

И.А. Черданцев

Теория переменных токов

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
И11

И11 **И.А. Черданцев**
Теория переменных токов / И.А. Черданцев – М.: Книга по Требованию, 2021. – 500 с.

ISBN 978-5-458-47344-6

Теория переменных токов. Издание третье. Переработанное и дополненное, с задачами и примерами.

ISBN 978-5-458-47344-6

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

	<i>Стр.</i>
§ 16. Среднее значение. Длина вектора и масштаб	61
§ 17. Средняя за период мощность в цепи переменного тока	63
§ 18. Кривые мгновенных мощностей	66
§ 19. Зависимость средней мощности от других величин в цепи	72
§ 20. Диаграмма Беделя и Крехора	77
§ 21. „Падение“ напряжения и „потеря“ напряжения в проводах линии передачи энергии	78

глава V

Емкость в цепи переменного тока

§ 22. Закон Ома для цепи, содержащей ваттное сопротивление и емкость	81
§ 23. Мощность в цепи с емкостью	87
§ 24. Закон Ома для цепи, содержащей ваттное сопротивление, самоиндукцию и емкость	83
§ 25. Резонанс напряжений	93
§ 26. Разложение силы тока на ваттную и безваттную составляющие. Проводимости	101

глава VI

Метод комплексных величин или символический

§ 27. Основные понятия	105
§ 28. Символическое обозначение векторов и действия с ними	109
§ 29. Простейшие примеры приложений метода	114
§ 30. Замечания о выражении мощности, $\cos \varphi$, о дифференцировании векторов и о символических обозначениях, отличных от описанных	118

глава VII

Сложные цепи переменного тока

§ 31. Соотношения в синхронном генераторе	122
§ 32. Разветвляющиеся цепи	123
§ 33. Значение компенсации сдвига фаз	125
§ 34. Резонанс токов	127
§ 35. Точное решение вопроса о компенсации сдвига фаз	128
§ 36. Общий вид задачи о параллельных ветвях	133
§ 37. Продолжение исследования резонанса токов	135
§ 38. Потери в диэлектрике емкости	138
§ 39. Решение одной задачи	140
§ 40. Приближенная векторная диаграмма длинной линии передачи энергии	142
§ 41. Измерение мощности тремя вольтметрами или тремя амперметрами	145
§ 42. Получение токов или напряжений, сдвинутых в фазе на четверть периода	147
§ 43. Первый и второй законы Кирхгофа. Принцип наложения	150
§ 44. Схемы Бушера	152
§ 45. Некоторые мосты переменного тока	155
§ 46. Геометрические места. Работа синхронной машины генератором и двигателем. Диаграмма Blondеля	159
§ 47. Топографический метод	163

глава VIII

Многофазные токи

Стр.

§ 48. Двухфазный ток	167
§ 49. Трехфазный ток	169
§ 50. Соединение звездой	171
§ 51. Соединение треугольником	174
§ 52. Мощность трехфазного тока и измерение ее	175
§ 53. Применение топографического метода — включение нагрузки треугольником	181
§ 54. Применение топографического метода — включение нагрузки звездой	183
§ 55. Применение символического метода к трехфазному току	188
§ 56. Определение сил токов и напряжений при включении фаз генератора и нагрузки звездой	189
§ 57. Определение сил токов и напряжений при нагрузке треугольником (способ непосредственный)	192
§ 58. Эквивалентные звезда и треугольник	197
§ 59. Графический способ перехода от треугольника к звезде и наоборот	200
§ 60. Определение напряжений и сил токов при включении нагрузки звездой (второй способ)	201
§ 61. Графический способ решения той же задачи	204
§ 62. Наиболее общий случай расчета трехфазной цепи	207
§ 63. Графический способ решения задачи, когда даны три линейные напряжения	209
§ 64. Пример аналитического и графического расчета трехфазной системы	210
§ 65. Нулевая точка нагрузки и ее потенциал	215
§ 66. Вращающееся магнитное поле. Случай I: симметричные составляющие	221
§ 67. Вращающееся магнитное поле. Случай II: несимметричные составляющие	224
§ 68. Многополюсное вращающееся поле	228
§ 69. Разложение несимметричной трехфазной системы на две симметричных	232

глава IX

Сложная форма кривых электродвижущей силы и силы тока

§ 70. Основные понятия	242
§ 71. Разложение в ряд Фурье	248
§ 72. Графический метод анализа кривых	257
§ 73. Сложная форма кривых ЭДС и силы тока	262
§ 74. Эквивалентный синусоидальный ток	268
§ 75. Резонанс для составляющих различных порядков	271
§ 76. Влияние самоиндукции и емкости на форму кривой тока a	272
§ 77. Разветвление тока	273
§ 78. Очищение тока	274
§ 79. Составляющие высших порядков в трехфазном токе	275

