

Поскольку в соответствии с теоремой об оценке интеграла, заключающей, что значение определено интеграла, делённое на значение интервала интегрирования, заключено между наименьшим и наибольшим значением подинтегрируемой функции, т.е.  $\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \in M$ , где  $M$  - наим. и наиб. знач.  $f(x)$  в интервале  $[a, b]$  (трактуемое как интегральное знач. 2.13), то среднее значение любой функции находится, очевидно, между

её максимальным и минимальным значениями, то есть в наше случае

$$i_{min} \leq I \leq i_{max} \quad (2.20)$$

В связи с этим понятно, что моменты  $\theta_1$  и  $\theta_2$  расположены левее моментов пересечения кривой фазовой эдс с прямой  $U$ , что и отражено правыми пределами в (2.10').

В интервале  $[\theta_1 \div \theta_2]$  индуктивность накапливает энергию ("зарядается"). Из (2.15) следует, что функция (2.8) - знакопеременная. Следовательно, при  $\psi < \theta_1$  и  $\psi > \theta_2$  индуктивность "разряжается", напряжение на ней отрицательно, а ток спадает. Отсюда

$$i_{min} < i(0) < i_{max} \quad (2.20')$$

В интервале "заряда", когда  $u_L > 0$ , согласно (2.14) имеем

$$i < S \rightarrow i_{max} < 1, \quad (\theta_1 \leq \psi \leq \theta_2). \quad (2.20'')$$

Таким образом, подключение (или увеличение) индуктивности уменьшает амплитудные значения токов вентилей, фазы и нагрузки, приближая к среднему значению, что благоприятно сказывается на работе вентилей и снижает величину пульсации.

Поскольку  $\theta_2 > \theta$ , максимум тока находится правее (отстаёт от) максимума эдс, и, следовательно, индуктивность "затягивает" ток вентилей и нагрузки, что физически очевидно и отражено на рис. 2.1, д.

б/ амплитудные значения токов вентилей, фазы и нагрузки и напряжения на индуктивности, номограммы угловых величин и частные случаи ( $L=0, L=\infty$ )

Найдём значения переменных в особых точках (экстремумы,

точки перегиба, момент открытия вентиля), необходимые для правильного представления физики процессов в схеме и выбора её элементов при проектировании.

Эти значения обычно определяют из выражений мгновенных значений переменных, заменив лишь в них текущее время соответствующим моментом. Поступая таким образом, из (2.7) при  $\vartheta = \theta_2$  получаем, например, для амплитуды тока вентиля.

$$i_{a\theta} = i(\theta_2) = \cos\varphi \left[ \cos(\theta_2 - \theta - \varphi) + \frac{2 \sin\theta \sin\varphi}{1 - e^{-2\delta\theta}} e^{-\delta\theta_2} \right], \quad (2.21')$$

или из (2.8) для положительной амплитуды напряжения на индуктивности

$$u_x^+ = u_x(\theta^+) = -\sin\varphi \left[ \sin(\theta^+ - \theta - \varphi) + \frac{2 \sin\theta \sin\varphi}{1 - e^{-2\delta\theta}} e^{-\delta\theta^+} \right]. \quad (2.22')$$

Тем самым выражения экстремальных значений по форме не отличаются от выражений самих переменных и выглядят сравнительно сложными. При усложнении вида нагрузки результаты более громоздки. Возможно упрощение этих выражений.

Экстремальные значения тока нагрузки, вентиля, фазы и напряжения на нагрузке получаем из (2.14) с учётом (2.2) и условия в левой части (2.10)

$$i_{min,max} = i_{a\theta} = u_{omin,max} = S(\theta_{1,2}) = \cos(\theta_{1,2} - \theta), \quad (2.24)$$

что проще, чем (2.21').

Амплитуду  $u_x^+$  находим из (2.8) с учетом (2.12)

$$u_x^+ = u_x(\theta^+) = \operatorname{tg}\varphi \sin(\theta - \theta^+). \quad (2.22)$$

Поскольку  $u_x^+ \geq 0$ , то из (2.22) следует

$$\theta^+ \leq \theta, \quad (2.23)$$

что и отражено на рис. 2.1, д и правым пределом в (2.12') и

свидетельствует о том, что напряжение на индуктивности опережает фэдс по экстремальному значению.

