

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

P-443

Т. Тэнэсеску

ОБ УСИЛЕНИИ ОЧЕНЬ КОРОТКИХ  
ИМПУЛЬСОВ

Дубна 1959 год

P-443

Т. Тэвэсеску

543/10 1992.  
ОБ УСИЛЕНИИ ОЧЕНЬ КОРОТКИХ  
ИМПУЛЬСОВ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Показано, что усиление коротких импульсов /меньше 0,1 мксек/, обычно встречающихся в ядерной физике и содержащих информацию в своих фазах или амплитудах, более удобно осуществить при помощи усилителей с настроенными контурами.

В начале показан способ расчета широкополосных усилителей при помощи предложенной универсальной диаграммы и указываются недостатки усилителей для поставленной задачи.

Далее изучается реакция усилителя с настроенными контурами /  $Q = 1 - 3$  /; выводятся кривые реакции в двух частных случаях, когда на вход усилителя подается полусинусоидальный импульс.

Показано, что при использовании усилителей такого типа, намного упрощается их изготовление, так как с малым числом каскадов возможно большое усиление без удлинения импульсов.

## 1. В в е д е н и е

В радиотехнике и особенно в ядерной физике часто ставится вопрос об усилении очень коротких импульсов, длительностью менее 0,1 мксек; такие импульсы отмечают некоторые события и содержат информацию в своих фазах или амплитудах. В таких случаях все импульсы приблизительно одинаковы, так что точное воспроизведение их формы необязательно; только ширина импульсов должна вообще оставаться неизменной.

Для указанной цели обычно применяют широкополосные усилители с  $RC$  - каскадами, компенсированные /для устранения уменьшения коэффициента усиления на высоких частотах / или без компенсации, либо каскады с распределительными параметрами. Ниже показывается, что более подходящими в таких случаях являются усилители с настроенными контурами.

## 2. Усилители с $RC$ -каскадами, возбуждаемые прямоугольными импульсами

Эти усилители имеют простые или индуктивно компенсированные  $RC$  -каскады /для диапазона высоких частот/.

Характеристики таких усилителей обычно выражаются в режиме возбуждения единичным скачком или прямоугольным импульсом.

В случае  $n$  каскадов общее усиление  $\alpha$  равно  $\alpha_1^n$ , где  $\alpha_1$  , представляет усиление одного каскада:

$$\alpha = \alpha_1^n, \quad \alpha_1 = SR, \quad //1//$$

$S$  обозначает крутизну лампы /предполагается пентод с большим внутренним сопротивлением/ и  $R$  -анодную нагрузку.

Такой усилитель характеризуется также длительностью  $f$  фронта выходного импульса при возбуждении единичным скачком.

Известны соотношения

$$f = \sqrt{n} f_1, \quad f_1 = KRC, \quad //2//$$

где  $f_1$  представляет фронт выходного сигнала одного каскада,  $C$  - емкость шунтирующую сопротивление  $R$ , а  $K$  - коэффициент, равный / по Эльмору/ 2,51 в случае простых  $RC$  каскадов и 1,66 - в случае индуктивно компенсирующих каскадов /  $\frac{L}{CR^2} = 0,25$  /.

Другой характеристикой усилителя является запаздывание фронта выходного сигнала. Это запаздывание практически пропорционально числу каскадов, оно не имеет вообще значения в поставленной нами задаче.

Поданный на вход прямоугольный сигнал длительностью  $\Delta$  можно считать результирующим от наложения двух единичных скачков, один из которых положительный, а другой отрицательный, разделенных промежутком времени  $\Delta$ . При этом возможны два случая в зависимости от того,  $\Delta > f$  или  $\Delta < f$ . Эти случаи представлены на рис. 1а и 1б в идеальной трапецеидальной форме выходного сигнала /обычно углы округлены/.

В первом случае ширина трапецеидального выходного импульса у половины высоты также равна  $\Delta$ , а во втором случае эта ширина равна  $f$ , т.е. сигнал удлиняется при усилении /  $f > \Delta$  /.