глава X

Влияние железа на явления в цепи переменного тока

§ 80. Переменный ток, намагничивающий железо. Потери в железе	277
§ 81. Векторная диаграмма катушки с железным сердечником	281

§ 82. Самоиндукция четырех катушек с общим или отдельными сердечниками	288
§ 83. Аналитические выражения соотношений в катушке	291
§ 84. Феррорезонанс. Опрокидывание фаз	294

глава XI

Трансформатор

§ 85. Векторная диаграмма трансформатора	293
§ 86. Баланс мощностей	304
§ 87. Приближенное построение диаграммы	306
§ 88. Изображение соотношений в цепи переменного магнитного потока посредством векторов	309
§ 89. Автотрансформатор	313
§ 90. Аналитические выражения для соотношений в трансформаторе	314
§ 91. Аналитический вывод круговой диаграммы тока	318
§ 92. Эквивалентная схема, первый вид ее	321
§ 93. Другой вид эквивалентной схемы	323

глава XII

Метод обращений, приложения его к выводу диаграмм тока и напряжения

§ 94. Взаимнообратные кривые	324
§ 95. Основная теорема	325
§ 96. Координаты центра и радиус обращенной окружности	329
§ 97. Обобщение предыдущего на случай пространства трех измерений	330
§ 98. Примеры приложения метода обращений	—
§ 99. Круговая диаграмма трансформатора и асинхронного двигателя. Первая эквивалентная схема	336
§ 100. Пример построения круговой диаграммы тока для первой эквивалентной схемы	344
§ 101. Круговая диаграмма второй эквивалентной схемы	347

глава XIII

Векторные уравнения и круговые диаграммы

§ 102. Выражение прямой линии и окружности векторными уравнениями	350
§ 103. Применение метода векторных уравнений к первой эквивалентной схеме	353
§ 104. Экспериментальное построение окружности тока	360
§ 105. Векторные соотношения между разными величинами в круговой диаграмме. Третий вид эквивалентной схемы	364
§ 106. Окружности падения напряжения, первичной ЭДС, вторичного напряжения и др.	368
§ 107. Вычитание одной окружности из другой	372
§ 108. Пример на нахождение окружностей различных переменных величин первой эквивалентной схемы	373

глава XIV

Линии мощностей на круговых диаграммах

§ 109. Линии потерь мощности на круговой диаграмме	376
§ 110. Линии первичной мощности, потерь и полезной мощности на круговой диаграмме первой эквивалентной схемы	381

§ 111. Масштабы для линий мощностей и коэффициент полезного действия	387
§ 112. Линии мощности на круговой диаграмме второй эквивалентной схемы	391

глава XV

Неустановившийся режим в цепи тока

§ 113. Теория разряда конденсатора	399
§ 114. Наиболее общая форма уравнения цепи переменного тока . . .	410
§ 115. Неустановившийся режим тока. Включение постоянного тока .	411
§ 116. Включение переменного тока	415

глава XVI

Теория длинных линий передачи энергии

§ 117. Дифференциальные уравнения цепи с равномеро распределенными емкостью, самоиндукцией, ваттным сопротивлением и утечкой	423
§ 118. Исследование уравнений линии передачи энергии	425
§ 119. Волны в линии	429
§ 120. Телеграфные и телефонные кабели	434
§ 121. Замечание об электрическом расчете линии	437
§ 122. Гиперболические функции	—
§ 123. Уравнения линии передачи в гиперболических функциях . . .	442
§ 124. Формулы для приближенного расчета линий. Замечания о расчете трехфазной линии. Примеры	444
§ 125. Определение постоянных линий	450
§ 126. Эквивалентные схемы линии передачи	454
§ 127. Замечания о влиянии трансформаторов	457
§ 128. Собственный период колебаний линии без потерь	458

глава XVII

Наиболее общая форма уравнений электрического тока

§ 129. Общие уравнения и исследование их	462
§ 130. Случай постоянного тока	471
§ 131. Стоячие волны	473
§ 132. Упрощенное решение основных дифференциальных уравнений .	475
§ 133. Отречение волн в точках соединения двух проводов с различными волновыми сопротивлениями	477

