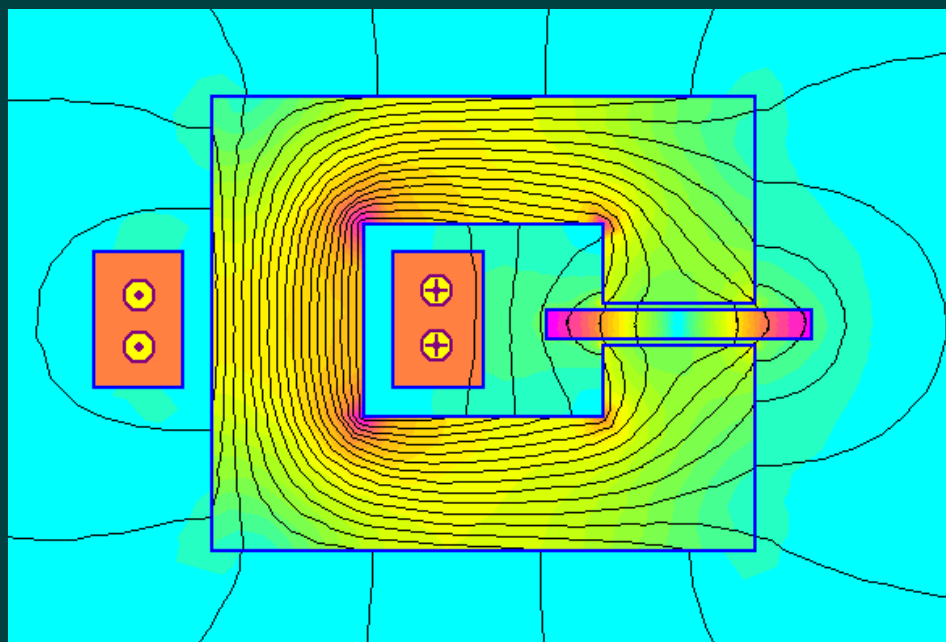


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

В. И. Милых

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

Учебное пособие
для студентов и аспирантов электротехнического профиля



Харьков
НТУ «ХПИ»
2018

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

В. И. Милых

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ПРОЦЕССОВ
В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
электротехнического профиля
для отечественных и иностранных
студентов и аспирантов

Рекомендовано ученым советом НТУ «ХПИ»

Харьков
НТУ «ХПИ»
2018

УДК 621.318.001.24
М75

Рецензенты:

Н. Я. Островецков, проф., д-р техн. наук,
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт» им. Игоря Сикорского;
В. А. Яровенко, проф., д-р техн. наук,
Одесский национальный морской университет

Рекомендовано ученым советом НТУ «ХПИ» как учебное пособие электротехнического профиля, протокол № 8 от 02.11.2018 г.

Розглядаються аналітичні і чисельні методи розрахунків магнітних полів і визначення електромагнітних і силових параметрів електротехнічних пристроїв на цій основі. Викладаються теорія і принципи розрахунку перехідних процесів в нелінійних електромагнітних системах, змінних електромагнітних полів і вихрових струмів. Усе це пристосовано до реальних електротехнічних об'єктів, починаючи від поодинокого провідника і закінчуючи електричними машинами. Ряд тем, що розглядаються, забезпечений прикладами розв'язання задач.

Призначено для вітчизняних й іноземних студентів та аспірантів електротехнічного профілю.

Мильх В. И.

М75 Теория и практика электромагнитных полей и процессов в электротехнике : учебное пособие / В. И. Мильх. – Харьков : ФЛП Панов А. Н., 2018. – 374 с. – На рус. яз.
ISBN 978-617-7722-60-0

Рассматриваются аналитические и численные методы расчетов магнитных полей и определение электромагнитных и силовых параметров электротехнических устройств на этой основе. Излагаются теория и принципы расчета переходных процессов в нелинейных электромагнитных системах, переменных электромагнитных полей и вихревых токов. Все это связано с реальными электротехническими объектами, начиная от одиночного проводника и заканчивая электрическими машинами. Ряд рассматриваемых тем снабжен примерами решения задач.

Предназначено для отечественных и иностранных студентов и аспирантов электротехнического профиля.

Ил. 279. Табл. 9. Библиогр. 76 назв.

