

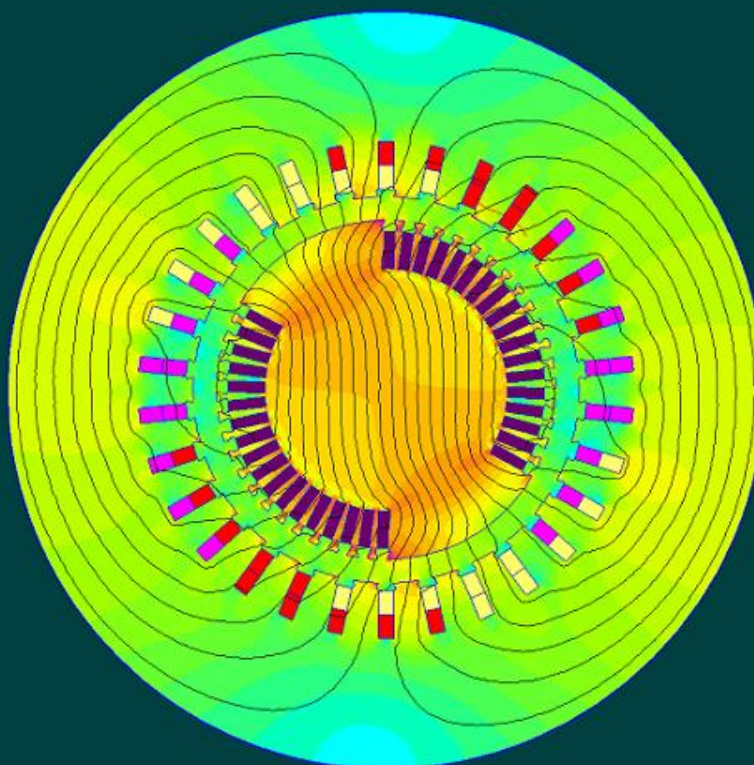
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»



В. И. Мильх

**ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВЫЕ РАСЧЕТЫ
И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И
СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЦЕССОВ
В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ**

МОНОГРАФИЯ



Харьков
НТУ «ХПИ»
2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

В. И. Мильх

**ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВЫЕ РАСЧЕТЫ
И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЦЕССОВ
В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ**

МОНОГРАФИЯ

Утверждено ученым советом НТУ «ХПИ»

Харьков
2017

УДК 621.313.322
ББК 31.26
М75

Рецензенты:

В. Ф. Болюх, *д-р техн. наук, проф.*,
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»;
Ю. Н. Васьковский, *д-р техн. наук, проф.*,
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»

Утверждено ученым советом НТУ «ХПИ» как монографию,
протокол №9 от 23.12.2016 г.

Монографія спрямована на розвиток теорії і методів проектування електричних машин взагалі і турбогенераторів, зокрема. Це робиться на основі чисельних методів розрахунку і аналізу їхніх магнітних полів, електромагнітних і силових параметрів, характеристик і процесів у поєднанні з використанням сучасної комп'ютерної техніки. Викладаються теоретичні основи чисельного аналізу, представляється програмне забезпечення, проводиться широкий розрахунковий аналіз на конкретних моделях турбогенераторів.

Призначено для наукових та інженерних працівників, що займаються розрахунком, проектуванням і дослідженням електричних машин, а також для студентів спеціальності «Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка».

Мильх В. И.

М75 Численно-полевые расчеты и анализ электромагнитных и силовых параметров и процессов в турбогенераторах : монография / В. И. Мильх. – Харьков : ФЛП Панов А. Н., 2017. – 204 с. – На рус. яз.

ISBN 978-617-7474-34-9

Монография направлена на развитие теории и методов проектирования электрических машин вообще и турбогенераторов, в частности. Это делается на основе численных методов расчета и анализа их магнитных полей, электромагнитных и силовых параметров, характеристик и процессов в сочетании с использованием современной компьютерной техники. Излагаются теоретические основы численного анализа, представляется программное обеспечение, проводится широкий расчетный анализ на конкретных моделях турбогенераторов.

Предназначено для научных и инженерных работников, занимающихся расчетом, проектированием и исследованием электрических машин, а также для студентов специальности «Электроэнергетика, електротехніка і електромеханіка».

Ил. 277. Табл. 53. Библиогр. 71 назв.

