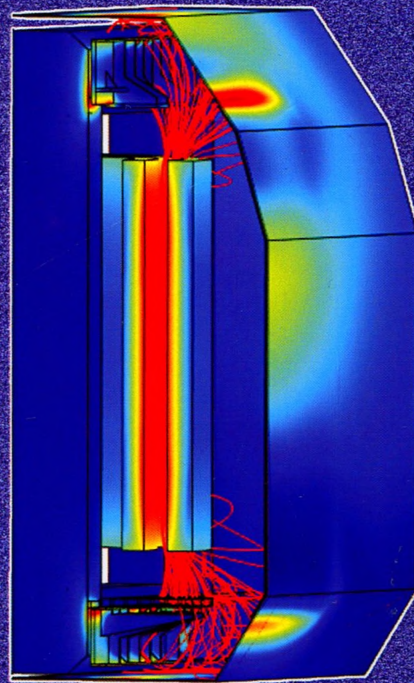


621.31
У-19

В.Ф. ІВАНКОВ А.В. БАСОВА І.В. ХІМЮК

МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТА РЕАКТОРІВ



НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

В. Ф. Іванков, А. В. Басова, І. В. Хімюк

**МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ
ТРАНСФОРМАТОРІВ
ТА
РЕАКТОРІВ**

**КИЇВ
2017**

УДК 621.31:621.3.01
ББК 31.27:34.41

Рецензента:

Л. І. Мазуренко, д-р техн. наук, професор,
Київський національний університет будівництва та архітектури
М. В. Мислович, д-р техн. наук, професор,
Інститут електродинаміки НАН України

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Інституту електродинаміки Національної академії наук України.
Протокол №8 від 15 червня 2017 року.*

Методи моделювання трансформаторів та реакторів:

Монографія / В. Ф. Іванков, А. В. Басова, І. В. Хімюк. –
К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2017. – 490 с.
ISBN 978-966-02-8297-1

У монографії розглянуто аналітичні та чисельні методи розрахунку електромагнітних, теплових та механічних процесів у силових трансформаторах та реакторах. Основну увагу приділено методології розрахунків і досліджень, у тому числі систематизації шляхів створення науково обґрунтованих методів, необхідних для практики. Наведено аналітичні розв'язки краєвих задач електромагнітного поля, що використовуються при дослідженнях втрат на вихрові струми в елементах конструкції трансформаторного устаткування. Представлено аналітичні та чисельні методи моделювання індуктивностей, розподілу струмів провідності в складних схемах обмоток трансформаторів та в замкнених електромагнітних екранах реакторів. Наведено методи та приклади чисельного моделювання полів температур в активних частинах трансформаторів і реакторів та швидкостей масла в обмотках трансформаторів та реакторів, а також методи та результати моделювання електричного поля і механічних процесів. Більшість з них проілюстровано розрахунками конкретного устаткування, а також верифіковано експериментальними дослідженнями. Представлено впровадження розроблених методів моделювання в систему автоматизованого проектування силових трансформаторів та електричних реакторів САПР ТЕР.

Для наукових співробітників, інженерів, а також викладачів, аспірантів і студентів вищих навчальних закладів, які цікавляться питаннями моделювання силового трансформаторного устаткування.

ISBN 978-966-02-8297-1

© Іванков В. Ф., Басова А. В., Хімюк І. В., 2017
© Інститут електродинаміки НАН України, 2017

ЗМІСТ

Список скорочень	8
Передмова	9
Розділ 1. Конструкція трансформаторів та реакторів, фізичні процеси, задачі моделювання та основні рівняння	13
1.1. Конструкція, фізичні процеси, задачі моделювання	14
1.2. Рівняння електромагнітного поля	19
1.3. Втрати електроенергії в провідниках та сталях	31
1.4. Рівняння гідравліки та теплообміну	37
Література до розділу 1	40
Розділ 2. Аналітичні однострижневі моделі магнітного поля трансформаторів та реакторів	45
2.1. Опис однострижневих моделей	48
2.2. Розв'язки крайових задач для магнітного поля замкнених моделей	50
2.3. Визначення складових індукції магнітного поля замкнених моделей	60
2.4. Магнітне поле відкритих моделей	65
2.5. Визначення магнітного поля моделей з дискретними феромагнетиками	68
2.6. Застосування однострижневої циліндричної моделі до синтезу сил намагнічування випробувального трансформаторного пристрою	73
2.7. Розрахунки магнітного поля однострижневих моделей	78
2.8. Визначення інтегральних характеристик магнітного поля в обмотках	81
Література до розділу 2	82
Розділ 3. Аналітичні тривимірні моделі магнітного поля трансформатора	87
3.1. Опис чисельно-аналітичних тривимірних моделей трансформатора без бака і з баком	88
3.2. Скомпенсоване вісесиметричне поле окремого стрижня і безвихрове поле поза системою феромагнітних циліндрів	89
3.3. Безвихрове поле поза системою феромагнітних циліндрів	90
3.4. Магнітне поле багатострижневої моделі трансформатора без бака	93
3.5. Модель трансформатора із прямокутним баком	96
3.6. Розрахунок магнітного поля квазітривимірних моделей трансформатора та реактора	103
Література до розділу 3	105