УДК 621.318.001.24

ISBN 978-617-7722-60-0

© В. И. Мильх, 2018

© НТУ «ХПИ», 2018

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что принцип действия большинства электротехнических устройств, в том числе трансформаторов, электрических машин и аппаратов, основан на существовании и взаимодействии электрических и магнитных полей. Их работа сопровождается сложными электромагнитными явлениями и процессами. Понимание сути и роли этих полей и процессов, умение их рассчитывать и анализировать являются ключом к пониманию принципа действия, ключом к расчету и проектированию электротехнических устройств. Подготовка к этому студентов – будущих специалистов в областях электроэнергетики, электротехники и электромеханики – является общей целью написания и последующего использования данного учебного пособия.

В целом учебное пособие предназначено для студентов специальности 141 Электроэнергетика, электротехника и электромеханика.

В первую очередь это касается первого уровня высшего образования – бакалаврского. Конкретно – это разделы 1-6 (за исключением отдельных сложных вопросов), а также частично раздел 7. Такой объем материала является основой учебной дисциплины «Теория электромагнитных полей и процессов в электротехнике», которая преподается студентам специализации «Электрические машины».

Эта дисциплина введена вместо третьей части классического курса «Теоретические основы электротехники», которая обычно имеет название «Теория электромагнитного поля» или «Электромагнитное поле».

Безусловно, названная часть ТОЭ может дать фундаментальную теоретическую подготовку студентов и разных

специалистов. Но в пределах свойственного нынешним учебным программам ограниченного времени обучения будущих инженеров, а также в современных вызовах его сути, важнее становится готовность к решению конкретных задач практического направления. И при этом актуальными становятся такие методы расчета электромагнитных полей, параметров и процессов в электротехнических устройствах, которые ориентированы на применение компьютеров. То есть средства чистой теории и выход на аналитические решения простых задач, на которые способен классический курс ТОЭ, становятся все менее востребованными. В принципе можно сказать, что место аналитических решений уже заняли компьютерные программы на разных алгоритмических языках, а также численные методы расчеты на основе распространенных программных комплексов.

Все учебное пособие полностью подходит и для подготовки магистров и аспирантов отмеченной специальности, для которых излагаются учебные дисциплины «Основы научных исследований», «Численные методы расчета электромагнитных параметров и характеристик электрических машин», «Автоматизированные компьютерные расчеты электромагнитных параметров и процессов электрических машин в программной среде FEMM». Учебное пособие также может быть полезным для инженерно-технических работников и ученых, которые готовятся и затем работают в отрасли 14 Электрическая инженерия.

Основой изучения материала учебного пособия является предшествующее усвоение таких учебных дисциплин, как высшая математика, общая физика, информатика, теоретические основы электротехники (части 1 и 2) и электроматериаловедение.

Целью использования учебного пособия является получение теоретических знаний и практических умений, навыков и других компетентностей, достаточных для понимания процессов и решения комплексных проблем в отрасли электрической инженерии по специальности 141 Электроэнергетика, электротехника и электромеханика, в частности, по образовательным программам специализаций «Электрические машины» и «Электрические аппараты».

Среди **компетентностей**, которые приобретают будущие специалисты, изучающие названные выше дисциплины, можно выделить:

- способность к теоретическому обоснованию принятых решений в процессе выполнения проектно-конструкторских и исследовательских работ в пределах своего рода занятий на уровне специалиста с квалификацией от первого и выше циклов высшего образования в отрасли электрической инженерии;
- способность использовать современные методы расчетов, моделирования и анализа режимов работы электроэнергетического, электротехнического и электромеханического оборудования и проектирования электроэнергетических и электромеханических систем;
- способность определять рациональные методы расчета электромагнитных полей, параметров и процессов в электрических машинах и электрических аппаратах.

Среди **результатов** обучения должно быть умение:

- анализировать процессы в электроэнергетическом, электротехническом и электромеханическом оборудовании и соответствующих комплексах и системах;
- совершенствовать навыки работы с современным оборудованием и программным обеспечением при выполнении расчетов режимов работы электроэнергетического, электротехнического и электромеханического оборудования, соответствующих комплексов и систем;
- знать теоретические основы получения ряда электромагнитных параметров электротехнических устройств на основе расчета электромагнитных полей;
- знать особенности физических процессов и характеристик, которые сопровождают работу электрических машин и аппаратов;
- знать и использовать программные комплексы для исследования электромагнитного поля и электромагнитных расчетов электрических машин и аппаратов.