УДК 621.313.322
ББК 31.26

ISBN 978-617-7474-34-9

© В.И. Мильх, 2017
© НТУ «ХПИ», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ПРОЦЕСС РАЗВИТИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ В УКРАИНЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ИХ СОЗДАНИИ	8
1.1. Обзор турбогенераторов производства харьковского завода «Электротяжмаш»	8
1.2. Достигнутый уровень в турбогенераторостроении	11
1.3. Обзор авторских работ по численно-полевым исследованиям турбогенераторов	14
2. РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ И СИСТЕМА НАПРАВЛЕНИЙ КООРДИНАТ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН	15
2.1. Введение к расчетным моделям турбогенераторов	15
2.2. Модели турбогенераторов для тестовых расчетов	16
2.2.1. Модель электромагнитной системы турбогенератора ТГ01	16
2.2.2. Модель электромагнитной системы турбогенератора ТГ02	17
2.2.3. Модель электромагнитной системы турбогенератора ТГ03	17
2.2.4. Модель электромагнитной системы турбогенератора ТГ04	17
2.2.5. Модель электромагнитной системы турбогенератора ТГ05	18
2.2.6. Модель электромагнитной системы турбогенератора ТГ06	18
2.3. Система условных положительных направлений величин в турбогенераторе	19
3. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ НА ЭТОЙ ОСНОВЕ	21
3.1. Общая основа для численных расчетов магнитных полей в электрических машинах	21
3.2. Уравнения для расчета магнитного поля методом конечных разностей	21
3.3. Уравнения для расчета магнитного поля методом конечных элементов	23
3.4. Ограничение области расчета магнитного поля и граничные условия	25
3.5. Программные продукты для расчета магнитных полей на основе метода конечных элементов	27
3.6. Электромагнитные параметры ЭМ, определяемые по результатам расчета магнитного поля	29
4. ПРОГРАММНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТУРБОГЕНЕРАТОРА	34
4.1. Исходные положения	34
4.2. Общая характеристика скрипта Lua	35
4.3. Конструкторская модель турбогенератора	36
4.4. Электромагнитные свойства и параметры физической модели ТГ	38
4.5. Управление конечно-элементной структурой расчетной модели ТГ	38
4.6. Структура программы построения графической и физической моделей ТГ	38
4.7. Файлы исходных данных для программы на скрипте Lua	39
4.7.1. Основной файл исходных данных	39
4.7.2. Файл исходных данных с кривыми намагничивания	40
4.8. Программная реализация расчетной и физической моделей ТГ на скрипте Lua	40
4.9. Проверка заданных физических свойств расчетной модели турбогенератора	51
4.10. Ознакомление с результатами расчета магнитного поля	52

4.1.1.	Работа с программой построения физико-геометрической модели турбогенератора	54
5.	ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН ПРИ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТАХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ	55
5.1.	Определение фазовых соотношений электромагнитных величин	55
5.2.	Уточненная векторная диаграмма в режиме нагрузки	58
5.3.	Определение электромагнитных параметров и фазовых соотношений величин в ТГ автоматизированным расчетом магнитного поля в программной среде FEMM	59
5.3.1.	Постановка задачи и расчетная модель ТГ	59
5.3.2.	Файл исходных данных ТГ для скрипта Lua	61
5.3.3.	Скрипт Lua	61
5.3.4.	Указания по использованию программы	64
5.3.5.	Содержимое файла результатов	64
6.	ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАЗНЫХ ВИДОВ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ В МОЩНОМ ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ	66
6.1.	Вводные замечания	66
6.2.	Расчетные режимы возбуждения ТГ и разные виды реакции якоря	68
6.2.1.	Режим холостого хода	68
6.2.2.	Индивидуальное магнитное поле трехфазной обмотки статора	68
6.2.3.	Совместное действие обмоток ротора и статора	69
6.2.4.	Установившееся трехфазное короткое замыкание	71
7.	ОРГАНИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМЕ НАГРУЗКИ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ЗАДАННЫХ ЕГО ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ	73
7.1.	Постановка задачи	73
7.2.	Исходные значения параметров возбуждения для расчета магнитного поля в режиме нагрузки ТГ	74
7.3.	Исходный расчет магнитного поля в режиме нагрузки	76
7.4.	Итерационный процесс расчета магнитного поля в режиме нагрузки	77
7.5.	Алгоритм эффективного поиска параметров возбуждения магнитного поля в режиме нагрузки	77
7.6.	Файл исходных данных	80
7.7.	Программный файл – скрипт Lua	80
8.	РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРА В СТАТИКЕ	84
8.1.	Постановка задачи	84
8.2.	Магнитная индукция и ее координатные распределения	84
8.3.	Численно-полевой анализ силовых действий в турбогенераторе	89
8.4.	Анализ индуктивных сопротивлений турбогенератора на основе численных расчетов магнитных полей	97
8.5.	Численно-полевой анализ индуктивных сопротивлений рассеяния турбогенератора	101
8.6.	Расчет трехмерного распределения магнитного поля	104
8.7.	Численно-полевой анализ характеристик турбогенератора	107
8.7.1.	Общая постановка задачи	107
8.7.2.	Расчет характеристики холостого хода	107
8.7.3.	Расчет характеристики короткого замыкания	108
8.7.4.	Расчет U-образных характеристик	109
8.7.5.	Расчет угловой характеристики	112