глава XVIII

Теория поверхностного эффекта при переменном токе и переменном магнитном потоке

§ 134. Дифференциальное уравнение плотности тока в проводнике . . .	480
§ 135. Интегрирование уравнения плотности тока	482
§ 136. Интегрирование уравнения плотности тока — другой способ . .	486
§ 137. Уравнение плотности магнитного потока	490
§ 138. Вывод формулы Стефана для сопротивления проводника при переменном токе	492
Ответы к примерам	498
Некоторые литературные указания	500

ВВЕДЕНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

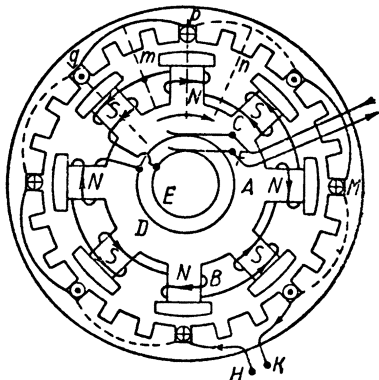
§ 1. Принцип устройства генератора переменного тока

Всякий меняющийся с течением времени по величине или по направлению ток есть ток переменный; для электрического освещения и электрических двигателей употребляется такой переменный ток, при котором все значения величин электродвижущей силы (ЭДС) и силы тока периодически повторяются через одни и те же промежутки времени, называемые периодом тока — при этом в течение периода ток имеет в цепи сначала одно, потом другое направление.

В дальнейшем мы ознакомимся и с другими видами переменных токов, например с токами при разряде конденсаторов и др., а теперь сосредоточимся на изучении только что указанных периодических токов, получивших исключительное значение при передаче электрической энергии на расстояние.

Источниками такого переменного тока являются особые машины — генераторы переменного тока.

Существенные части такого генератора (фиг. 1) следующие: во-первых, вращающаяся часть *A*, называемая ротором, которая делается из стали и несет на себе сердечники электромагнитов *B* с их катушками; в катушках электромагнитов, соединенных так, чтобы полюса северные и южные чередовались, течет постоянный ток, подходящий к ним от источника постоянного тока, т. е.



Фиг. 1.

особой машины постоянного тока или батареи аккумуляторов, через щетку C , нажимающую на медное кольцо D на валу ротора, соединенное проводом с началом первой катушки, — и уходящий из последней катушки через другое такое же кольцо E и щетку F ; во-вторых, неподвижная часть M , называемая статором, изготовляемая из листового железа и имеющая на внутренней цилиндрической поверхности углубления — „пазы“, в которых заложены проводники (по одному или несколько в пазе), проволочки, лежащие в разных пазах, соединяются друг с другом последовательно, составляя обмотку генератора переменного тока. При вращении ротора магнитные поля его электромагнитов проходят сквозь витки обмотки, вызывая в них своим изменением ЭДС.

Расстояние pq между осями двух соседних электромагнитов или mn — между двумя соседними нейтральными линиями, измеренное по окружности, проходящей через центры пазов статора, назовем полюсным делением.

Вследствие того, что конструкция электромагнитов совершенно одинакова, поля их тоже все совершенно одинаковы: магнитные индукционные линии под одним полюсом имеют ту же конфигурацию и густоту в различных местах поля, что и под другим полюсом, только направление их под южным полюсом прямо противоположно направлению под северным.

Представим теперь себе, что мы обмотку на статоре выполним так: наметим те из пазов, которые отстоят друг от друга на расстояние, как раз равное одному полюсному делению, заложим в эти пазы по проводнику и соединим эти проводники все последовательно соединительными проводниками попеременно на передней и задней стороне статора, но при этом не будем соединять последнего проводника с первым, с которого начали обмотку; таким образом получится незамкнутая обмотка, схематично изображенная на фиг. 1. Остальные пазы статора все оставим пустыми.

§ 2. Электродвижущая сила генератора; графическое изображение ее изменений

Обозначим через B , радиальную, т. е. перпендикулярную к направлению относительного движения проводника в магнитном поле слагающую магнитной индукции в том месте поля, которое сейчас проходит через проводник, пересекая его, через l — длину проводника в сантиметрах; через D — диаметр вышеупомянутой окружности, проходящей через центры пазов или, в данном случае, через центры поперечных сечений проводников; через n_m — число оборотов ротора в минуту и через $\frac{\pi D n_m}{60}$ — скорость движения поля

относительно обмотки, иначе равную $\frac{ds}{dt}$, где s есть длина соответствующей дуги.