Что же касается усиления, то в первом случае оно равно  $\alpha$ , а во втором случае -  $\frac{\Delta}{f} \alpha$ , так как плоская часть этого выходного импульса не может подняться до уровня плоской части выходного сигнала при единичном скачке.

Для определения характеристик усилителя, соответствующего определенным требованиям, построена общая диаграмма /рис.2/, где в логарифмическом масштабе представлена зависимость между  $\alpha$  и  $\alpha_1$

$$\log_e \alpha = n \log_e \alpha_1, \quad \log_e \alpha = \left(\frac{q}{\alpha_1}\right)^2 \log_e \alpha_1,$$

параметром является  $n$  или  $q = \frac{sf}{RC}$

Диаграммой рис. 2 можно непосредственно пользоваться, когда  $\frac{\Delta}{f} > 1$ . Если же  $\frac{\Delta}{f} < 1$ , то необходимо иметь в виду, что эффективное усиление уменьшается до значения  $\frac{\Delta}{f} \alpha$ .

Заметно, что максимум кривых  $q = const.$  имеет место при  $\log_e \alpha_1 = 0,5$  или  $\alpha_1 = 1,6487$ . Максимальному значению на одной из этих кривых соответствует число каскадов  $n = 2 \log_e \alpha$ .

На рис. 3 представлена зависимость максимума  $\alpha$  от параметра  $q$  /в логарифмических масштабах/.

В качестве примера предположим, что необходимо осуществить усилитель с  $n$  одинаковыми каскадами для передачи импульса длительностью  $\Delta = 10^{-8}$  сек при усилении  $\alpha = 5000$ . Найдем число каскадов и анодную нагрузку  $R$ .

Полагая, что  $S = 23$  ма/в и  $C = 25$  пф, найдем переменную  $q$  в предельном случае  $\Delta = f$  для простых  $RC$  каскадов:

$$q = \frac{S\Delta}{2.51C} = \frac{23 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-8}}{2.51 \cdot 25 \cdot 10^{-12}} = 3.67.$$

Соответствующая кривая на рис. 2 не доходит до значения  $\alpha = 5000$ , следовательно придется принять условие  $\frac{\Delta}{f} < 1$ , т.е. удлинение выходного сигнала. В то же время эффективное усиление уменьшается до значения  $\alpha_r = \frac{\Delta}{f} \alpha$ , где  $\alpha$  - усиление, найденное с помощью диаграммы рис. 2.

На основании соотношения  $\frac{\alpha}{\alpha_r} = \frac{f}{\Delta}$ , выводим

$$\log_e \alpha - \log_e \alpha_r = \log_e f - \log_e \Delta.$$

Это приводит нас к следующему графическому построению на рис. 3 для определения  $\alpha$  при минимальном фронте  $f$ .

Возьмем точку  $A$  с координатами  $\log_e \alpha_r$  и  $\log_e q$ , где  $\alpha_r = 5000$ , и проведем прямую с наклоном 1, т.е. параллельно прямой, проходящей через начало координат и через точку, имеющую абсциссу  $\log_e q$ , где  $q = 10$ , и ординату  $\log_e \alpha$ , где  $\alpha = 10$ . Прямую продолжим до пересечения с кривой в точке  $B$ . Координаты этой точки дают оптимальные значения  $\alpha$  и  $q$ . В нашем случае находим для  $\alpha$  значение близкое к 10.000 и  $q \approx 7$ . Оптимальное число каскадов определяется из соотношения  $n = 2 \log_e \alpha = 18.4$ . При этом числе каскадов величина  $f$  минимальна ( $f$  представляет также среднюю длительность выходного импульса, отсюда получается удлинение выходного импульса). Можно взять и меньшее число каскадов и, если выбрать подходящее значение для  $R$ , получить общее усиление, также равное 10000. Однако в этих случаях длительность выходного импульса возрастает:

$n$	18	12	8 каскадов
$f$	19,3	20,35	24,4 ммксек.

В случае индуктивно компенсированных  $RC$  каскадов /  $\frac{L}{CR^2} = 0,25$  /  
получаем

$$q = \frac{23 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-8}}{1,86 \cdot 25 \cdot 10^{-12}} = 5,55 \dots$$

И в этом случае необходимо принять  $\frac{A}{f} < 1$ . Графическое построение  
на рис. 3 теперь дает значения:  $\alpha = 6000$ ,  $q = 6,86$ .  $n = 17,4$ ,  
 $f = 12,3$  мксек.

