

А. И. Берг

Теория и расчет ламповых генераторов

**Часть 1. Независимое возбуждение
незатухающих колебаний**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.39
ББК 32
А11

А11 **А. И. Берг**
Теория и расчет ламповых генераторов: Часть 1. Независимое возбуждение незатухающих колебаний / А. И. Берг – М.: Книга по Требованию, 2024. – 320 с.

ISBN 978-5-458-34811-9

Автор — профессор Ленинградского электротехнического института им. Ульянова-Ленина, заведующий кафедрой радиотехники. Книга касается вопросов усиления мощности в ламповых передатчиках. Подробно разбираются условия, способствующие повышению отдачи генератора. Дается материал по анализу колебательного контура и по разложению в ряд различных форм импульсов анодного тока, необходимый для изучения всех трех частей курса. Подробно излагается теория умножения частоты и работа экранированных ламп. Книга предназначена для радио специалистов: инженеров, квалифицированных техников и студентов старших курсов.

ISBN 978-5-458-34811-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

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 первоизданном 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.

	Стр.
§ 8. Распространение основного уравнения косинусоидального импульса на плоский импульс	114
§ 9. Оценка величины ошибок при расчете с прямолинейными характеристиками	116
§ 10. Графическое изображение основного уравнения лампового генератора	117
 Глава V. Потери на аноде и коэффициент полезного действия лампового генератора.	
§ 1. Введение	129
§ 2. Общее выражение потерь на аноде и отдачи	129
§ 3. Потери на аноде при колебаниях без отсечки	132
§ 4. Сопоставление потерь на аноде при колебаниях I рода с потерями при колебаниях II рода	136
§ 5. Сопоставление полезной мощности, анодных потерь и отдачи при работе с косинусоидальным и плоским импульсами	139
§ 6. Заключение и общие выводы	14
 Глава VI. Эквивалентная схема лампового генератора.	
§ 1. Введение	142
§ 2. Общий вид эквивалентной схемы лампового генератора	142
§ 3. Эквивалентная схема и основные зависимости в ламповом генераторе с настроенной нагрузкой	149
§ 4. Эквивалентная схема при плоской форме импульса анодного тока	152
§ 5. Математическое выражение критического режима генератора	155
 Глава VII. Исследование работы лампового генератора на примерах и задачах.	
§ 1. Введение	161
§ 2. Задача полного использования генераторной лампы	161
§ 3. Теоретическая задача получения от данной лампы требуемой полезной мощности с максимальной отдачей	164
§ 4. Практическая задача получения заданной полезной мощности с минимальными потерями на аноде	169
§ 5. Метод расчета генератора при косинусоидальном импульсе на заданную мощность	170
§ 6. Задачи на колебания II рода с графическими построениями	175
§ 7. Задачи на колебания I рода	181
§ 8. Задачи на генератор, работающий с плоским импульсом	186
§ 9. Представление о работе генератора с перенапряженным режимом	195
§ 10. Задачи на расчет расстроенного генератора	198
<i>Литература</i>	211
 Глава VIII. Работа генератора по сложной схеме.	
§ 1. Введение	212
§ 2. Некоторые положения из теории связанных колебаний	214
§ 3. Эквивалентная схема генератора с промежуточным контуром	218
§ 4. Фильтрация гармоник при сложной схеме	221
§ 5. Примеры	226
<i>Литература</i>	233
 Глава IX. Цепь сетки лампового генератора.	
§ 1. Введение	233
§ 2. Форма импульса сеточного тока	236
§ 3. Потери в цепи сетки	237
§ 4. Практический метод определения полных потерь	243
§ 5. Примеры	244
§ 6. Сводка расчетных формул	248
<i>Литература</i>	249