При вращении ротора магнитный поток Φ , проходящий сквозь контур каждого витка из двух проводников, указанного на фиг. 2, будет меняться, причем его изменение за бесконечно-малый промежуток времени dt , т. е. при бесконечно-малом продвижении ds поля, выразится так:

$$d\Phi = 2B_r \cdot l \cdot ds,$$

так что ЭДС в витке равна (отбросим знак минус, как ненужный в данном случае)

$$\frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} = 2B_r \cdot l \cdot \frac{ds}{dt} \cdot 10^{-8} = 2B_r \cdot l \cdot \frac{\pi D n_m}{60} \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Явление индукции ЭДС описывают часто иначе: говорят, что при относительно перемещении магнитного поля и проводников происходит пересечение магнитных линий проводниками и что в каждом отдельном проводнике индуцируется ЭДС,

$$e' = B_r \cdot l \cdot \frac{\pi D n_m}{60} \cdot 10^{-8}.$$

Проводники разделены расстоянием в одно или несколько полюсных делений; поэтому они все находятся во всякий момент, вследствие упомянутой выше полной одинаковости полей всех электромагнитов, в полях или, точнее, в местах полей с равным для всех их B_r , так что и все ЭДС в отдельных проводниках во всякий момент равны. Применив правило правой руки сначала к одному проводнику, находящемуся под северным полюсом, потом к другому, соединенному с первым, проводнику, находящемуся под южным полюсом, мы найдем, что ЭДС отдельных проводников будут суммироваться, как при последовательном включении источников тока. Слагаясь, эти ЭДС дадут результирующую ЭДС всей обмотки

$$e = \sum e' = Ne',$$

где N — число всех проводников, или,

$$e = N \cdot B_r \cdot l \cdot \frac{\pi D n_m}{60} \cdot 10^{-8} \text{ вольт,} \quad (1)$$

которая и создаст на концах H и K нашей обмотки разность потенциалов, равную в отсутствие тока, т. е. при незамкнутой обмотке, этой ЭДС e .

Теперь заметим, что B_r есть величина переменная вдоль по дуге окружности под полюсом: под серединой полюса она имеет наибольшую величину, — индукционные линии здесь густы и перпендикулярны к цилиндрической поверхности статора, — по середине

между полюсами, на нейтральной линии она равна нулю, так как индукционные линии здесь направлены по касательной к поверхности статора.

Так как B_r есть величина переменная, то и e является величиной переменной. В зависимости от того, какой своей частью поле электромагнита пересекает проводник и следовательно каково B_r , будет получаться и величина e . Из формулы (1) видно, что если число оборотов машины n_m будет постоянно, — а это мы отныне и будем предполагать всегда имеющим место, — то все множители при B_r дадут постоянную величину, и следовательно ЭДС e будет пропорциональна радиальной составляющей индукции, величине B_r , в тех точках окружности статора, в которых находятся в данный момент проводники обмотки.

Так как для появления электродвижущей силы индукции определенной величины и направления необходимо лишь то или другое относительное движение проводника и магнитного поля, то мы можем с одинаковым правом говорить и о прохождении поля через проводник при движении электромагнита и о прохождении проводника в противоположном направлении через поле, как будто бы двигалась обмотка со статором, а электромагниты оставались неподвижными.

В этом смысле мы будем говорить, что в некоторый момент времени проводники находятся например все на нейтральных линиях $m, n, \dots$; в другие моменты проводники будут занимать другие положения в полях полюсов, однако же так, что B_r для всех проводников будет иметь одну и ту же величину, меняющуюся для всех проводников одинаково по мере продвижения обмотки в магнитном поле полюсов.

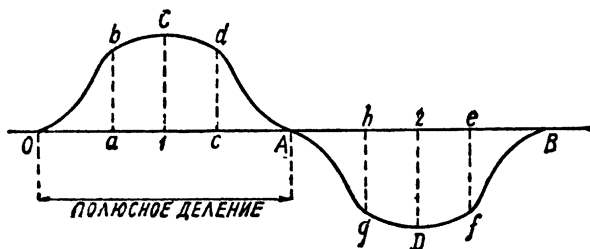
Для того чтобы изобразить наглядно ход изменения B_r и следовательно ЭДС e по мере продвижения проводников в поле, прибегают к графическому способу представления магнитного поля посредством кривой.

Возьмем прямоугольную систему координат. Будем откладывать по оси абсцисс расстояния, измеренные по известной нам уже окружности, проходящей через центры пазов, — от точки нахождения проводника до какой-нибудь нейтральной линии, например до той соседней, от которой проводник удаляется, — а по оси ординат будем откладывать значения B_r в точках нахождения проводника, причем под северным полюсом будем считать B_r положительным и откладывать вверх, а под южным — отрицательным и откладывать вниз. Проведя затем через концы ординат одну непрерывную линию, мы получим так называемую кривую поля; кривая, изображенная на фиг. 2, дает нам пример такой кривой поля. Эту кривую можно толковать двояким образом.