Розділ 4. Чисельне моделювання електромагнітних параметрів трансформаторів та реакторів	107
4.1. Основи методу скінченних елементів для електромагнітних розрахунків та припущення при його практичному застосуванні	108
4.2. Верифікація процедур чисельного моделювання електромагнітного поля і втрат у немагнітній і феромагнітній сталі	114
4.3. Основні підходи до розробки чисельних електромагнітних моделей трансформаторного устаткування	118
Література до розділу 4	127
Розділ 5. Аналітичні методи розрахунку вихрових струмів і втрат в елементах конструкції з немагнітної сталі	131
5.1. Математична постановка крайових задач	133
5.2. Модель нескінченної немагнітної пластини	137
5.3. Контактні немагнітні і феромагнітні нескінченні пластини	139
5.4. Немагнітна пластина в кусково-періодичному магнітному полі	141
5.5. Прямокутна пластина з круговими вирізами	146
5.6. Нескінченна пластина з круговим вирізом	151
5.7. Система контактних пластин з круговими вирізами і феромагнітними пакетами на їх поверхні	154
5.8. Суцільна немагнітна пластина, що контактує з феромагнітними ділянками	156
Література до розділу 5	158
Розділ 6. Розрахунок індуктивностей і струмів провідності в обмотках та в замкнених провідних екранах	161
6.1. Розрахунок індуктивностей трансформаторів і реакторів на основі замкненої циліндричної моделі	162
6.2. Формування і розв'язок комплексних систем рівнянь для схем заміщення з активно-індуктивними параметрами	164
6.3. Розрахунок струмів провідності в обмотках трансформатора із фольги	166
6.4. Струми провідності в обмотках реакторів із фольги	171
6.5. Дослідження розподілу струмів I втрат в замкнених провідних екранах реактора без сталі	172
6.6. Розрахунок індуктивності і вольт-амперної характеристики статичного шунтувального реактора	176
6.7. Розрахунок індуктивності шунтувального реактора з регулюванням під навантаженням	185
6.8. Використання замкненої циліндричної моделі при дослідженні насичення стрижня магнітної системи трансформатора	188
Література до розділу 6	192

Розділ 7. Розрахунок втрат в баках від магнітного поля обмоток	195
7.1. Основні припущення і підходи до розрахунку магнітного поля, втрат в баках чисельно-аналітичними методами	197
7.2. Розрахунок магнітного поля в повітрі по контуру бака на основі квазітривимірних розрахункових моделей	199
7.3. Розрахунок магнітного поля і втрат в баку без магнітних екранів	201
7.4. Розрахунок поля і втрат в баках з урахуванням магнітних екранів	203
7.5. Приклади чисельно-аналітичних розрахунків втрат в баках	203
7.6. Розрахунок втрат в ділянках бака реактора з немагнітної сталі	206
7.7. Розрахунок магнітного поля і втрат в баках методом скінченних елементів	207
Література до розділу 7	212
Розділ 8. Розрахунок втрат в частинах баків від магнітного поля багатоамперних відведень	215
8.1. Фізичні і розрахункові моделі для дослідження вихрових струмів та втрат в баку від відведень	217
8.2. Зниження втрат в кришці бака електромагнітним контуром	224
8.3. Числове моделювання втрат і нагріву в кришці бака трансформатора	231
8.4. Дослідження вихрових струмів, втрат та нагріву в кожухах відведень	236
Література до розділу 8	239
Розділ 9. Розрахунок втрат в елементах конструкції активних частин	241
9.1. Визначення електромагнітного поля для розрахунку втрат в елементах конструкції	244
9.2. Аналітичний розрахунок втрат в ярмовій балці з немагнітної сталі	246
9.3. Чисельний поетапний розрахунок втрат та нагріву в ярмовій балці з немагнітної сталі	249
9.4. Розрахунок втрат в пресувальних кільцях та в ярмових балках з феромагнітної сталі	251
9.5. Немагнітні пресувальні пластини на стрижнях магнітних систем	253
9.6. Крайні пакети стрижнів магнітних систем	259
9.7. Електростатичний екран	260
9.8. Розрахунок втрат в пресувальних кільцях з немагнітної сталі	261
9.9. Синтез сил намагнічування при мінімізації втрат в провідному півпросторі	267