При условии  $\varphi = 0$  (случай чисто активной нагрузки) из (2.7) и (2.8) следует, что форма тока повторяет форму фэдс, а напряжение на индуктивности равно нулю

$$i(\vartheta)_{\varphi=0} = \cos(\vartheta - \theta) ; \quad u_L(\vartheta)_{\varphi=0} = 0 ,$$

что соответствует физике явлений. Отсюда также следует, что  $i_{min/\varphi=0} = i(0)_{\varphi=0} = \cos\theta > 0$ , и режима разрывных выходных токов не наблюдается ( $P \neq 3$ ).

Таким образом, при  $\varphi > 0$  (т.е. при наличии индуктивности) получаем

$$i(0) > \cos\theta = S(0) . \quad (2.24)$$

Тогда из (2.14) имеем, что при  $\vartheta = 0$  напряжение на индуктивности отрицательно

$$u_L(0) = S(0) - i(0) < 0 , \quad (2.25)$$

что и отражено на рис. 2.1, д.

При условии  $\varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}$  (случай бесконечной индуктивности) выражения (2.7) и (2.8) и уравнения угловых величин дают неопределённость вида  $0/0$ , раскрывая которую по правилу Бернулли-Лопиталья, получаем

$$i(\vartheta) = i(0) = i_{min} = i_{max} = I ; \quad u_L(\vartheta) = \cos(\vartheta - \theta) - \theta^{-1} \sin\theta = S - I .$$

Следовательно, напряжение на индуктивности повторяет огибающую фазовых эдс, но ось времени, как бы, проходит по оси тока  $I$ , ток в нагрузке постоянен, пульсации равны нулю, а ток вентиля (фазы) имеет форму прямоугольников высотой  $I$  и шириной  $2\theta$ , что совпадает с известными результатами [10 ÷ 14].

Итак, оба частных случая ( $L=0$ ,  $L=\infty$ ) подтверждены.  
 Графики рассмотренных углов, как результаты решения приведенных  
 выше трансцендентных и других уравнений, представлены на рис.2.2,  
 где по оси абсцисс для удобства использован встречнолинейный  
 масштаб, когда бесконечные значения величин переходят в нули  
 их инверсных аналогов.

§ 2.2. Физические результаты анализа и их срав-  
нение с результатами при ёмкостной на-  
грузке

Подводя итог проведенному анализу, можно отметить следу-  
 ющие моменты, предварительно записав связь и порядок следова-  
 ния углов и соответствующих им величин, а также пределы измене-  
 ния последних при изменении индуктивности в пределах  $0 \leq L \leq \infty$

$$0 \leq \theta_1 \leq \theta^+ \leq \beta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \leq \beta_2 \leq 2\theta, \quad (2.26)$$

$$0 \leq \cos \theta \leq i_{min} \leq i(0) \leq i_{пер} \leq I \leq i_{max} \leq 1,$$

$$0 \leq U_+^+ \leq 1 - I \leq |U_-^-| = |U_-(0)| \leq U - \cos \theta; \cos \theta \leq i_{min} \leq I; 1 \geq i_{max} \geq I.$$

1. Многофазные схемы класса  $RL$  работают в режиме  $P \in H$   
 с присущими ему особенностями - независимо от параметров схема  
 работает только в этом режиме, в работе участвует только одна  
 внутренняя ветвь, вентили вступают в работу поочередно, дли-  
 тельность их открытого состояния равна длительности импульсов  
 воздействия ( периоду огибающей фэдс ). Следовательно, индук-  
 тивность не влияет на форму и величину пульсации выходного на-  
 пряжения и на время работы вентиля и фазы трансформатора.

2. Амплитуда тока вентиля и фазы сдвинута вправо во време-  
 ни по отношению к амплитуде фэдс и, следовательно, катодная  
 индуктивность "затягивает" этот ток, в отличие от случая работы

