривать как уравнения проектирования [8; 17].

Целью исследования является разработка алгоритмов и программных кодов на языке программирования высокого уровня для решения задач комплексного параметрического синтеза при эскизном проектировании ЭМП с магнитной коммутацией (далее – ЭМПК), отличительной особенностью которых являются сосредоточенные электрические обмотки при распределенной магнитной системе, что приводит к необходимости построения индивидуальных расчетных моделей и программ.

В качестве параметра оптимизации рассматривается мощность, приходящаяся на единицу массы активных материалов меди и стали. В этом случае оптимум целевой функции связан с ее максимумом и отвечает задаче получения ЭМПК, отличающихся повышенной удельной мощностью [11].

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели разработан комплексный метод параметрического синтеза, основанный на сочетании оптимизационной процедуры по результатам численного эксперимента, с синтезом в направлении от электромагнитных нагрузок к геометрическим размерам машины. Дальнейшая процедура комплексного параметрического синтеза демонстрируется на примере модульной синхронно-реактивной индукторной машины с электромагнитным возбуждением. Входными величинами являются электромагнитные нагрузки, а выходными – геометрические размеры машины и уровень параметра оптимизации [5; 9; 10; 13].

Процедура комплексного параметрического синтеза состоит из четырех этапов, на каждом из которых сужается область варьирования значащих факторов (см. Рисунок 1).

На первом, основном, этапе автоматизированная программа расчета реализует синтез по неполному набору данных в направлении от электромагнитных нагрузок к размерам ЭМПК.

На втором этапе производятся численные эксперименты с определением параметра оптимизации на основе теории планирования экспериментов. В результате этого находится область варьирования электромагнитных нагрузок, которая близка к оптимальной.

На третьем этапе реализована статистическая обработка результатов численных экспериментов, а также определение значащих факторов, регрессионный анализ и модель оптимизации.

Четвертый этап оптимизационной процедуры построен на основе градиентного метода Бокса – Уилсона, сужающего зону варьирования значащих факторов, при которых параметр оптимизации удовлетворяет заданным условиям.

Алгоритмическое и программное обеспечение параметрического синтеза

Алгоритмическое и программное обеспечение относится к первому, основному, этапу комплексного параметрического синтеза ЭМПК. Оно реализовано на базе объектноо-

риентированной системы Delphi-5 на алгоритмическом языке Object Pascal. Выбор языка обусловлен тем, что этот императивный структурированный высокоуровневый язык программирования предназначен для написания прикладного программного обеспечения. Он имеет один из самых быстрых компиляторов с хорошим объектным кодом, обладает простотой и скоростью, не требует снабжения дополнительными библиотеками [3; 4; 7].

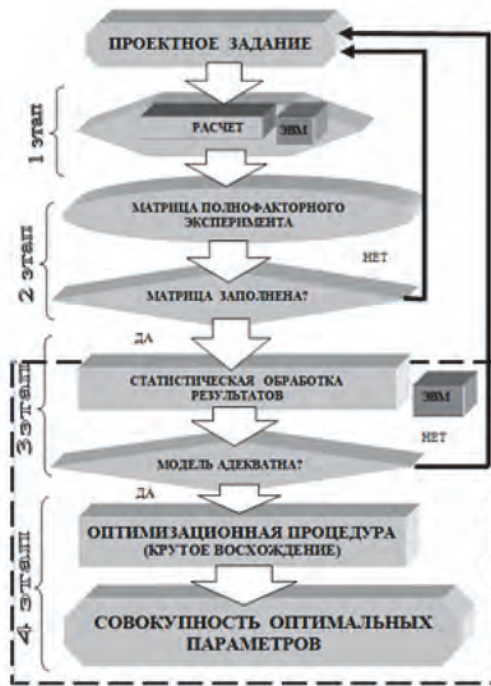


Рисунок 1. Процедура комплексного параметрического синтеза ЭМПК

Алгоритм представляет собой заданную последовательность вычислительных процедур и самостоятельных программ в составе программных блоков (см. Рисунок 2), построенных на расчетных формулах, представленных в соответствующих методиках расчета [14; 19; 20].