9.	ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА И АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ФУНКЦИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ВЕЛИЧИН ТГ В ДИНАМИКЕ	114
9.1.	Постановка задачи автоматизированного расчета электромагнитных процессов в турбогенераторах в программной среде FEMM в динамике	114
9.2.	Теоретические основы расчета временных функций электромагнитных и силовых величин	114
9.3.	Общие замечания о скрипте Lua, автоматизировавшем расчет временных функций электромагнитных и силовых величин	116
9.4.	Файл исходных данных для скрипта Lua	117
9.5.	Структура программы расчета динамики электромагнитных процессов турбогенератора	117
9.6.	Скрипт Lua	118
9.7.	Указания по использованию программы	120
9.8.	Численно-полевой анализ временных функций электромагнитных и силовых величин в турбогенераторах	121
9.8.1.	Временные функции магнитной индукции в неподвижных точках зазора ТГ	121
9.8.2.	Временные функции магнитной индукции для точек, связанных с вращающимся ротором	122
9.8.3.	Временные функции магнитного потокосцепления и ЭДС фазной обмотки статора	124
9.8.4.	Динамика силовых действий в турбогенераторах с разными зубцово-пазовыми структурами в номинальном режиме работы	126
9.9.	Численно-полевая оценка эффективности укорочения обмотки статора турбогенератора	131
9.9.1.	Сравнительный расчетный анализ электромагнитных величин ТГ	132
9.9.2.	ЭДС фазной обмотки статора	132
9.9.3.	Переменная составляющая магнитной индукции на поверхности вращающегося ротора	132
9.9.4.	Электромагнитный момент, действующий на ротор, и его пульсации	133
9.9.5.	Сравнение вариантов ТГ при одинаковых номинальных параметрах	133
10.	ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ	135
10.1.	Гармонический анализ электромагнитных величин трехфазной обмотки статора турбогенератора на основе классических и численно-полевых методов	135
10.1.1.	Классический гармонический анализ	135
10.1.2.	Классический гармонический численный анализ (КГЧА)	137
10.1.3.	Численно-полевой гармонический анализ (ЧПГА)	138
10.1.4.	Численно-полевой гармонический анализ на основе однопозиционного расчета магнитного поля	138
10.1.5.	Численно-полевой гармонический анализ на основе вращающихся магнитных полей	140
10.2.	Сравнительный численно-полевой анализ гармонического состава ЭДС в турбогенераторах	142
10.2.1.	Постановка задачи	142
10.2.2.	Расчетные режимы и магнитные поля в ТГ	143
10.2.3.	Расчетный анализ гармонического состава МПС и ЭДС	144
11.	ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЦЕССОВ В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ	146
11.1.	Постановка задачи	146