Глава X. Умножение частоты ламповым генератором.	
§ 1. Введение	250
§ 2. Общее уравнение анодного тока при удвоении частоты	251
§ 3. Исследование формы анодного импульса при удвоении	252
§ 4. Коэффициенты постоянной составляющей и 2-ой гармоники анодного тока при удвоении частоты	255
§ 5. Эквивалентная схема удвоителя частоты. Приведенные значения внутреннего сопротивления и напряжения на сетке	257
§ 6. Напряжения в цепях лампы при удвоении частоты	258
§ 7. Выбор режима работы удвоителя частоты	260
§ 8. Сводка расчетных формул лампового удвоителя частоты	262
§ 9. Теория утроения частоты	265
§ 10. Выбор режима работы генераторной лампы при утроении частоты	268
§ 11. Сводка и сопоставление расчетных формул: генератора без умножения, генератора-удвоителя и генератора-утроителя частоты	270
§ 12. Примеры и расчеты по утроению частоты	272
§ 13. Двухтактные схемы умножения частоты	277
<i>Литература</i>	282
Глава XI. Работа четырехэлектродных ламп.	
§ 1. Введение	283
§ 2. Основные свойства четырехэлектродных генераторных ламп	284
§ 3. Основные зависимости у генераторов с четырехэлектродными лампами	296
§ 4. Примеры	297
<i>Литература</i>	302
Глава XII. Теория нейтрализации.	
§ 1. Введение	302
§ 2. Принцип работы нейтринных схем	303
§ 3. Анодная нейтрализация	306
§ 4. Сеточная нейтрализация	308
§ 5. Нейтрализация двухтактных схем	310
<i>Литература</i>	310
Приложения:	
Сводка расчетных формул колебательного контура	313
Сопоставление расчетных формул при разных формах импульсов тока	314
Сводная таблица коэффициентов разложения косинусоиды, коэффициентов приведения сопротивления и косинусов	316

ТАБЛИЦА ОБОЗНАЧЕНИЙ.

<p>I — амплитуда тока. J — действующее значение. i — мгновенное значение тока. V — амплитуда напряжения. v — мгновенное значение напряжения. E — электродвижущая сила или постоянное напряжение. e — мгновенное значение напряжения. R — ваттное (активное) сопротивление. X — безваттное (реактивное) сопротивление. Z — полное сопротивление. P — мощность. γ — коэффициент полезного действия (отдача). L — коэффициент самоиндукции. M — коэффициент взаимной индукции. k — коэффициент связи. σ — коэффициент рассеивания.</p>	<p>δ — логарифмический декремент затухания. α — множитель (показатель) затухания. ρ — характеристика контура (волновое сопротивление). μ — коэффициент усиления трехэлектродной лампы. D — проницаемость сетки. S — крутизна (наклон) характеристики. C — емкость конденсатора. f — частота (высокая). F — частота (низкая), фильтрация. ω — круговая частота (высокая). Ω — круговая частота (низкая). t — время. T — период высокой частоты. τ — период низкой частоты. λ — длина волны.</p>
--	---

Индексы и значки у основных букв.

(Подстрочные, малого размера).

<p>a — анодная цепь (например I_a, E_a). A — антенная цепь (I_A, V_A). c — цепь сетки (E_c, V_c). n — цепь накала (I_n, V_n). a_1 — при первой гармонике переменного анодного тока (I_{a1}). c_1 — при первой гармонике переменного сеточного тока (I_{c1}). a_2 — при второй гармонике переменного анодного тока (I_{a2}). a_3 — при третьей гармонике переменного анодного тока (I_{a3}).</p>	<p>a_0 — при постоянной составляющей анодного тока (I_{a0}). c_0 — при постоянной составляющей сеточного тока (I_{c0}). ε — эквивалентная величина ($R_\varepsilon, X_\varepsilon$). L — в индуктивной ветви (R_L). C — в емкостной ветви (R_C). i — исходные условия (E_{ai}, E_{ci}). \max, m — максимальное значение (I_m). \min — минимальное значение (I_{\min}). M, m — относящийся к модуляции (I_M). p, g — рабочая (динамическая) величина (R_p, S_p).</p>
--	--

СОКРАЩЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НАЗВАНИЙ ЖУРНАЛОВ.