Возникает вопрос - нельзя ли осуществить каскады другого типа, которые  
при том же усилении привели бы к меньшему числу каскадов без удлинения  
импульса?

### 3. Усилители с $RC$ каскадами, возбуждаемые синусоидальными импульсами

В многокаскадных усилителях сигналы искажаются от одного каскада к  
другому. Выше предполагалось, что входной импульс имеет прямоугольную фор-  
му. По мере прохождения через чередующиеся каскады усилителя, передний  
и задний фронты импульса наклоняются /крутизна нарастания и падения умень-  
шается/, а вершина округляется. Все же характеристики усилителя оценива-  
ются с помощью формул предыдущего параграфа.

Однако для некоторого промежуточного каскада округленный сигнал необ-  
ходимо сохранить практически симметричным в его верхней части, если хотим  
чтобы его ширина не увеличивалась. В таком случае сигнал можно выразить с доста-  
точной степенью точности полусинусоидой. Приложенный входной сигнал также  
будем считать полусинусоидальным /а не прямоугольным/. Входной сигнал уси-  
лителя получается также от вакуумной электронной лампы. Даже при прямо-  
угольном возбуждении получаемые на выходе электронных ламп импульсы име-  
ют полусинусоидальную форму, если длительность сигнала сравнима со време-  
нем пролета электронов внутри лампы /случай фотоумножителя, работающего  
в области миллимикросекунд/.

В связи с этим ниже изучается работа одного каскада при полусинусои-  
дальном возбуждении, что даст возможность сделать выводы относительно условий  
работы многокаскадного усилителя.

Так как обычно применяются пентоды с большим внутренним сопротивлением, предположим, что параллельная цепь  $RC$  возбуждается полусинусоидальным импульсом тока  $SU_1 \sin \Omega t$  /скрутизна лампы/ от генератора с большим внутренним сопротивлением. Можно считать, что выходной сигнал  $U_2$ , т.е. напряжение на зажимах цепи /рис.4/, зависит от трех факторов от амплитуды тока генератора  $SU_1$ , от абсолютного значения полного сопротивления цепи при частоте  $\Omega(|Z|)$ ,

от обобщенной переходной функции реакции цепи. Обозначая эту функцию реакции через  $U$ , можно написать:

$$U_2 = SU_1 |Z| U.$$

Обобщенная переходная функция имеет две области: первая той же длительности, что и входной сигнал  $SU_1 \sin \Omega t (0 < \Omega t < \pi)$ , и вторая - после окончания входного сигнала - до бесконечности /  $\Omega t > \pi$  /.

Если при  $t = 0$  имеем  $u_2 = 0$ , а из формы приложенного сигнала имеем  $i_c = C \frac{du_2}{dt} = 0$ , следовательно, обобщенную функцию реакции можно написать в виде:

$$u(t) = a(t) - b(t) \quad \text{для } 0 < \Omega t < \pi$$

$$u(t) = c(t) - b(t) \quad \text{для } \pi < \Omega t,$$

где

$$a(\Omega t) = \sin(\Omega t + \psi)$$

$$b(\Omega t) = \sin \psi e^{-\alpha t} \quad \alpha = \frac{1}{RC}$$

$$c(\Omega t) = -b(\Omega t - \frac{\pi}{2}) \quad \text{tg } \psi = -RC\Omega.$$

На рис. 5 представлены кривые  $a(\Omega t)$ ,  $b(\Omega t)$  и  $c(\Omega t)$  для частного случая  $RC\Omega = 3$ ; их разность дает функцию  $u$  /заштрихованную на рисунке/. Точка  $P$  разделяет фазы I и II.

Когда  $RC$  очень мало /меньше 1/ кривые рис. 5 принимают показанный на рис. 6а /вид  $RC\Omega = 0,364$ /, а когда  $RC\Omega$  очень велико, кривые показаны на рис. 6 в /  $RC\Omega = 10$  /.