9.10. Моделювання нелінійними схемами заміщення ділянок стиків пластин в магнітній системі трансформатора	271
9.11. Сумарні додаткові втрати в елементах конструкції	276
Література до розділу 9	277
Розділ 10. Розрахунки нагріву масла, тепловіддачі елементів конструкції, нагріву обмоток з фольги та сухих трансформаторів	281
10.1. Інженерний розрахунок комбінованої масляної системи охолодження трансформаторів	283
10.2. Визначення коефіцієнтів тепловіддачі з поверхонь елементів конструкції	291
10.3. Теплова модель нагріву масла в вертикальному каналі	296
10.4. Розрахунок нагріву обмоток з фольги та стрічки методом розділення змінних	300
10.5. Розрахунок зв'язаного нагріву магнітної системи та обмоток трансформатора з повітряно-бар'єрною ізоляцією	304
Література до розділу 10	316
Розділ 11. Теплові розрахунки елементів конструкції	319
11.1. Аналітичні моделі нагріву пресувальних пластин і крайніх пакетів магнітних систем	321
11.2. Аналітичні методи розрахунку нагріву внутрішніх пакетів магнітних систем	330
11.3. Оцінки нагріву електростатичних екранів	340
11.4. Метод скінченних елементів для розрахунку нагріву пресувального кільця з немагнітної сталі	343
11.5. Чисельні розрахунки нагріву пресувальної пластини і крайніх пакетів магнітних систем	346
11.6. Розрахунки нагріву частин магнітних систем трансформаторів та реакторів методом скінченних елементів	347
11.7. Верифікація чисельного теплового розрахунку ярмових балок	352
Література до розділу 11	354
Розділ 12. Моделювання гідродинаміки та теплообміну	357
12.1. Основні підходи до моделювання гідродинаміки та теплообміну трансформаторів і реакторів	360
12.2. Комплексні теплові моделі трансформаторів та реакторів	368
12.3. Приклади розрахунків теплових моделей автономних обмоток	371
12.4. Зв'язана електромагнітна і теплова модель реактора без сталі	375
Література до розділу 12	380
Розділ 13. Моделювання електричних полів	383
13.1. Методи розрахунку електростатичного поля	386
13.2. Опис моделей головної ізоляції для методу інтегральних рівнянь	389

13.3. Приклади розрахунку вісесиметричних скінченноелементних моделей головної ізоляції	397
13.4. Двовимірні скінченноелементні моделі установок введення	399
13.5. Двовимірні скінченноелементні моделі відведень	401
13.6. Розрахунок електричного поля в тривимірних чисельних моделях відведень	402
Література до розділу 13	405
Розділ 14. Методи моделювання механічних процесів	407
14.1. Моделювання системи обмоток трансформатора при дії осьових сил короткого замикання	411
14.2. Чисельне моделювання міцності обмоток, деталей активної частини та баку	421
14.3. Чисельне дослідження магнітопружних деформацій в магнітній системі трансформатора	430
14.4. Емпірико-аналітичний метод розрахунку шуму силових трансформаторів	436
14.5. Вібрації бака шунтувального реактора	443
14.6. Розрахунково-експериментальна оцінка сейсмостійкості	446
Література до розділу 14	448
Розділ 15. Моделювання трансформаторів та реакторів в системі автоматизованого проектування САПР ТЕР	453
15.1. Структура та функції розрахункової підсистеми	457
15.2. Синтез і параметрична оптимізація шунтувальних реакторів	458
15.3. Параметрична оптимізація силових трансформаторів	465
15.4. Програмно-методичні комплекси розрахункової підсистеми	468
15.5. Графічні пре - та постпроцесори розрахункових програм	475
15.6. Інформаційно-пошукові системи	476
15.7. Інтегрування з системою тривимірного конструювання	480
Література до розділу 15	483