- | | | | |
|----------|--|-----------|--|
| 1. AfE | — Archiv für Elektrotechnik. | 12. PIRE | — Proceedings of the Institute of Radio Engineers. |
| 2. BSTJ | — The Bell System Technical Journal. | 13. TZ | — Telefunken-Zeitung. |
| 3. EC | — Electrical Communication. | 14. ZftPh | — Zeitschrift für technische Physik. |
| 4. En | — Electrician. | 15. PhM | — The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine. |
| 5. ENT | — Elektrische Nachrichten Technik. | 16. PR | — Physical Review. |
| 6. ETZ | — Elektrotechnische Zeitschrift. | 17. ТнТБП | — Телеграфия и телефония без проводов. |
| 7. EWWE | — Experimental Wireless and the Wireless Engineer. | 18. PPSL | — Proceedings of the Physical Society of London. |
| 8. ZfH | — Zeitschrift für Hochfrequenztechnik. | 19. PPS | — Proceedings of the Physical Society. |
| 9. JAIEE | — The Journal of the American Institute of Electrical Engineers. | 20. ZfF | — Zeitschrift für Fernmelde-technik. |
| 10. JIEE | — The Journal of the Institute of Electrical Engineers. | 21. W. W. | — The Wireless World. |
| 11. OE | — L'Onde Electrique. | | |

ГЛАВА I.

ГЕНЕРАТОРНЫЕ ЛАМПЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

§ 1. Введение.

Центральной и наиболее важной составной частью любого современного радиопередатчика является генераторная лампа. Ее физическими и техническими свойствами определяется весь процесс преобразования промышленного тока, подводимого к радиостанции, в ток высокой частоты. Электрические параметры лампы в значительной мере предопределяют вид схемы и конструктивное выполнение передатчика.

Поэтому на генераторную лампу должно быть обращено самое серьезное внимание, и с изучения ее свойств должно быть начато изучение теории ламповых передатчиков.

В зависимости от потребной мощности и частоты процесс преобразования подводимого тока может иметь в основе различные физические явления.

В настоящее время наибольшее применение находят пока вакуумные трехэлектродные лампы, но широко применяются также и четырехэлектродные лампы и в области особо коротких волн — двухэлектродные динатроны и магнетроны.

Чисто электронные процессы, лежащие в основе работы огромного большинства современных генераторных ламп, ограничивают коэффициент полезного действия преобразования энергии сравнительно низкими числами — не свыше 70 — 80%. Намечающийся уже сейчас поворот к газовым процессам обещает повысить отдачу до тех норм, которые приняты в электротехнике низкой частоты — до 90 и выше процентов. Хорошим примером может служить переворот в выпрямительной технике, совершенный при переходе от кенотронов к газотронам (это произошло в 1928—1930 гг.). Нам представляется, что такая же участь ожидает современные вакуумные генераторные лампы.

Ниже мы будем касаться только вакуумных приборов, так как газовых ламповых генераторов еще не существует.

Все электронные лампы содержат два или более электродов, потенциалы на которых создают исходные условия для прохождения через лампу подводимых к ней промышленных токов, и обычно один управляющий электрод, потенциал на котором связан с изменениями потенциалов высокой частоты на колебательных контурах.