Принцип изложения материала в учебном пособии – переход от простых электротехнических объектов к все более сложным, от

простых конфигураций магнитных полей к все более сложным, от однородных линейных магнитных сред к неоднородным и нелинейным, от рассмотрения статических магнитных полей и электромагнитных параметров электротехнических устройств, определяемых на их основе, к сложным динамическим электромагнитным процессам в таких устройствах.

В **первом разделе** даются общие понятия об электромагнитных полях и их расчетах на уровне знаний, приобретенных в курсе физики, а также представляются характеристика задач расчета магнитного поля и общие принципы анализа электромагнитных полей математическим моделированием.

Во **втором разделе** изучаются магнитные поля в однородных средах, начиная с простых объектов с током, таких как бесконечно длинные проводники круглого сечения, и переходя постепенно к все более сложным, таким как длинные шины прямоугольного поперечного сечения, прямолинейный проводник конечной длины, прямоугольный контур с током, прямоугольные катушки, коаксиальный кабель, торообразная катушка, соленоид относительно большой длины, круговой виток и круглые катушки с током.

В **третьем разделе** наступает очередь магнитных полей в неоднородных средах. Здесь, начиная от граничные условия для магнитного поля на разделе разнородных сред, делается естественный переход к методу зеркальных отражений, а затем к классическому расчету магнитных полей методом магнитной цепи.

В **четвертом разделе** рассматривается система уравнений электромагнитного поля Максвелла и их использование в линейных средах. Проводится оперирование с этими уравнениями в разной форме с разбором частных случаев этого поля. Уравнения связываются с законами электромагнетизма. Вводятся понятия скалярного и, что особенно важно, векторного магнитного потенциала, показываются принципы оперирования с ним.

В **пятом разделе** даются методы расчета магнитного поля в неоднородных нелинейных средах. И здесь наиболее важным

является рассмотрение численных методов расчета, таких как метод конечных разностей и метод конечных элементов. Наряду с теорией этих методов представляются практические аспекты их применения.

В **шестом разделе**, который можно считать одним из важнейших, рассматриваются принципы определения электромагнитных и силовых параметров электротехнических устройств на основе расчетов магнитных полей. Речь идет о магнитном потоке, магнитном потокосцеплении, магнитных характеристиках электротехнических устройств, падении магнитного напряжения, магнитных проводимости и сопротивления, об индуктивности и взаимоиндуктивности, энергии магнитного поля, силовых проявлениях магнитного поля, об определении ЭДС в проводниках и обмотках.

В **седьмом разделе** изучаются численные расчеты переходных процессов в нелинейных электромагнитных системах. Основное внимание уделяется методу Рунге-Кутты IV порядка и показывается принципы исследования и практическая реализация расчета динамического рабочего режима линейного импульсного электродвигателя.

В **восьмом разделе** рассматривается достаточно сложная теория переменных электромагнитных полей и принципы их расчета. Среди прочего важным является ознакомление с такими понятиями и величинами, как уравнения Максвелла в комплексной форме записи, теорема Умова-Пойнтинга, уравнения Максвелла для проводящей среды, плоская электромагнитная волна и глубина ее проникновения в электропроводящую среду, магнитный поверхностный эффект.

В **девятом разделе** рассматриваются теоретические положения и практические аспекты расчетов вихревых токов в электропроводящих элементах конструкции электротехнических устройств. И здесь проводится последовательное представление соответствующих задач все увеличивающегося уровня сложности: анализ вихревых токов без учета их реакции, цепно-полевой метод анализа с учетом реакции, анализ вихревых токов в идеализированном экране, анализ гармонических электромагнитных процессов с реалистичным учетом реакции вихревых токов.