Программа позволяет вводить и редактировать следующие три группы параметров, записанных в программных кодах.

1. Номинальные параметры проектного задания: мощность S_n , кВА; напряжение U_n , В; частота f , Гц; коэффициент мощности $\cos\varphi$, о.е.

2. Независимые параметры из опыта проектирования: коэффициенты заполнения окна обмоткой возбуждения $K_{зв}$, о.е. и обмоткой якоря $K_{зр}$, о.е.; плотность тока в обмотках jP , А/м²; номинальное значение индукции в воздушном зазоре $B\delta$, Тл; индукции насыщения зубцов $B_{нас}$, Тл.

3. Предварительные значения коэффициентов рассеяния $K\sigma$ и модуляции $K\lambda$ магнитного потока, которые программа уточняет в рекурсивном режиме.

{процедура задания исходных параметров}

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);

```

begin
Klamd:=1.9;Form1.Edit17.Text := FloatToStr(Klamd);
Sn:=100;Form1.Edit1.Text := FloatToStr(Sn);
cosfi := 0.9;Form1.Edit5.Text := FloatToStr(cosfi);
Kzp:=0.55;Form1.Edit13.Text := FloatToStr(Kzp);
Kzv:=0.55;Form1.Edit14.Text := FloatToStr(Kzv);
Bdelt:=0.6;Form1.Edit16.Text := FloatToStr(Bdelt);
Ksigm:=1.7;Form1.Edit20.Text := FloatToStr(Ksigm);
Un:=750;Form1.Edit2.Text := IntToStr(Un);
f:=450;Form1.SpinEdit1.Text := IntToStr(f);
jp:=8.2E+6;Form1.Edit11.Text := FloatToStr(jp);
... ..
Bnas:=1.2;Form1.Edit22.Text := FloatToStr(Bnas);
end;