В техническом курсе, который мы изучаем, нас интересуют не столько сами физические процессы, происходящие внутри генераторной лампы, сколько их внешнее проявление. Эта задача решается легче всего при помощи математических и графических построений, называемых характеристиками лампы. Необходимо отметить, что физические процессы, происхо-

дящие внутри лампы не только во время генерации, но и в спокойном ее состоянии, обычно настолько сложны, что не представляется возможным выразить их достаточно точно математически. Но при технических расчетах, имеющих целью дать основные отправные данные для конструктора, мы должны помнить, что нашей целью является такое решение задачи, при котором результаты расчета имеют точность того же порядка, что и точность лабораторных технических измерений, и получаются при этом достаточно быстро и просто. Имея дело с массовой продукцией, надо учитывать то обстоятельство, что базой для расчетов могут служить только некоторые средние электрические параметры и характеристики ламп. По состоянию вакуумной техники на сегодняшний день техническими условиями допускаются расхождения в основных электрических параметрах электронных ламп в пределах $\pm 20\%$ от среднего. Таким образом очевидно, что технический расчет, дающий возможность получить точность в 1% , является излишне точным. Так как современные технические измерительные приборы дают ошибки в пределах нескольких процентов (а в ламповой схеме приходится иметь дело с показаниями многих приборов, вследствие чего суммарная ошибка наблюдений еще возрастает), то очевидно, что нашей задачей является выбор такого метода расчета, который дает возможность достаточно быстро и просто получить результат с точностью в $10\text{--}15\%$.

Поэтому мы будем пользоваться упрощенными характеристиками генераторных ламп, заменяя реальные криволинейные характеристики идеализированными прямолинейными. Это даст нам возможность охватить одними и теми же уравнениями всю теорию и все расчеты ламповых генераторов, работающих как незатухающими, так и модулированными колебаниями.

§ 2. Принципы замены криволинейных характеристик прямолинейными.

При замене реальных характеристик идеализированными необходимо обеспечить возможно точное совпадение точек на основном участке характеристик, имеющем наибольшую протяженность. Для того чтобы произвести замену с учетом этого требования, обратимся к основному уравнению лампы, справедливому для небольших участков прямолинейной части.

Анодный ток является функцией анодного и сеточного напряжений:

$$i_a = f(e_a, v_c).$$

Следовательно, изменения его могут быть выражены полным дифференциалом:

$$di_a = \frac{\partial i_a}{\partial v_c} dv_c + \frac{\partial i_a}{\partial e_a} de_a. \quad (1)$$

Согласно определению:

$$S = \frac{\partial i_a}{\partial v_c} \quad \text{и} \quad \frac{\partial i_a}{\partial e_a} = \frac{1}{R_i}.$$

Следовательно,

$$di_a = S dv_c + \frac{1}{R_i} de_a. \quad (2)$$

Это уравнение справедливо для небольших изменений тока. Желая распространить его на всю характеристику, мы должны принять, что крутизна

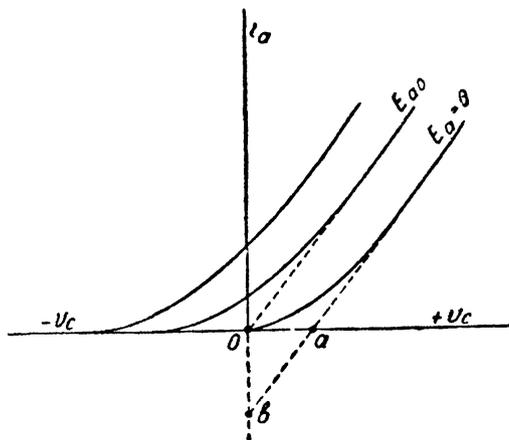
ее остается постоянной и равной той, которая имеется на наиболее интересном для нас среднем участке реальной характеристики. Очевидно, что и остальные параметры определяются тем же условием.

Интегрируя уравнение (2) в предположении, что S и R_i являются постоянными величинами, получаем:

$$i_a = S v_c + \frac{1}{R_i} e_a + \text{const.} \quad (3)$$

Физический смысл постоянной интегрирования легко понять, если обратиться к фиг. 1.