Представленный в разделах учебный материал демонстрируется и иллюстрируется на примерах решения конкретных научно-практических задач.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ И ИХ РАСЧЕТАХ.....	10
1.1. Основы электромагнитных явлений.....	10
1.2. Электрическое поле: порождение, формальное представление и описывающие величины.....	11
1.3. Магнитное поле: порождение, формальное представление и описывающие величины.....	14
1.4. Электрический ток.....	18
1.5. Законы электромагнетизма, относящиеся к электромагнитным полям	18
1.6. Характеристика задач расчета магнитного поля.....	21
1.7. Расчетный принцип наложения магнитных полей.....	24
1.8. Общие принципы анализа электромагнитных полей математическим моделированием.....	25
2. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ.....	29
2.1. Исходные замечания.....	29
2.2. Магнитное поле бесконечно длинного проводника круглого сечения.....	30
2.3. Векторное представление магнитного поля бесконечно длинного проводника круглого сечения	32
2.4. Магнитное поле двух и более бесконечно длинных проводников круглого сечения.....	34
2.5. Магнитное поле длинной шины прямоугольного поперечного сечения.....	37
2.6. Программа расчета магнитного поля длинной шины прямоугольного поперечного сечения.....	41
2.7. Магнитное поле системы длинных шин прямоугольного сечения.....	44
2.8. Магнитные поля проводников конечной длины.....	47
2.8.1. Закон Био-Савара-Лапласа – основа расчета магнитного поля проводников конечной длины.....	47
2.8.2. Магнитное поле прямолинейного проводника конечной длины с током в однородном пространстве.....	48
2.9. Векторное представление магнитного поля проводника конечной длины.....	51
2.9.1. Проводник расположен параллельно оси $O-z$	52
2.9.2. Проводник расположен параллельно оси $O-x$	54
2.10. Магнитные поля объектов конечных размеров с прямоугольной структурой.....	55
2.10.1. Магнитное поле прямоугольного контура с током.....	55
2.10.2. Магнитное поле прямоугольной катушки с током.....	59
2.10.3. Магнитное поле совокупности прямоугольных катушек..	64

2.11.	Магнитные поля объектов с круглой структурой.....	64
2.11.1.	Магнитное поле коаксиального кабеля.....	64
2.11.2.	Магнитное поле торообразной катушки.....	66
2.11.3.	Оценочная формула для магнитного поля в середине соленоида относительно большой длины.....	67
2.11.4.	Магнитное поле на оси кругового витка с током.....	68
2.11.5.	Магнитное поле на оси круглой катушки с током.....	70
3.	МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ.....	75
3.1.	Исходные положения.....	75
3.2.	Граничные условия для магнитного поля на разделе двух сред с разными магнитными свойствами.....	75
3.2.1.	Граничное условие для магнитной индукции на разделе двух сред.....	76
3.2.2.	Граничное условие для напряженности магнитного поля на разделе двух сред.....	77
3.2.3.	Условия преломления силовых линий магнитного поля на границе раздела сред.....	79
3.3.	Метод зеркальных отражений для расчета магнитного поля в неоднородных средах.....	79
3.3.1.	Исходные замечания.....	79
3.3.2.	Расчет магнитного поля вблизи плоской границы раздела сред.....	80
3.3.3.	Особенности метода зеркального отражения в случае разных границ раздела разнородных магнитных сред	84
3.4.	Расчеты электромагнитных параметров методом магнитной цепи.....	87
3.4.1.	Понятие о магнитных цепях и их однородных участках	87
3.4.2.	Законы магнитных цепей.....	91
3.4.2.1	Закон Ома для магнитной цепи.....	91
3.4.2.2	Первый закон Кирхгофа для магнитной цепи.....	92
3.4.2.3	Второй закон Кирхгофа для магнитной цепи.....	92
3.4.3.	Задачи расчета магнитных цепей постоянного магнитного потока.....	94
3.4.4.	Прямая задача расчета магнитной цепи.....	95
3.4.5.	Обратная задача расчета магнитной цепи.....	97
3.4.5.1	Графоаналитический метод.....	97
3.4.5.2	Метод последовательных приближений.....	97
3.5.	Представление кривой намагничивания при компьютерных расчетах.....	100
3.6.	Программный алгоритм решения обратной задачи расчета магнитной цепи	101
3.7.	Особые случаи определения параметров участков магнитных цепей.....	103
3.7.1.	Магнитное напряжение на участке со слоистой структурой.....	103
3.7.2.	Магнитное напряжение зазора, ограниченного зубчатой структурой.....	105