```

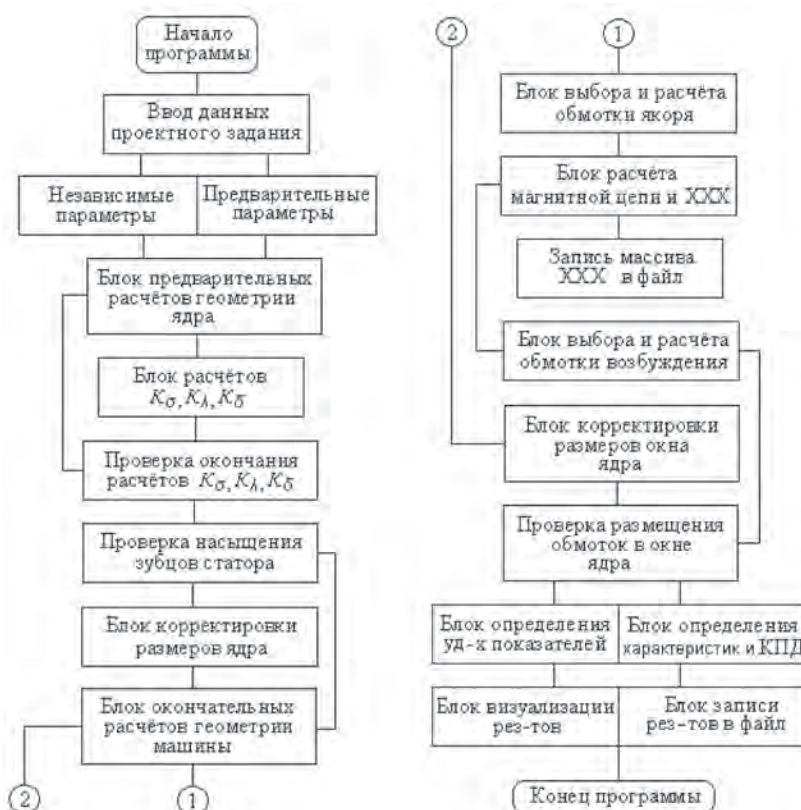


Рисунок 2. Алгоритм расчета ЭМП МК

При разработке программы особое внимание уделено удобству и наглядности ввода, редактирования и вывода данных. Ввод данных осуществляется изменением чисел в окнах редактирования экрана монитора с помощью стрелок вверх – «больше», вниз – «меньше» (см. Рисунок 3).

Параметры, принимаемые предварительно

Проектное задание	Ke	1,1	Kсигм	1,7	dtb, гр.	85	
Sn, кВА	100	Nф	2	delta, м	0	Sc1, м2	2E-7
Un, В	750	q	0,5	Внас, Тл	1,2	Гам, м	8,9
f, Гц	450	jp, А/м2	8200000	Внач, Тл	0,3	Гам, ст	7,8
n, об/с	49	je, А/м2	2700000	az1	0,5	См, Гр	10
cos fi	0,9	Kзр	0,55	az2	0,5	Сст, Гр	3
m	1	Kзв	0,55	Сталь	2	Т стали, гр	100
Uв, В	220	Vdelt, Тл	0,6	Kз	1,1	Исполн.	1
		Клямбд	1,9	Кнк	0,9	a1	2
		KF	1,3	Вкон, Тл	1,2		

Рисунок 3. Задание исходных параметров

В конце алгоритма в блоке визуализации реализуются результаты трех программ: «Кривая холостого хода» (см. Рисунок 4), «Эскиз электромагнитного ядра» (см. Рисунок 5), «Эскизный чертеж машины» (см. Рисунок 6).

В начале алгоритма в рекурсивном режиме работает блок предварительных расчетов геометрических размеров электромагнитного ядра, где уточняются расчетные коэффициенты $K\sigma$ и $K\lambda$.

```

{Геометрические размеры электромагнитного ядра}
tz1_n:=lz1_n/az1;
Form6.Edit8.Text:=FormatFloat('0.00E+00',tz1_n);
if ISP=2 then D1:=(tz1_n*(m*Z1+3))/pi
else D1:=(tz1_n*Z1)/pi;
Form7.Edit4.Text:=FormatFloat('0.00E+00',D1);D4:=D1+(2*bz1);
if ISP=2 then tz1_s:=pi*D4/(m*Z1+3)
else tz1_s:=pi*D4/Z1;mm1:=(tz1_n-lz1_n)/2;
Form2.Edit22.Text:=FormatFloat('0.00E+00',mm1);l:=a/2;
Form2.Edit21.Text:=FormatFloat('0.00E+00',l);hobm:=l;
MS:

```

После этого вступает в работу блок проверки насыщения зубцов статора, где проверяется значение магнитной индукции в зубцах статора и сравнивается с заданным значением $B_{нас}$. При этом корректируется сечение зубцов, размеры электромагнитного ядра, снова уточняются коэффициенты $K\sigma$ и $K\lambda$, и окончательно определяются размеры электромагнитного ядра.

Далее вступает в работу блок выбора и расчета обмотки якоря, где исходя из напряжения, плотности тока, числа параллельных ветвей и сечения провода определяются: число витков в фазе и параллельной ветви, сечение провода без изоляции и с изоляцией. В заключение определяется площадь окна электромагнитного ядра, занимаемая круглыми изолированными проводами.

{Выбор обмотки статора}

M12:

AFmax:=AFz2; AFmin:=AFmax/Klamd; dAF:=AFmax-AFmin;

Form3.Edit33.Text:=FormatFloat('0.000E+00',dAF);

.....