11.2.	Теоретические основы анализа несимметричного режима работы ТГ	147
11.3.	Анализ электромагнитных и силовых процессов в ТГ	149
11.3.1.	Магнитное потокосцепление и ЭДС фазных обмоток статора	149
11.3.2.	Фазовые соотношения, напряжения и мощности фазных обмоток статора	150
11.3.3.	Временные функции магнитной индукции	152
11.3.4.	Численно-полевой анализ электромагнитных процессов в роторе турбогенератора при несимметричной нагрузке	153
11.3.5.	Силовые процессы в турбогенераторе при несимметрии нагрузки	156
12.	АНАЛИЗ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА	160
12.1.	Введение в проблему и постановка задачи	160
12.2.	Принципы расчета переменной составляющей магнитной индукции на поверхности ротора	161
12.3.	Анализ переменной составляющей магнитной индукции на поверхности большого зуба ротора в режимах ХХ и НН	161
12.4.	Анализ устойчивости расчета переменной составляющей магнитной индукции на поверхности ротора	165
12.5.	Анализ переменной составляющей магнитной индукции на поверхности ротора в режиме КЗ	168
12.6.	Сравнительный анализ переменного магнитного поля на поверхности ротора турбогенераторов с разным числом зубцов статора в режиме нагрузки	170
13.	ПРОЕКТНЫЙ СИНТЕЗ ТУРБОГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВЫХ РАСЧЕТОВ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ЧИСЛА ПАЗОВ СТАТОРА	174
13.1.	Постановка задачи	174
13.2.	Базовые величины ТГ, сохраняемые при его модернизации	175
13.3.	Математическая модель синтеза электромагнитной системы ТГ	175
13.3.1.	Модернизация электромагнитной системы ТГ с изменением радиуса расточки сердечника статора	176
13.3.2.	Корректировка ротора с сохранением размеров его пазов	177
13.3.3.	Корректировка ротора с изменением размеров его пазов	177
13.4.	Структура автоматизированной системы синтеза электромагнитной системы ТГ	178
13.5.	Результаты работы программного комплекса синтеза электромагнитной системы ТГ	178
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	181
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	183
	ПРИЛОЖЕНИЯ	191
	Приложение А – КОНСТРУКЦИИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ	191
	Приложение Б – ПРОЦЕДУРЫ – СКРИПТЫ LUA ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ПРОГРАММЕ FEMM	197

Наукове видання

МІЛИХ Володимир Іванович

ЧИСЕЛЬНО-ПОЛЬОВІ РОЗРАХУНКИ І АНАЛІЗ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ
Ї ПРОЦЕСІВ В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ

Російською мовою

Відповідальний за випуск проф. В. І. Мілих
Монографію до видання рекомендував проф. А. М. Борисенко
В авторській редакції

План 2017 р., поз. 21.

Підп. до друку 12.01.2017 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсет.
Друк. цифровий. Гарнітура Bookman Old Style.
Ум. друк. лист. 23,7. Наклад 100 прим. Зам. № 9.

Видавець і виготовлювач: ФОП Панов А. М.
Свідоцтво серії ДК №4847 від 06.05.2015 р.
м. Харків, вул. Жон Мироносиць (Раднаркомівська), 10, оф. 6
тел.+38(057)714-06-74, +38(050) 976-32-87
copi@vlavke.com.ua, <http://vlavke.com.ua>

ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВЫЕ РАСЧЕТЫ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЦЕССОВ В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ

(МОНОГРАФИЯ)

Милых Владимир Иванович

Профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электрические машины» НТУ «Харьковский политехнический институт».

Награжден знаком «Відмінник освіти України». Является членом специализированного ученого совета по защитах диссертаций по специальностям «Электрические машины и аппараты» и «Техника сильных электрических и магнитных полей». Ответственный редактор серии «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії» Вісника НТУ «ХП», руководитель постоянно действующего семинара «Електромагнітні та теплові процеси високовикористаних електричних машин» Наукової ради НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики», соорганизатор ежегодного Международного симпозиума «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» (SIEMA).



Руководитель и ответственный исполнитель ряда хоздоговорных и госбюджетных НИР по тематике тяговых и прокатных электрических машин постоянного тока, асинхронных двигателей, турбогенераторов, а также таких специальных машин, как вентильно-индукторный генератор, линейные импульсные электродвигатели для стартового ускорения летающих объектов и для возбуждения сейсмических колебаний при разведке полезных ископаемых, стартер-генератор для турбин летающих объектов и других разработок.

Автор монографии является автором или соавтором 171 статьи в специализированных научных изданиях, из них 26 проиндексированы в наукометрической базе Scopus, есть еще 140 статей в научных сборниках и тезисах докладов, а также 8 авторских свидетельств. Им издано 2 учебника и 16 учебных пособий.

E-mail: mvikemkpi@gmail.com

Сайт кафедры электрических машин:
<http://web.kpi.kharkov.ua/elmash/>