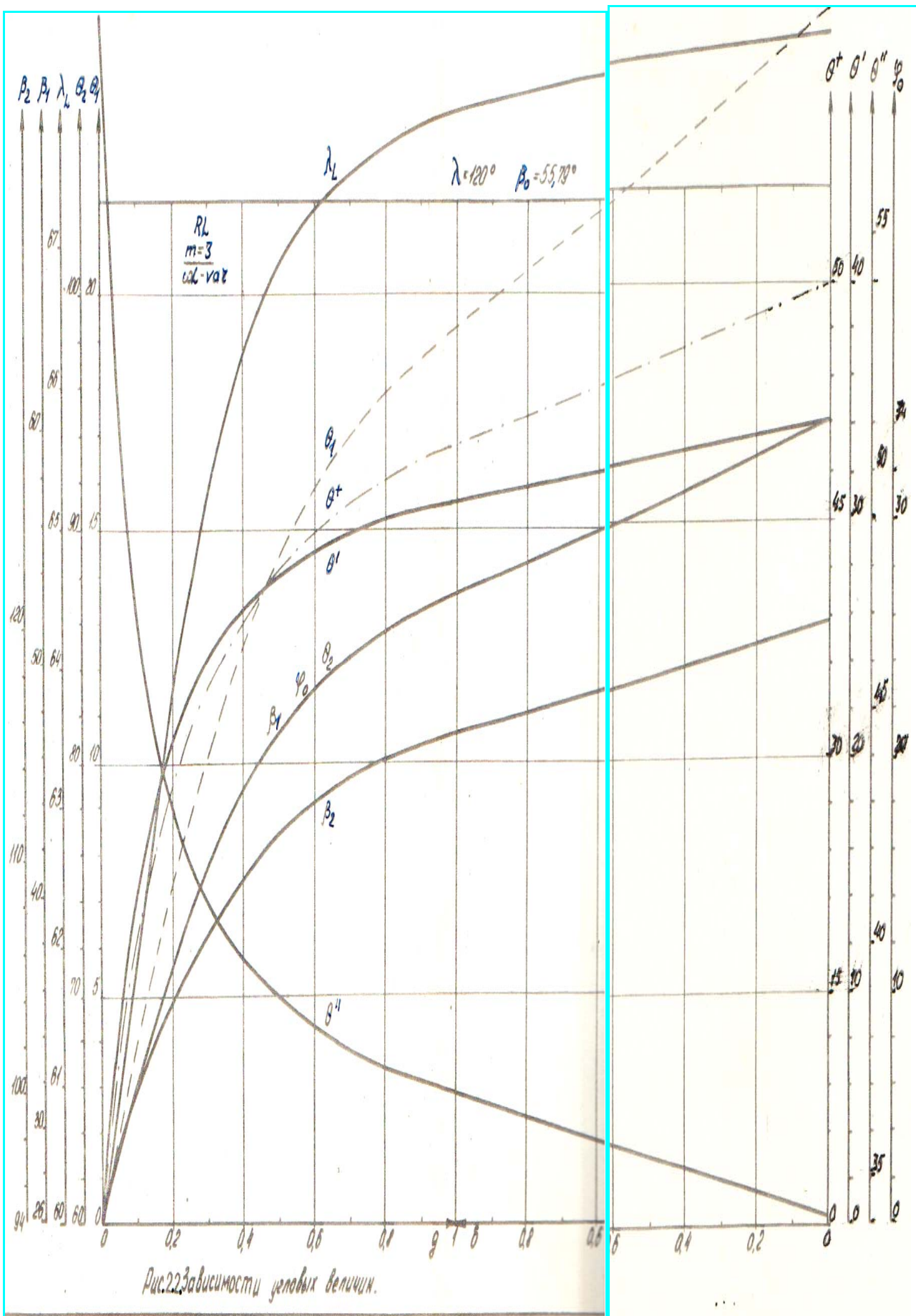


Рис.22. Зависимости угловых величин.

на параллельный емкостный фильтр, когда максимум тока вентиля (фазы) опережает максимум фэдс [47,60,65].

3. "Затягивание" тока индуктивностью приводит к тому, что использование числа фаз больше одной исключает режим прерывистых токов нагрузки (в отличие от однофазной схемы) и позволяет получить в нагрузке постоянный ток с незначительной пульсацией переменной составляющей.

4. Амплитуда тока вентиля и фазы трансформатора не бывает меньше среднего значения тока нагрузки, но и больше значения  $S_a/R$ , имеющего место при чисто омической нагрузке, что благоприятно отражается на работе вентиля в отличие от класса схем без потерь с емкостной нагрузкой, когда амплитуда тока вентиля, например, при значении параметра  $g_{нс} = \omega RC = 600$  может достигать 50-кратного превышения значения  $S_a/R$  [47]. Именно поэтому выпрямители с индуктивной реакцией используют, как известно, при относительно больших токах нагрузки (свыше 1а).

5. Экстремальные значения напряжения полезной нагрузки расположены на огибающей фэдс, и при изменении индуктивности от нуля до бесконечности это напряжение, как и ток "дышат", перемещаясь значениями экстремумов по синусоиде фэдс к среднему значению  $U_0$ , которое равно среднему значению выходного напряжения в режиме холостого хода выпрямителя.