{Диаметр голого провода статора}

dc:=Sqrt((4*Sc)/pi);

{Диаметр изолированного провода статора}

dcu:=dc*1.12;

Form3.Edit38.Text:=FormatFloat('0.00E+00',dcu);

{Площадь окна, занимаемая круглыми проводами статора в одном модуле}

Sck:=Sqr(dcu)*Wp_1;

Form3.Edit39.Text:=FormatFloat('0.00E+00',Sck);

В блоке расчета магнитной цепи и характеристики холостого хода кривые намагничивания сталей $B = \mu$ (Н) заданы в аналитической форме. Исходя из начального значения индукции в зазоре программа с заданным шагом осуществляет расчет текущих значений индукции на различных участках магнитной цепи до заданного конечного значения $B_{\text{кон}}$. Определение напряженности H по известным значениям индукции B для выбранной марки стали осуществляется по приведенному алгоритму в результате обращения к соответствующей процедуре.

После расчета текущих значений МДС и ЭДС они выводятся на экран монитора и печатаются в файл вычисления данных (см. Рисунок 4).

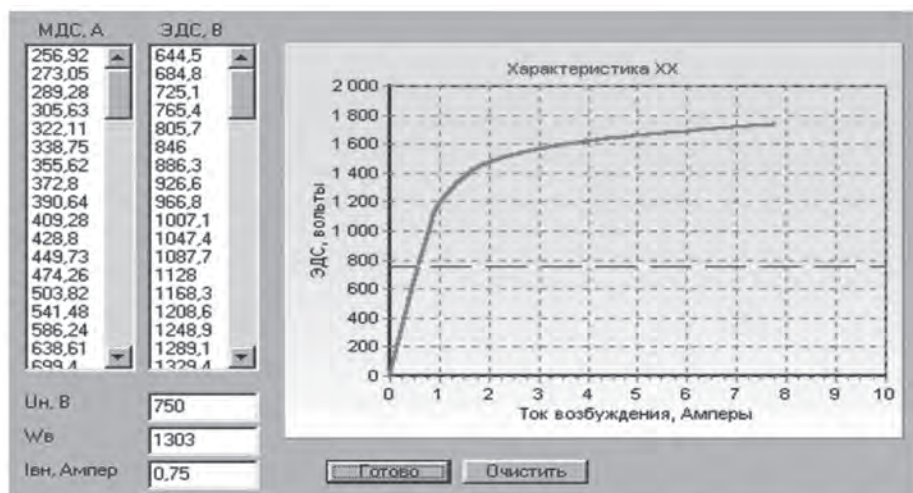


Рисунок 4. Характеристика холостого хода генератора

Код программы формы 2 (рисование характеристик холостого хода):

```
unit Unit8;
```

```
interface
```

```
uses Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs, StdCtrls,
Menus, TeEngine, ExtCtrls, TeeProcs, Series, Chart;
```

```
type
```

```

TForm8 = class(TForm)
Button1: TButton;
Label1: TLabel;
... ..
Edit3: TEdit;
Label5: TLabel;
procedureFormActivate(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
private
{ Private declarations }
public
{ Public declarations }
end;

```

В блоке выбора и расчета обмотки возбуждения на основании определенной МДС и заданного напряжения определяются: сечение меди, число витков, ток возбуждения, диаметр провода без изоляции и с изоляцией. В заключение вычисляется площадь окна, занимаемая изолированными круглыми проводами обмотки возбуждения.

```

{Расчет обмотки возбуждения}
{Средняя длина витка катушки возбуждения}
lv:=pi*(D1+2*bz1+a);Form3.Edit41.Text:=FloatToStr(lv);
{Сечение меди обмотки возбуждения}
Sov:=(Fvn*lv*(1+0.004*dtv)*1E-6)/(57*Uv);
... ..
{Площадь окна, занимаемая круглыми проводами
ОВ и ОЯ в одном модуле}
SSv:=Svk+Sck;Form4.Edit5.Text:=FormatFloat('0.00E+00',SSv);
{Площадь окна одного модуля}
M16:
Sokna:=a*1;Form4.Edit24.Text:=FormatFloat('0.00E+00',Sokna);

```

После выбора обмоток программа осуществляет проверку размещения изолированных проводов обмоток в модуле окна электромагнитного ядра и при необходимости корректирует ее размеры (см. Рисунок 5), а затем выводит на экран монитора общее графическое изображение машины (см. Рисунок 6).