Во-первых, нетрудно видеть из построения, что в какой-нибудь определенный момент времени эта кривая представляет нам вели-

чины индукции B_r вдоль по окружности статора в этот момент. Если один из проводников обмотки в этот момент находится например под серединой северного полюса в точке 1 фиг. 2, то с ним непосредственно соединенный проводник находится под серединой южного полюса в точке 2. Часть кривой OC представит тогда распределение индукции B_r , ее величины влево от проводника 1, вдоль по окружности статора, часть же CA — вправо.

Еще раз заметим, что, на сколько при вращении ротора переместится в поле одного полюса за какой-нибудь промежуток времени один какой-нибудь проводник, на столько же передвинутся и остальные проводники под своими полюсами, так что можно говорить о поле с индукцией определенной величины B_r в котором находится вся вообще обмотка. (Это является следствием отсутствия в такой обмотке, как принятая нами в этой



Фиг. 2.

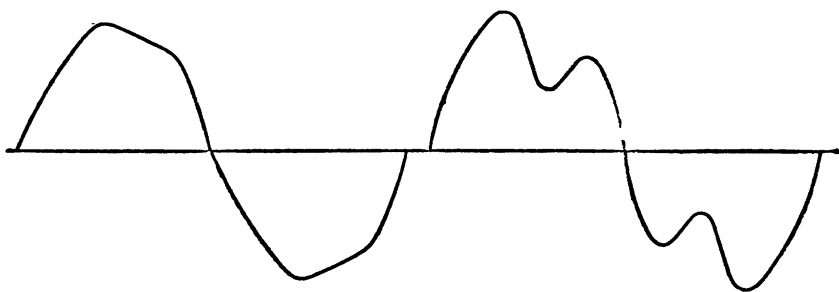
главе, сдвига в магнитном поле при каждом шаге по обмотке, как это есть в обмотках постоянного тока.)

Второе толкование кривой B_r фиг. 2 таково: так как вращение ротора равномерно, то абсциссы на этой фигуре, — длины дуг окружности, — пропорциональны времени, протекшему с того момента, когда проводник, расстояния которого до некоторой нейтральной линии нами приняты за абсциссы, находился на этой нейтральной линии; поэтому ординаты кривой представят нам значения B_r для определенного места, именно — места нахождения этого проводника, в различное время.

Иначе: если кривая фиг. 2 даст нам значения B_r в различных точках окружности, то ясно, что при вращении ротора и движении полюсов относительно проводников всякий проводник с течением времени побывает в магнитном поле со всяким значением величины индукции B_r , даваемым этой кривой, и таким образом та же кривая фиг. 3 представит все значения индукции B_r в каком-нибудь любом месте статора, например в месте нахождения любого проводника, принимаемые индукцией с течением времени.

Для всякого проводника эти значения начинают снова повторяться в точности каждый раз по прошествии того промежутка

времени, в течение которого мимо проводника проходит двойное полюсное деление. Этот промежуток времени называется периодом. Пока мимо проводника, например p (фиг. 1), идет северный полюс, т. е. в течение половины периода, ЭДС в нем одного направления; ЭДС всей обмотки направлена при этом в обмотке от одного ее конца к другому, например от H к K ; когда же мимо этого проводника пойдет южный полюс, т. е. в течение всей следующей половины периода, ЭДС в этом проводнике переменит свое направление, но и все остальные проводники в это время будут под другими полюсами, чем были раньше; все ЭДС будут противоположного направления, чем раньше, и ЭДС всей обмотки будет направлена в самой обмотке в сторону, обратную прежнему ее направлению, т. е. от K к H . Таким образом полпериода H имеет высший потенциал, чем K , т. е. H есть плюс-за-



Фиг. 3а.

Фиг. 3б.

жим обмотки нашего источника тока, а K есть минус-зажим, и полпериода наоборот, K имеет высший потенциал, чем H , и следовательно K есть плюс, а H — минус.

Так как ф-ла (1) показывает, что e пропорционально B_r при постоянной скорости, то та же самая кривая фиг. 3 в ином масштабе для абсцисс и ординат дает нам электродвижущую силу e в зависимости от времени; масштаб для ординат при этом будет в

$$N \cdot l \cdot \frac{\pi D n_m}{60} \cdot 10^{-8}$$

раз меньше, чем раньше, так как численно e во столько раз больше, чем B_r ; масштаб для абсцисс будет в

$$\frac{\pi D n_m}{60}$$

раз больше, так как длины дуг численно в

$$v = \frac{\pi D n_m}{60}$$

раз больше протекшего времени.