Здесь криволинейная характеристика, соответствующая анодному напряжению $E_a = 0$, заменена прямолинейной, пересекающей ось абсцисс в точке a . Вместе с тем идеализированная характеристика, соответствующая некоторому анодному напряжению E_{a0} , называемому *напряжением приведения*, проходит через начало координат. Следовательно, заменяя реальные характеристики идеализированными прямыми, мы должны учесть, что в уравнении (3) при $v_c = 0$ и $e_a = E_{a0}$ анодный ток равен нулю ($i_a = 0$). Подставляя это в уравнение (3), имеем:



Фиг. 1. Расположение идеализированных (выпрямленных) характеристик.

$$0 = \frac{1}{R_i} E_{a0} + \text{const,} \quad (4)$$

откуда

$$\text{const} = - \frac{1}{R_i} E_{a0}.$$

Подставляя определенную таким образом постоянную интегрирования в уравнение (3), получаем:

$$i_a = S v_c + \frac{1}{R_i} (e_a - E_{a0}). \quad (5)$$

Это уравнение удобнее представлять в другом виде:

$$i_a = S [v_c + D (e_a - E_{a0})] \quad (6)$$

или еще иначе:

$$i_a = \frac{(e_a - E_{a0}) + \mu v_c}{R_i}. \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) представляют уравнения того семейства прямолинейных характеристик, которым мы заменяем, для технических расчетов, реально существующее семейство криволинейных характеристик, причем, согласно выставленному нами требованию. Эта замена произведена так, что наклон (крутизна) и расположение наших прямых совпадают с наклоном и расположением прямолинейных участков реальных характеристик, имеющих наибольшую протяженность в их средней части.

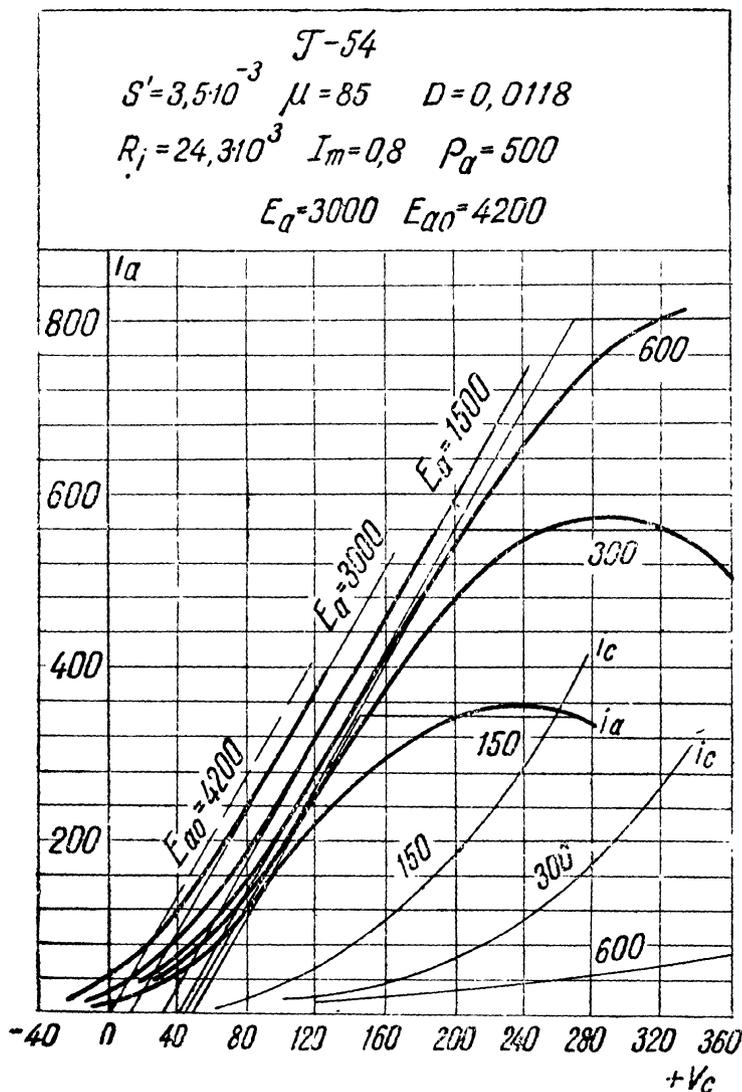
Уравнения (6) и (7) справедливы в тех пределах, в которых остаются постоянными основные параметры лампы: крутизна, внутреннее сопротивление и проницаемость. В пределах между нижним и верхним загибами мы это можем принять. Нижним пределом является ток, равный нулю. Верхним пределом—место верхнего загиба, причем оно далеко не всегда—скорее, наоборот, очень редко—совпадает с током насыщения, так как