6. Средние значения тока и напряжения нагрузки не зависят от соотношений параметров входящих в схему элементов, и, следовательно, индуктивность не влияет на эти величины в отличие от однофазной схемы, где с ростом индуктивности значения токов падают и при условии  $\omega L \gg R$  (бесконечная индуктивность) ток в нагрузке практически отсутствует.

7. Напряжение на индуктивности, будучи знакопеременным, отстаёт от фэдс по нулевым значениям с положительной производной и опережает её по экстремальному значению и по нулевым значениям с отрицательной производной. В схемах с ёмкостной нагрузкой напряжение на конденсаторе всегда положительно, а знакопеременный — ток.

8. Наибольшее значение напряжения на индуктивности имеет место в момент пересечения фэдс по их огибающей. Оно не превышает значения  $(U_0 - \cos \theta)$  и в многофазной схеме составляет незначительную величину. Время "заряда" индуктивности (накопления энергии) несколько больше времени её "разряда" и поэтому значительных импульсов тока через вентиль не наблюдается в отличие от случая работы на ёмкость, когда время заряда конденсатора может оказаться существенно меньше времени его разряда, что в силу закона сохранения энергии вызывает броски тока через вентиль, трансформатор и сеть и может явиться помехой для других радиотехнических и прочих маломощных потребителей, подключенных к той же сети [      ] .

### § 2.3. Параметрические, частотные, нагрузочные и текущие относительные характеристики, обратное напряжение.

а/ Получение расчётных величин, параметрические и частотные характеристики.

Перечень величин, необходимых для расчёта схем выпрямления и выбора их элементов, к настоящему времени достаточно выработан. В качестве образцовой нами выбрана книга проф. Б.П. Терентьева [ 11 ]. Ряд дополнительных коэффициентов, определя-

ющих те или иные отношения основных величин, используются для различных целей в [192, 30, 31, 146, 166]. Найдём эти величины, осуществив лишь определенную рубрику.

1. Средние значения напряжения и тока нагрузки и амплитудные значения токов нагрузки, вентиля, фазы и напряжения на дросселе определены соответственно выражениями (2.16), (2.21), (2.22), (2.25).

Для удобства практического пользования при проектировании, а также с целью выяснения характера и границ изменения указанные величины представлены в форме графиков (рис. 2.3). Построение осуществлено с учетом результатов решения трансцендентных уравнений (рис. 2.2). Параметром аналитических и графических зависимостей является обобщенная постоянная времени цепи нагрузки  $g = \operatorname{tg} \varphi = \omega L / R$ , изменяющаяся от нуля до бесконечности. Тем самым графики типа рис. 2.3 охватывают все возможные параметрические состояния исследуемой схемы.

Для токовых величин изменяющейся величиной (аргументом) является сопротивление  $X = \omega L$ , а  $R = \text{const}$ . Таким образом, полученные при основании  $Q_{i1} = S_a / R$  параметрические зависимости отражают поведение схемы при изменении индуктивности в диапазоне от 0 до  $\infty$ .

*внешней цепи (R и L) изменяющимся параметром*

При фиксированных значениях элементов приведенных соотношений и графических зависимостей становится частота. Тем самым графики типа рис. 2.3 могут рассматриваться как частотные характеристики выпрямителя. Пользуясь ими, можно, например, при данных значениях элементов нагрузки оценить изменение токов и напряжений при переходе на первичный источник с другой частотой или при изменениях частоты (нестабильности) данного источника.