4.	СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ МАКСВЕЛЛА И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ.....	109
4.1.	Система уравнений Максвелла для электромагнитного поля	109
4.2.	Частные случаи электромагнитного поля.....	111
4.2.1.	Электростатическое и квазистационарное электрическое поле в диэлектрике.....	111
4.2.2.	Магнитостатическое и квазистационарное магнитное поле при отсутствии вихревых токов.....	111
4.2.3.	Переменное магнитное поле в проводящей среде	112
4.2.4.	Поле электрических токов в проводящей среде.....	113
4.3.	Взаимосвязь электрического и магнитного полей – единое электромагнитное поле.....	114
4.4.	Аналогия между основными уравнениями системы Максвелла и уравнениями электромагнетизма.....	115
4.4.1.	Закон непрерывности силовых линий магнитного поля	115
4.4.2.	Закон полного тока.....	116
4.4.3.	Закон электромагнитной индукции.....	116
4.5.	Понятие о вихревых и потенциальных полях.....	117
4.6.	Выражение уравнения магнитного поля через скалярный магнитный потенциал.....	118
4.7.	Выражение уравнения магнитного поля через векторный магнитный потенциал.....	120
4.8.	Общее решение уравнения Пуассона в однородной среде через векторный магнитный потенциал.....	123
4.9.	Выражение составляющих магнитной индукции через векторный магнитный потенциал.....	124
4.10.	Частные случаи уравнений магнитного поля, выраженных через векторный магнитный потенциал в однородной линейной среде.....	126
4.11.	Магнитное поле кругового витка с током, расположенного в немагнитной среде.....	127
4.12.	Принципы расчета магнитного поля круглой катушки и совокупности таких катушек.....	131
4.13.	Расчет магнитного поля методом разделения переменных.....	133
4.13.1.	Объект исследования и принятые допущения.....	133
4.13.2.	Математическая модель магнитного поля в чередующейся кольцевой структуре.....	135
4.13.3.	Метод решения задачи расчета магнитного поля в чередующейся кольцевой структуре.....	136
4.13.4.	Определение коэффициентов – постоянных интегрирования для уравнений, описывающих магнитное поле	138

5.	РАСЧЕТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В НЕОДНОРОДНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ.....	142
5.1.	Уравнения, описывающие магнитное поле в неоднородной нелинейной среде.....	142
5.2.	Общее представление о численных методах расчета магнитных полей. Дискретизация среды области расчета.....	143
5.3.	Представление производных векторного магнитного потенциала в конечно-разностной форме....	147
5.4.	Конечно-разностные выражения составляющих и модуля магнитной индукции.....	148
5.5.	Преобразование дифференциального уравнения магнитного поля в конечно-разностное алгебраическое уравнение.....	149
5.6.	Общие принципы расчета магнитного поля методом конечных разностей.....	154
5.7.	Программное построение процесса расчета магнитного поля методом конечных разностей.....	158
5.7.1.	Решение системы алгебраических уравнений, связывающих векторный магнитный потенциал в сеточной структуре.....	158
5.7.2.	Способы ускорения завершения итерационного процесса расчета распределения векторного магнитного потенциала	160
5.7.3.	Критерии завершения итерационного процесса расчета векторного магнитного потенциала.....	161
5.7.4.	Итерационный метод учета нелинейных магнитных свойств ферромагнетиков при численном расчете магнитных полей.....	162
5.7.5.	Критерии завершения итерационного процесса пересчета магнитных свойств ферромагнетиков.....	164
5.8.	Алгоритм расчета магнитного поля методом конечных разностей с учетом нелинейных магнитных свойств среды.....	164
5.9.	Программная реализация алгоритма расчета магнитного поля методом конечных разностей.....	166
5.10.	Метод конечных разностей для плоскопараллельного магнитного поля в полярной системе координат.....	174
5.10.1.	Исходные уравнения магнитного поля.....	174
5.10.2.	Особенности использования полярной сеточной модели при расчете магнитного поля методом конечных разностей.....	175
5.10.3.	Конечно-разностная аппроксимация выражений магнитной индукции в полярной системе координат.....	180
5.11.	Особенности использования метода конечных разностей при расчете плоскомеридианного магнитного поля	180