В блоке определения удельных показателей рассчитывается масса активных материалов электромагнитного ядра и его стоимость по ценам, которые задаются при вводе данных. На основании этих параметров производится вычисление удельных характеристик электромагнитного ядра: удельной массы по мощности $G_{\text{я.м}}$, кг/кВт; удельной мощности по массе $P_{\text{я.в}}$, кВт/кг; удельной стоимости по мощности $УЦ_{\text{ядра}}$, руб/кВт.

В блоке определения КПД распложены три программы:

- программа определения сопротивлений электрических обмоток в функции температуры с учетом эффекта вытеснения тока;
- программа определения удельных потерь в функции индукции и частоты;
- программа расчета КПД с учетом потерь в меди обмоток и стали электромагнитного ядра.

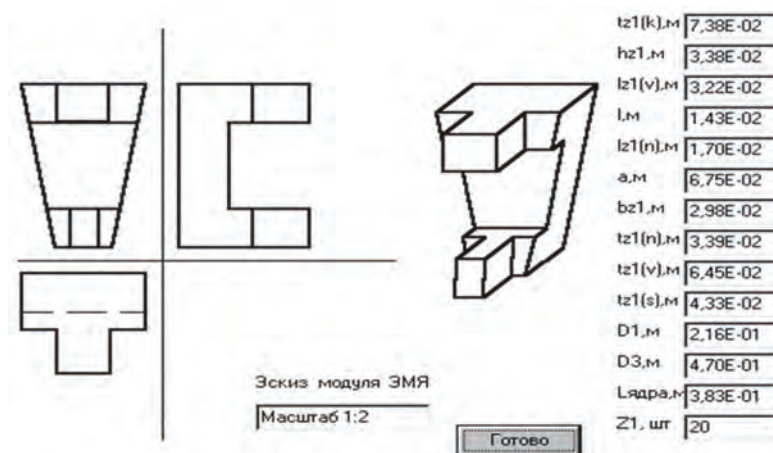


Рисунок 5. Эскиз модуля электромагнитного ядра

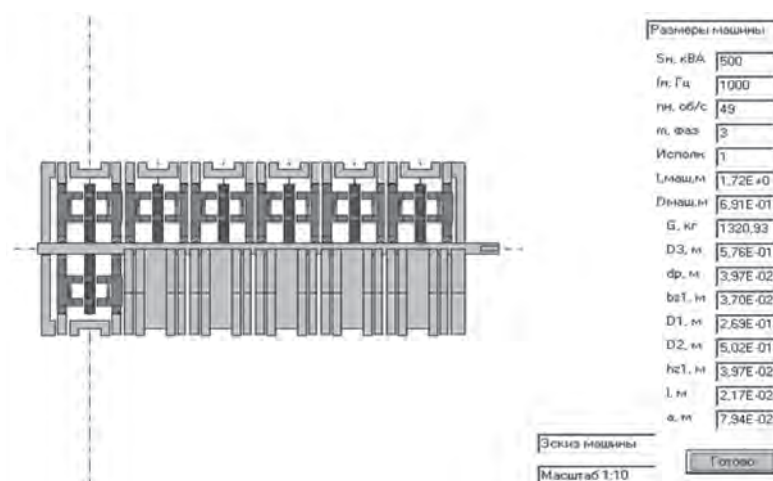


Рисунок 6. Графическое изображение продольного разреза

Код программы формы 7 (рисование эскиза машины).

unit Unit7; interface uses Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs, StdCtrls, TeEngine, Series, ExtCtrls, TeeProcs, Chart; type TForm7 = class(TForm)

Button1: TButton;

Edit1: TEdit;

.....