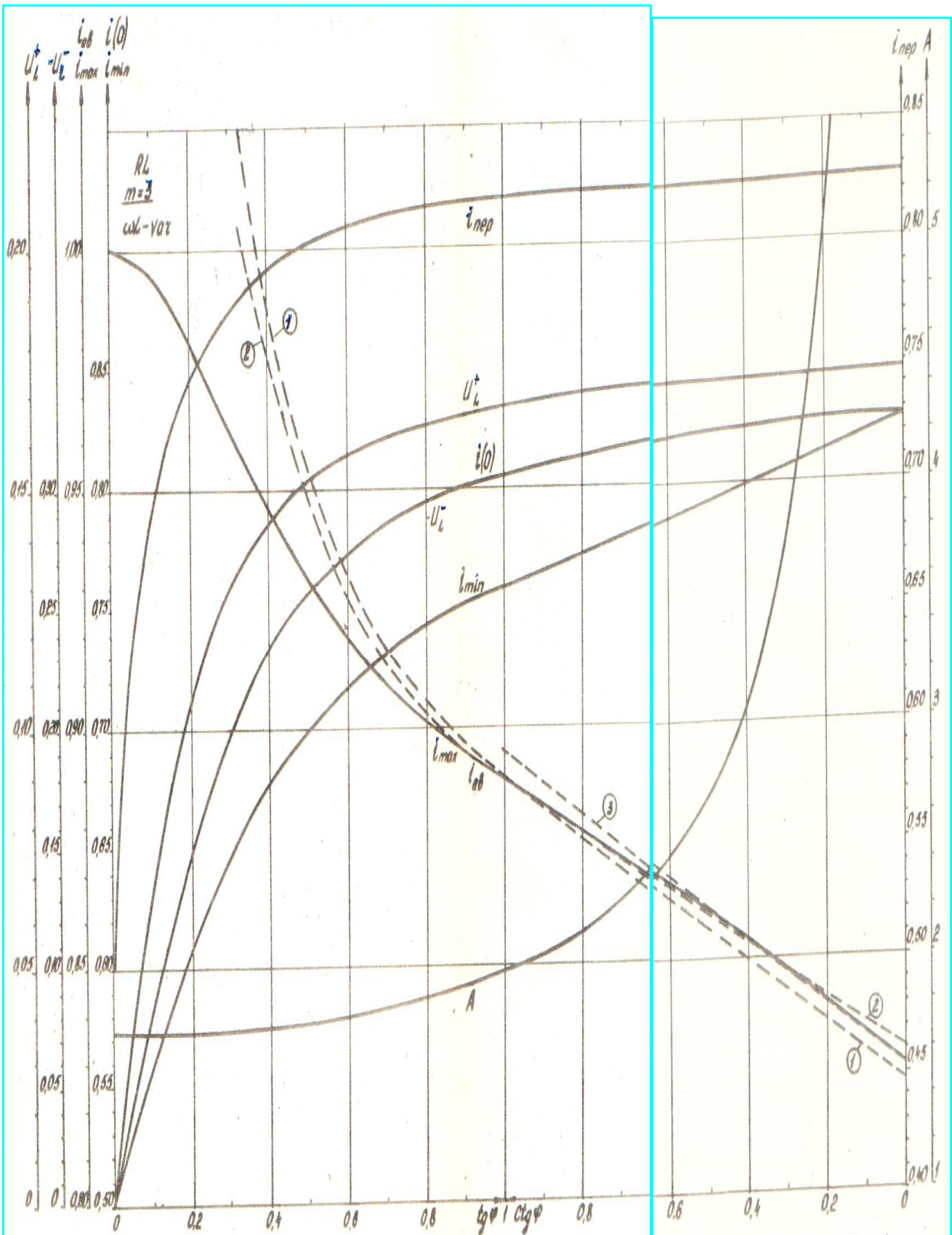


Рис.23. Параметрические зависимости амплитуд напряжения на индуктивности при  $Q=S_0$  и токовых величин при  $Q=S_0/R$ .

## 2. Пульсации напряжения (тока) полезной нагрузки.

Постоянная составляющая является полезным результатом выпрямления. В её получении - назначение выпрямителя. В реальном устройстве на фоне постоянной пульсирует переменная составляющая, наличие которой нежелательно, вредно. Вредный результат выпрямления оценивают посредством коэффициента пульсации. В настоящее время существует около пяти различных определений величины пульсации. Мы будем находить пульсации,

а/ определяемые как относительный размах

$$\Delta \bar{u} = \frac{\Delta u}{U_0} = \frac{\Delta i}{I} = \frac{i_{max} - i_{min}}{I} \quad , \quad (2.27)$$

б/ оцениваемые как отношение действующего значения переменной составляющей к постоянной

$$\Delta u_n = \frac{u_n}{U_0} = \frac{I_n}{I} = \sqrt{k_\varphi^2 - 1} \quad , \quad (2.28)$$

где  $k_\varphi = I_n/I$  - коэффициент формы.

Частота пульсаций  $f_\Delta = m f_c$  .

## 3. Условная мощность нагрузки

$$P_{(R)} = U_0^2 = I_{(R)}^2 \quad . \quad (2.29)$$

Индекс ( R ) указывает на используемое основание.

## 4. Полезная мощность.

$$P_{(R)} = u_0^2 = I_{(R)}^2 \quad . \quad (2.30)$$

## 5. Среднее значение тока вентилей

Поскольку за период  $\Phi$ эдс через нагрузку проходит  $m$  импульсов тока вентилей, то

$$I_\Phi = \frac{1}{m} I \quad . \quad (2.31)$$