5.12.	Метод конечных элементов для расчета магнитных полей.....	186
5.12.1.	Основы метода конечных элементов.....	186
5.12.2.	Программные продукты для расчета магнитных полей на основе метода конечных элементов.....	190
5.12.3.	Примеры расчета двухмерных магнитных полей в поперечных сечениях электрических машин методом конечных элементов по программе FEMM.....	192
5.13.	Условия симметрии и ограничение области расчета.....	197
5.14.	Граничные условия в электрической машине при расчетах магнитных полей.....	199
5.15.	Примеры использования граничных условий в электрических машинах при расчетах магнитных полей.....	201
5.16.	Адаптация плоскопараллельной модели магнитного поля для расчетов электрических машин с неоднородностью силовых длин участков магнитопровода.....	208
5.16.1.	Исходные замечания и объект для расчетных демонстраций.....	208
5.16.2.	Тестовые расчеты ДПТ по программе FENN и сравнение их с экспериментальными данными.....	209
5.16.3.	Метод учета различных аксиальных длин участков магнитопровода при численных расчетах магнитных полей.....	211
5.16.4.	Расширение возможностей FEMM: частный принцип учета различных аксиальных длин участков магнитопровода.....	215
5.16.5.	Результаты расчетов по программе FEMM с расширенными возможностями.....	217
6.	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТОВ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ.....	222
6.1.	Итоговая информация о магнитном поле после его расчета.....	222
6.2.	Расчеты магнитного потока.....	223
6.2.1.	Принципы расчета магнитного потока через распределение магнитной индукции.....	223
6.2.2.	Принципы расчета магнитного потока через распределение векторного магнитного потенциала.....	225
6.3.	Принципы расчета магнитного потокосцепления.....	226
6.4.	Магнитные характеристики электротехнических устройств.....	228
6.5.	Расчет падения магнитного напряжения по результатам расчета магнитного поля.....	229

6.6.	Расчет магнитной проводимости и магнитного сопротивления для магнитного поля катушки.....	230
6.7.	Индуктивности и взаимоиндуктивности: определение по результатам расчета магнитного поля.....	230
6.8.	Принципы расчета энергии магнитного поля (линейный и нелинейный случаи).....	233
6.9.	Удельная энергия магнитного поля.....	235
6.10.	Принципы расчета механических сил, порожденных магнитным полем.....	236
6.10.1.	Силовое взаимодействие прямолинейных проводников.	237
6.10.2.	Сила, действующая на шину с током, расположенную в магнитном поле.....	238
6.11.	Сила, действующая на сектор обмотки с кольцеобразным сечением, расположенной в магнитном поле.....	239
6.12.	Общий случай силового взаимодействия токонесущих контуров или катушек.....	240
6.13.	Силовое воздействие магнитного поля на ферромагнитный сердечник через магнитную энергию по построенным магнитным характеристикам.....	242
6.14.	Силовое воздействие магнитного поля на ферромагнитный сердечник через магнитную индукцию в зазоре.....	243
6.15.	Электромагнитный момент, действующий на обмотку, расположенную в зазоре электрической машины	243
6.16.	Определение сил через тензор магнитного натяжения....	245
6.17.	Электромагнитный момент, действующий на ротор с обмоткой, расположенной в пазах сердечника электрической машины.....	246
6.18.	Базовые выражения для определения ЭДС.....	248
6.19.	Принципы расчета ЭДС обмотки, расположенной в зазоре электрической машины.....	250
6.20.	Принципы расчета ЭДС обмотки, расположенной в пазах сердечника.....	252
6.21.	Принципы расчета гармонического состава ЭДС по результатам расчета магнитного поля.....	255
6.22.	Другие возможности определения параметров электротехнических устройств на основе расчетов магнитных полей	256
7.	ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМАХ....	259
7.1.	Общая постановка задачи расчета переходного процесса в нелинейной электромагнитной системе.....	259
7.2.	Общий принцип численного решения нелинейных дифференциальных уравнений.....	261