Заметим, что в первом случае /рис. 6а/ полусинусоидальный импульс сохраняет свою форму и ширину  $(\frac{\pi}{2})$ , а во втором случае /рис. 6в/ длительность фронта удваивается от  $\frac{\pi}{2}$  до  $\pi$ , а длительность заднего фронта /среза/ намного возрастает /практически до значения  $RC\Omega$ /. В то же время амплитуда импульса равна в первом случае единице, а во втором случае имеет практически значение  $Z$ .

Выходное напряжение  $u_2$  зависит и от модуля  $|Z|$  полного сопротивления параллельной цепи  $RC$  при частоте  $\Omega$ . Для того, чтобы иметь выходной сигнал большой амплитуды, это сопротивление должно иметь значения

$$|Z| = \frac{R}{\sqrt{1+R^2C^2\Omega^2}} = \frac{1}{C\Omega} \zeta,$$

где

$$\zeta = \frac{RC\Omega}{\sqrt{1+R^2C^2\Omega^2}}.$$

Для этого, с одной стороны,  $C\Omega$  должно быть малым, а, с другой стороны,  $RC\Omega$  должно быть большим. Обычно ширина входного импульса задана, а  $C$  нельзя уменьшить ниже значения паразитной емкости монтажа, т.е. фактор  $C\Omega$  имеет определенное значение. Фактор  $RC\Omega$  следует выбрать большим, но ширина входного импульса растет с увеличением  $RC\Omega$ . Эти ограничения следует иметь в виду при выборе значений  $RC\Omega$ .

Отметим, что амплитуда выходного сигнала  $u_2$  изменяется по отношению к параметру  $RC\Omega$  так же, как изменяется произведение  $\zeta$  на амплитуду обобщенной функции реакции  $u$ . Это произведение  $\zeta u$  назовем относительной амплитудой выходного импульса сигнала  $u_2$ .

Если  $RC\Omega = 1$  амплитуда  $u$  имеет значение 1,07, относительная амплитуда  $u_2$  равна 0,76, то ширина импульса /при высоте 0,707/ практически сохраняется.

Если  $RC\Omega = 3$ , относительная амплитуда  $u_2$  равна 1,31, а ширина импульса /при высоте 0,707/ возрастает приблизительно на 40%, увеличение амплитуды обуславливает, в свою очередь, увеличение ширины импульса. При увеличении параметра  $RC\Omega$ , кроме увеличения амплитуды и ширины импульса, увеличивается также и запаздывание выходного сигнала.

Если исследовать смещение вершины /максимума/ импульса, увидим, что при очень больших значениях  $RC\Omega$  запаздывание импульса равно  $\frac{\pi}{2}$ .

В поставленной нами задаче усиления это запаздывание одинаково для всех импульсов и не имеет значения.

#### 4. Усилители с настроенными контурами

Уменьшение усиления  $RC$  каскадов при высоких частотах устраняется обычно в широкополосных усилителях включением индуктивности  $L$  последовательно с нагрузкой  $R$ . По существу, анодная цепь принимает форму параллельного настроенного контура с малым  $Q$  /вообще меньше единицы/.

Предположим, что контур имеет большие значения  $Q$ , т.е. работает с более выраженной настройкой. Известно, что в широкополосных усилителях область высоких частот в частотной характеристике служит для воспроизведения крутых участков сигнала, а область низких частот - для воспроизведения медленных изменений, и в особенности плоской части сигнала. В данном случае нас интересует только первая задача, следовательно мы можем обойтись без диапазона низких частот и сосредоточить наше внимание на подъеме частотной характеристики в области высоких частот. Такое решение особенно выгодно для усиления слабых сигналов, так как уровень шумов уменьшается /шумы сосредоточены обычно в диапазоне низких частот/.

Поэтому исследуем сначала показанный на рис. 7 настроенный контур; его частотная характеристика падает линейно к частоте, равной нулю, и имеет максимум при частоте  $\frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ .

Если действовать импульсом тока  $SU_1 \sin \Omega t$  на этот контур, на его зажимах получается выходное напряжение.

$$u_2(t) = \frac{SU_1}{C\Omega} \zeta u(t),$$

где

$$\zeta = \frac{\frac{\Omega}{\omega_0}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\Omega}\right)^2}}$$

$$\begin{aligned} u(t) &= a(t) - b(t) & \text{для } 0 < \Omega t < \pi \\ u(t) &= c(t) - b(t) & \text{для } \pi < \Omega t \end{aligned}$$

$$a(\Omega t) = \sin(\Omega t + \Psi)$$

$$b(\Omega t) = \frac{\sin \Psi}{\sin \varphi} e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi)$$

$$c(\Omega t) = -b\left(\Omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\alpha = \frac{1}{2RC} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

$$\operatorname{tg} \Psi = Q \left( \frac{\omega_0}{\Omega} - \frac{\Omega}{\omega_0} \right) \quad Q = RC \omega_0$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \Psi \frac{\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}}{\frac{1}{2} \left( \frac{\omega_0}{\Omega} + \frac{\Omega}{\omega_0} \right)}$$

На рис. 8 показана зависимость  $\zeta$  от  $\frac{\Omega}{\omega_0}$ , для трех частных значений  $Q$ .

На рис. 9 указывается графический метод определения функции  $\underline{u}$ , с предварительным определением функций  $a(t), b(t), c(t)$ . Разности этих кривых, заштрихованные на рисунке, дают значения  $\underline{u}$  в разные моменты  $\Omega t$ .

Отметим, что в этом случае, если на входе приложен единичный полусинусоидальный импульс, то на выходе получается затухающее колебательное напряжение. Практический интерес представляет положительный импульс колебания или еще второй импульс /отрицательный/. Чем больше  $Q$ , тем меньше затухание чередующихся импульсов выходного сигнала, практически при  $Q > 3$  эти вторичные импульсы уже недопустимы. Можно принять, что полезные значения  $Q$  заключены здесь между 1 и 3.

Характеристики этих импульсов: амплитуда, ширина и запаздывание зависят от параметров  $Q$  и  $\frac{\Omega}{\omega_0}$ .

Представляет интерес частный случай  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 1$ , когда  $\Psi = 0$  и  $\varphi = 0$ . На рис. 10 показаны обобщенные функции реакции  $\underline{u}$  для трех значений  $Q$  /1, 2 и 3/.

Отметим, что между угловой частотой  $\Omega$  и угловой частотой  $\omega$  существует небольшая разница, уменьшающаяся, когда  $Q$  возрастает; при  $Q > 2$  этой разницей можно пренебречь. При  $Q = 1$  равенство  $\Omega = \omega$  получается, когда  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 0,866$ .

Что же касается относительных амплитуд сигнала  $\mu_2$ , они определяются произведением  $\zeta u$ . В вышеуказанных трех случаях /  $Q = 1; 2$  и  $3$  / первое положительное полуперебание имеет соответственно амплитуды 0,48, 0,72, 0,84.

В этом случае /  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 1$  / ширина выходных импульсов меньше ширины входных импульсов, например, на высоте  $1/2$ ; ширина выходных импульсов составляет около 0,8 ширины входных импульсов.

Если выбрать  $\frac{\Omega}{\omega_0} > 1$ , то  $\psi$  и  $\varphi$  становятся отрицательными. На рис. 11 показаны кривые для случая  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 2$  и  $Q = 1; 2$  и  $3$ . Видно, что ширина выходного импульса во всех этих случаях составляет около 1,15 ширины входного импульса. Ширина импульса на входе и на выходе остается неизменной, если  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 1,5$ .

Что же касается относительных амплитуд сигнала  $\mu_2$  в первом положительном полуперебании, то при  $Q$  равном 1, 2 и 3 они имеют значения 0,98, 1,16 и 1,26.

При больших значениях  $\frac{\Omega}{\omega_0}$  /  $\frac{\Omega}{\omega_0} > 2$  / получаются большие амплитуды, но в то же время ширина импульса возрастает. Например, при  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 3,33$  и  $Q = 1$ , относительная амплитуда  $\mu_2$  равна 1,22, а ширина выходного импульса /на высоте  $1/2$ / на 27% больше ширины входного импульса, что обычно неприемлемо.