перераспределение тока между анодом и сеткой приводит к резкому изменению формы анодной характеристики гораздо раньше, чем наступает ток насыщения. Это будет ясно из рассмотрения приводимых ниже характеристик.

Наибольшее значение тока, для которого уравнения (6) и (7) остаются справедливыми, мы обозначаем I_m . Следовательно, метод замены реальных характеристик идеализированными заключается в определении параметров лампы по среднему, наиболее протяженному участку характеристик и в распространении их на все значения тока от нуля до наибольшего — I_m ; далее, для сохранения расположения семейства статических характеристик на своем месте относительно координат вводится понятие об *анодном напряжении приведения* E_{a0} ; наконец, вводятся ограничения для области справедливости наших допусков:

- 1) $I_m > i_a > 0$;
- 2) $e_a > v_c$.

С этими оговорками мы принимаем и кладем в основу всего курса как теории, так и расчетов *основное уравнение трехэлектродной лампы*, представленное формулами (6) и (7). Составить основное уравнение генераторной лампы значит на основании сказанного выше: выпрямить характеристики, установить параметры, определить анодное напряжение приведения и написать уравнение. Это является нашей первой задачей. Полу-



Фиг. 2. Реальные и идеализированные характеристики генераторной лампы типа Г-54 (БТ-500).

чив с завода или из лаборатории запись или чертеж характеристик, мы должны — после внимательного изучения их — переработать их в такой вид, который позволяет приступить к анализу и расчету.

Обратимся к фиг. 2. Здесь показаны реальные и идеализированные характеристики генераторной лампы типа Г-54 (старое название БТ-5С3).

Номинальные заводские данные этой лампы следующие: электронная эмиссия катода 0,6 — 1,1 А, анодное напряжение 3000 В, максимальная мощность анодного рассеяния 500 Вт, коэффициент усиления от 75 до 115, крутизна от 2,8 до 4,2 мА/В.

Прежде всего обращает на себя внимание неточность заводских данных: эмиссия может колебаться от средней (0,85) на 30 % в обе стороны. Это объясняется неоднородностью применяемых катодов и по состоянию техники производства нитей в настоящее время неизбежно. Рассматривая статические характеристики, мы видим, что даже для лампы, обладающей средними данными, достижение тока насыщения возможно лишь при очень низких анодных напряжениях (порядка 600 В) и при напряжениях на сетке порядка 300 — 400 В. При более низких напряжениях на аноде анодный ток вследствие значительного возрастания сеточного тока далеко не достигает насыщения. Поэтому наибольшее значение тока, практически достижимое, мы принимаем в среднем 0,8 А, помня, что для отдельных ламп эта величина может отклоняться в обе стороны на 10 — 30 %.

Допустимые значения крутизны колеблются в пределах от 2,8 до 4,2, т. е. на 20,0% от среднего (3,5). Мы определяем среднюю крутизну относительно идеализированной характеристики, которую проводим через характеристику при анодном напряжении в 1500 В в средней ее части. Находим $640/183 = 3,5$. Это число случайно совпало со средним значением крутизны по заводским данным. Очевидно, что в нижней части наша крутизна больше, чем действительная. В области верхнего загиба крутизна реальных характеристик тоже меньше нашей. Распространяя среднюю крутизну на все протяжении характеристики, мы заменяем плавное изменение крутизны около загибов резким загибом под тупым углом: ток от нулевого значения сразу начинает расти с постоянной крутизной до максимального своего значения, достигнув которого, также резко, под углом, переходит в ток постоянной силы. Неточности, к которым ведет наша замена, мы рассмотрим ниже. Укажем здесь лишь, что они незначительны и вполне укладываются в пределы других неизбежных ошибок.