7.3.	Алгоритм расчета переходного процесса при подключении катушки индуктивности к источнику постоянного напряжения.....	263
7.4.	Принцип численного определения производной методом Рунге-Кутты IV порядка.....	264
7.5.	Сравнительное решение линеаризованной задачи расчета переходного процесса.....	266
7.6.	Исследование динамического рабочего режима линейного импульсного электродвигателя.....	270
7.6.1.	Представление объекта исследования и постановка задачи.....	270
7.6.2.	Математическая модель ЛИЭД при последовательном соединении обмоток.....	271
7.6.3.	Оперирование с двухпараметрическими функциями.....	276
7.6.4.	Алгоритм расчета ударного режима работы ЛИЭД.....	279
7.6.5.	Тестовый расчет динамики работы ЛИЭД.....	283
8.	ПЕРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ПРИНЦИПЫ ИХ РАСЧЕТА.....	285
8.1.	Определение переменного электромагнитного поля.....	285
8.2.	Уравнение непрерывности.....	286
8.3.	Уравнения Максвелла в комплексной форме записи.....	286
8.4.	Теорема Умова-Пойнтинга для мгновенных значений....	287
8.5.	Теорема Умова-Пойнтинга в комплексной форме записи.....	289
8.6.	Уравнения Максвелла для проводящей среды.....	290
8.7.	Плоская электромагнитная волна.....	291
8.8.	Распространение плоской электромагнитной волны в однородном проводящем полупространстве.....	293
8.9.	Глубина проникновения и длина волны.....	295
8.10.	Магнитный поверхностный эффект.....	296
8.11.	Распределение тока в прямоугольной шине, находящейся в пазу ферромагнитного сердечника.....	298
8.12.	Поверхностный эффект в цилиндрическом проводе.....	299
9.	ВИХРЕВЫЕ ТОКИ В ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ.....	304
9.1.	Общие замечания относительно расчетов вихревых токов.....	304
9.2.	Расчетный анализ вихревых токов без учета их реакции.....	305
9.2.1.	Теоретические основы расчета вихревых токов без учета их реакции.....	305
9.2.2.	Принципы конечно-разностной реализации расчета вихревых токов без учета их реакции.....	308
9.2.3.	Принципы расчета вихревых токов без учета их реакции методом конечных элементов на основе электромагнитной аналогии	314
9.3.	Цепно-полевой метод анализа вихревых токов	319

9.3.1.	Общий подход к анализу вихревых токов с использованием цепно-полевой расчетной модели.....	319
9.3.2.	Расчет вихревых токов в обмотке якоря машины постоянного тока в режиме холостого хода.....	323
9.4.	Анализ вихревых токов в идеализированном экране.....	340
9.4.1.	Общий подход к анализу вихревых токов с идеализацией свойств электромагнитного экрана.....	340
9.4.2.	Анализ вихревых токов в экране системы возбуждения криодвигателя постоянного тока.....	343
9.5.	Анализ гармонических электромагнитных процессов с реалистичным учетом реакции вихревых токов	345
9.5.1.	Общие замечания относительно обусловленного анализа.....	345
9.5.2.	Теоретические основы расчета гармонических электромагнитных процессов с учетом вихревых токов.....	346
9.5.3.	Расчетный анализ гармонического магнитного поля и индуцируемых вихревых токов.....	348
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	352
	ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....	358
	Приложение А	
	Формулы векторной алгебры и векторного анализа.....	361
	Приложение Б	
	Системы координат и ориентация векторного поля.....	362
	Приложение В	
	Общее выражение для эллиптических интегралов.....	364
	Приложение Г	
	Электромагнитные параметры через магнитное поле, рассчитанное МКР в полярной системе координат.....	365

Навчальне видання

МІЛИХ Володимир Іванович

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ
ТА ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК
електротехнічного профілю для вітчизняних
й іноземних студентів та аспірантів

Російською мовою

Відповідальний за випуск проф. В. І. Мілих
Навчальний посібник до видання рекомендував

проф. А. М. Борисенко

В авторській редакції

План 2018 г., поз. 135

Підп. до друку 12.11.2018 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсет.
Друк. цифровий. Гарнитура Bookman Old Style.
Ум. друк. лист. 21,7. Наклад 100 прим. Зам. № 1/12/2018.

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>

Довідка про автора
навчального посібника

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ТА ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ

Міліх Володимир Іванович, професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри «Електричні машини» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».



Є висококваліфікованим науково-педагогічним фахівцем, членом спеціалізованих вчених рад з захисту дисертацій, відповідальним редактором серії «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії» Збірнику наукових праць Вісник НТУ «ХП».

Нагороджений знаком «Відмінник освіти України».

Є автором або співавтором двох підручників, 17 навчальних посібників, монографії, 181 статті в спеціалізованих наукових виданнях, з них індексовані в наукометричних базах Scopus – 31 та Web of Science –

7, а загалом має 335 наукових статей та 8 авторських свідоцтв.

Сайт кафедри електричних машин:
<http://web.kpi.kharkov.ua/elmash/>

E-mail: mvikemkpi@gmail.com