Label16: TLabel;

procedure FormActivate(Sender: TObject);

private

{ Private declarations }

public

{ Publicdeclarations }

end;

По завершении работы программы, результаты расчетов заносятся в файл данных и визуализируются на экране монитора, а также осуществляется масштабное графическое изображение продольного разреза эскиза машины. Время решения одного варианта расчета составляет от долей секунды до десятка секунд.

Выводы

Необходимость разработки алгоритмического и программного обеспечения для решения задач параметрического синтеза электромеханических преобразователей с магнитной коммутацией, содержащих сосредоточенные электрические обмотки при распределенной магнитной системе, вызвана их конструктивной особенностью.

Полученные результаты алгоритмического и программного обеспечения ориентированы преимущественно на проектирование модульных синхронно-реактивных индукторных машин с электромагнитным возбуждением.

Результаты применения программного обеспечения позволяют принимать управленческие решения при выборе предпочтительных вариантов из полученного множества исходя из проектировочных заданий и энергетических, массогабаритных и стоимостных показателей электрических машин новых конструкций.

Полученные результаты могут найти применение в электромашиностроительной отрасли и будут полезны исследователям и проектировщикам, не имеющим достаточного опыта в разработке, для последующего комплексного параметрического синтеза машин подобных конструкций.

Литература

1. Агапов А.А., Крылов Ю.М., Бурковский В.А. Математическое моделирование и программная оптимизация электрических машин промышленных комплексов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9, № 1 (32). С. 21–22.
2. Афонин А.А. Проблемы преобразования конфигурации электромеханических преобразователей энергии // Техническая электродинамика. 2001. № 2. С. 49–53.
3. Беляков Н.В., Попок Н.Н., Махаринский Ю.Е., Латушкин Д.Г. Методическое, алгоритмическое и программное обеспечение синтеза универсально сборных приспособлений // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2020. № 2 (39). С. 14–26.
4. Бильфельд Н.В. Эффективное использование строк PCHAR в DELPHI // Информационные технологии в управлении и экономике. 2021. № 1 (22). С. 4–14.
5. Герман-Галкин С. Анализ и синтез мехатронной системы с магнитокоммутационной машиной в пакетах Matlab-Simulink // Силовая электроника. 2006. № 1. С. 82–86.
6. Герман-Галкин С. Аналитическое и модельное исследование модульной синхронной реактивно-индукторной машины // Силовая электроника. 2016. № 3. С. 28–35.
7. Золкин А.А., Василенко К.А., Тормозов В.С., Скибин Ю.В. Использование прикладной программно-информационной системы в среде разработки DELPHI для диагностирования состояния тяговых электродвигателей // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75, № 1. С. 11–15.
8. Павлов В.А., Нийонсаба Т. Программно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной системы управления технологическими процессами с заданными параметрами продукта // Программные продукты и системы. 2018. № 1. С. 140–144.
9. Самохиц А.Б., Самохина А.С., Скляр А.Я., Шестопалов Ю.В. Итерационные методы градиентного спуска для решения линейных уравнений // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2019. Т. 59, № 8. С. 1331–1339.