Коэффициент усиления колеблется по заводским данным от 75 до 115, т. е. на 21% от среднего значения (95). Рассматривая характеристики, легко видеть, что они расходятся веерообразно снизу вверх, и следовательно, коэффициенты усиления, определяемые в разных точках, различны: внизу они больше, наверху меньше. Мы принимаем средний коэффициент усиления, определяемый относительно середины характеристик 3000 и 600 В:

$$\mu = \frac{3000 - 600}{28} \approx 85.$$

Отсюда находим внутреннее сопротивление:

$$R_i = \frac{\mu}{S} = \frac{85}{3,5} 10^3 \approx 24 \cdot 10^3 \Omega.$$

Полагая коэффициент усиления, проницаемость и крутизну постоянными, находим анодное напряжение $E_{a0} = 4200$ V, при котором идеализированная анодная характеристика проходит через начало координат. Действительно, $D(E_{a0} - 3000) = 14$ или $E_{a0} - 3000 = 14 \cdot 85$, откуда $E_{a0} \approx 4200$ V.

Таким образом основное уравнение генераторной лампы имеет вид:

$$i_a = S[v_c + D(e_a - E_{a0})] = 3,5 \cdot 10^{-3} [v_c + 0,0118(e_a - 4200)].$$

Оно справедливо, почти точно, в средней части характеристик, дает преуменьшенные значения тока в области нижнего загиба и преувеличенные — в области верхнего загиба. Оно нами распространяется на область от нуля до максимального значения тока $I_m = 0,8$ A, причем оно справедливо только для точек, в которых анодное напряжение раза в 1,5 — 2 больше сеточного.

Проверим справедливость нашего основного уравнения, например для точки с координатами: $v_c = 160$, $e_a = 3000$ V. Имеем:

$$i_a = 3,5 \cdot 10^{-3} [160 + 0,0118(3000 - 4200)] = 0,512,$$

что соответствует чертежу.

§ 3. Две системы координат для изучения работы лампового генератора.

Уравнения (6) и (7) выражают семейство идеализированных характеристик трехэлектродной лампы. Они содержат три переменных: анодный ток i_a , анодное напряжение e_a и напряжение на сетке v_c . Желая изобразить уравнение с тремя переменными на плоскости, мы должны, очевидно, две из переменных откладывать по осям координат, а третью переменную учитывать путем нанесения ряда прямых, из которых каждая соответствует некоторому определенному и постоянному ее значению.

Нанося всегда анодный ток по оси ординат, мы получаем характеристики в двух системах координат.

Первая система имеет оси: ось ординат — анодный ток, ось абсцисс — напряжение на сетке; постоянным параметром служит анодное напряжение.

$$i_a = f(v_c) \text{ при } e_a = \text{const.}$$

Вторая система имеет оси: ось ординат — анодный ток, ось абсцисс — напряжение на аноде; параметром служит постоянное напряжение на сетке.

$$i_a = f(e_a) \text{ при } v_c = \text{const.}$$

На фиг. 3 и 4 уравнения прямолинейной характеристики представлены графически в обеих системах координат.

Справедливость наших построений для основных уравнений легко показать.

Разберем, например, уравнение (7):

$$i_a = \frac{e_a - E_{a0} + \mu v_c}{|R_t|}. \quad (7)$$

1. Анодный ток равен нулю при условии, что

$$e_a - E_{a0} + \mu v_c = 0.$$