10. Саушев А.В. Параметрический синтез электротехнических устройств и систем. Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 2013. 314 с.
11. Саушев А.В., Белоусова Н.В., Бова Е.В. Стратегии формирования целевой функции при параметрическом синтезе автоматизированных электроприводов объектов водного транспорта // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2020. Т. 12, № 6. С. 1087–1102.
12. Сафин А.Р., Петров Т.И. Обзор моделей, алгоритмов, методов проектирования и оптимизации электрических машин // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. 2020. № 3 (16). С. 22–30.
13. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2019. 495 с.
14. Шайтор Н.М., Горпинченко А.В. Особенности параметрического синтеза индукторных генераторов аксиально-радиальной конфигурации // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 4. С. 92–101.
15. Afonin A., German-Galkin S., Cierzniewski P., Hrynkiewicz J., Kramarz W., Szymczak P. (2021) Modular reluctance machine. PCTInt. Public Number WO/03270.A1.IntPublic. Date 11 January 2001. Priority data 22 May 1999.
16. Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P. (2000) Elektromechaniczne przetworniki energii komutacja elektroniczna. Szczecin. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 242 p.
17. German-Galkin S., Bormotov A. (2014) Analytical and model study of a modular electric machine in the electric drive. *American Journal of Scientific and Education Research*, No. 1 (4), pp. 614–625.
18. Duan Y., Ionel D. (2013) A review of recent developments in electrical machine design optimization methods with a permanent-magnet synchronous motor benchmark study. *IEEE Trans, Ind. Appl.*, vol. 49, pp. 1268–1275.
19. Shaitor N., Kelemen M., Yakimovich B. (2021) Analysis and Synthesis in the Design of Magnetic Switching Electric Machines. *Actuators*, vol. 10 (7), art. 10070164, pp. 1–17.
20. Shaitor N.M., Yakimovich B.A., Ryakov Yu.I., Gorpinchenko A.V. (2020) Application of Genetic Engineering Techniques in the Development of Complex Electromechanical Structures for Marine Robotics. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, vol. 16, no. 1, pp. 93–103.

References

1. Agapov A.A., Krylov Yu.M., Burkovskiy V.L. (2021) *Matematicheskoe modelirovaniye i programnaya optimizatsiya elektricheskikh mashin promyshlennykh kompleksov* [Mathematical modeling and software optimization of electrical machines of industrial complexes]. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii*, vol. 9, No. 1 (32), pp. 21–22 (in Russian).
2. Afonin A.A. (2001) *Problemy preobrazovaniya konfiguratsii elektromekhanicheskikh preobrazovateley energii* [Problems of configuration conversion of electromechanical energy converters]. *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, No. 2, pp. 49–53 (in Russian).
3. Belyakov N.V., Popok N.N., Makharinskiy Yu.Ye., Latushkin D.G. (2020) *Metodicheskoye, algoritmicheskoye i programnoye obespecheniye sinteza universal'no sbornykh prispособleniy* [Methodical, algorithmic and software for the synthesis of universal prefabricated fixtures]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*, No. 2 (39), pp. 14–26 (in Russian).
4. Bil'fel'd N.V. (2021) *Effektivnoye ispol'zovaniye strok PCHAR v DELPHI* [Efficient use of PHAR strings in DELPHI]. *Informatsionnyye tekhnologii v upravlenii i ekonomike*, No. 1 (22), pp. 4–14 (in Russian).

5. German-Galkin S. (2006) *Analiz i sintez mekhatronnoy sistemy s magnitokommutatsionnoy mashinoy v paketakh Matlab-Simulink* [Analysis and synthesis of a mechatronic system with a magnetic switching machine in Matlab-Citylink packages]. *Silovaya elektronika*, No. 1, pp. 82–86 (in Russian).
6. German-Galkin S. (2016) *Analiticheskoye i model'noye issledovaniye modul'noy sinkhronnoy reaktivno-induktornoy mashiny* [Analytical and modeling study of a modular synchronous reluctance-inductor machine]. *Silovaya elektronika*, No. 3, pp. 28–35 (in Russian).
7. Zolkin A.L., Vasilenko K.A., Tormozov V.S., Skibin Yu.V. (2021) *Ispol'zovaniye prikladnoy programmno-informatsionnoy sistemy v srede razrabotki DELPHI dlya diagnostirovaniya sostoyaniya tyagovykh elektrodvigately* [Using an applied software-information system in the DELPHI development environment for diagnosing the state of traction motors]. *Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii*, vol. 75, No. 1, pp. 11–15 (in Russian).
8. Pavlov V.A., Niyonsaba T. (2018) *Programmno-algoritmicheskoye obespecheniye avtomatizirovannoy sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami s zadannymi parametrami produkta* [Software and algorithmic support of an automated process control system with specified product parameters]. *Programmnyye produkty i sistemy*, No. 1, pp. 140–144 (in Russian).
9. Samokhii A.B., Samokhina A.S., Sklyar A.Ya., Shestopalov Yu.V. (2019) *Iteratsionnyye metody gradiyentnogo spуска dlya resheniya lineynykh uravneniy* [Iterative Gradient Descent Methods for Solving Linear Equations] *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki*, vol. 59, No. 8, pp. 1331–1339 (in Russian).
10. Saushev A.V. (2013) *Parametricheskyy sintez elektrotekhnicheskikh ustroystv i sistem* [Parametric synthesis of electrical devices and systems]. St. Petersburg, State University of the Sea and River Fleet. Admiral S.O. Makarova, 314 p. (in Russian).
11. Saushev A.V., Belousova N.V., Bova Ye.V. (2020) *Strateg i iformirovaniya tselevoy funktsii pri parametricheskom sinteze avtomatizirovannykh elektroprivodov ob'yektov vodnogo transporta* [Strategies for the Formation of an Objective Function in the Parametric Synthesis of Automated Electric Drives of Water Transport Objects]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*, vol. 12, No. 6, pp. 1087–1102 (in Russian).
12. Safin A.R., Petrov T.I. (2020) *Obzor modeley, algoritmov, metodov proyektirovaniya i optimizatsii elektricheskikh mashin* [Review of models, algorithms, methods for designing and optimizing electrical machines]. *Vestnik PITU imeni akademika M.S. Osimi*, No. 3 (16), pp. 22–30 (in Russian).
13. Sidnyayev N.I. (2019) *Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannyykh* [Theory of experiment planning and analysis of statistical data]. Moscow, Yurayt Publishing, 495 p. (in Russian).
14. Shaytor N.M., Gorpichenko A.V. (2021) *Osobennosti parametricheskogo sinteza induktornykh generatorov aksial'no-radial'noy konfiguratsii* [Features of parametric synthesis of inductor generators of axial-radial configuration]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 24, No. 4, pp. 92–101 (in Russian).
15. Afonin A., German-Galkin S., Cierznieski P., Hryniewicz J., Kramarz W., Szymczak P. (2021) Modular reluctance machine. PCTInt. Public Number WO/03270.A1.IntPublic. Date 11 January 2001. Priority data 22 May 1999.
16. Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P. (2000) *ElektromechaniczneprzetwornikiEnergiiKomutacja elektroniczna*. Szczecin. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 242 p.
17. German-Galkin S., Bormotov A. (2014) Analytical and model study of a modular electric machine in the electric drive. *American Journal of Scientific and Education Research*, No. 1 (4), pp. 614–625.
18. Duan Y., Ionel D. (2013) A review of recent developments in electrical machine design optimization methods with a permanent-magnet synchronous motor benchmark study. *IEEE Trans, hid. Appl*, vol. 49, pp. 1268–1275.

19. Shaitor N., Kelemen M., Yakimovich B. (2021) Analysis and Synthesis in the Design of Magnetic Switching Electric Machines. *Actuators*, vol. 10 (7), act. 10070164, pp. 1–17.
20. Shaitor N.M., Yakimovich B.A., Ryaskov Yu.I., Gorpichenko A.V. (2020) Application of Genetic Engineering Techniques in the Development of Complex Electromechanical Structures for Marine Robotics. *Russian Journal of Nonlinear Dynamics*, vol. 16, no. 1, pp. 93–103.