Если  $\frac{\Omega}{\omega_0} < 1$ , выходной сигнал видоизменяется: его амплитуда уменьшается, ширина импульса уменьшается, и, в общем, значение первого отрицательного полуперебания увеличивается по сравнению с первым положительным полуперебанием. Для случая  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 0,5$  обобщенные функции  $\mu$  показаны на рис. 12.

На рис. 13, 14, 15 показаны для одного каскада: приблизительная зависимость относительной амплитуды  $\mu_2$ , отношение ширины выходного импульса /на высоте  $\frac{1}{2}$  / к ширине входного импульса и отношение первой отрицательной амплитуды к первой положительной амплитуде с параметром  $\frac{\Omega}{\omega_0}$ .

Настроенный анодный контур может также принять показанный на рис.16 вид, когда  $L$  и  $R$  расположены последовательно. В этом случае выход-

ной сигнал имеет то же общее выражение, что и в предыдущем случае:

$$u_2(t) = \frac{S U_1}{C \Omega} \zeta u(t),$$

где

$$\zeta = \frac{\sqrt{\frac{1}{Q^2} + \left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)^2}}{\sqrt{\frac{1}{Q^2} + \left(\frac{\Omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\Omega}\right)^2}}$$

$$u(t) = a(t) - b(t) \quad \text{для } 0 < \Omega t < \pi$$

$$u(t) = c(t) - b(t) \quad \text{для } \pi < \Omega t$$

$$a(\Omega t) = \sin(\Omega t + \psi)$$

$$b(\Omega t) = \frac{\sin \psi}{\sin \varphi} e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \varphi)$$

$$c(\Omega t) = -b\left(\Omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$Q = \frac{L \omega_0}{R} \quad \alpha = \frac{R}{2L}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\Omega^2}{\omega_0^2} Q \left( \frac{\omega_0}{\Omega} - \frac{\Omega}{\omega_0} \right) - \frac{1}{Q} \frac{\Omega}{\omega_0}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}}{\frac{\Omega}{\omega_0} \operatorname{tg} \psi + \frac{1}{2Q}}$$

На рис. 17 показывается изменение  $\zeta$  в зависимости от  $\frac{\Omega}{\omega_0}$  для различных значений  $Q$ .

Характеристики цепи рис. 16 синтезированы в кривых обобщенной функции  $u$ , представленных на рис. 18, и в кривых зависимости главных характеристик выходного сигнала от  $\frac{\Omega}{\omega_0}$  и  $Q$ , показанных на рис. 19.

В случае  $\Omega = \omega$  и  $Q = 1$  на рис. 20 иллюстрируется / для цепи рис. 16 / графическое определение обобщенной функции  $u$ . Для первого положительного полупериода амплитуда  $u$  получается равной 0,78;

в этом случае  $\xi = 1,27$ , следовательно, относительная амплитуда  $\underline{u}_2$  равна  $0,78 \times 1,27 = 1$ .

В случае цепи рис. 7, при  $\Omega = \omega$  и  $Q = 1$  /рис. 21/ для амплитуды  $\underline{u}$  получается значение 0,53 и для  $\xi$  - значение 0,83, относительная амплитуда  $\underline{u}_2$  будет меньше:  $0,53 \times 0,83 = 0,44$ . В то же время ширина выходного импульса будет меньше, чем в предыдущем случае, даже меньше ширины входного импульса. Отметим, что в случае цепи рис. 16 входной и выходной импульсы имеют практически одинаковую ширину. Эту цепь можно считать подходящей для усиления импульса на основании первого положительного полупериода, если иметь в виду, что импульс не расширяется, а последующие колебания имеют малые амплитуды.

Вообще говоря, амплитуда первого отрицательного полупериода может быть также использована в конце усиления. В этом случае, чтобы избавиться от последующих бесполезных вторичных полупериодов, применяют выпрямительный диод, который устраняет положительные полупериоды. Такое же устройство можно применять и при использовании только первого положительного полупериода, устраняя в этом случае отрицательное полупериоды. Например, схема рис. 7 при  $\Omega = \omega$  и  $Q = 1$  делает возможным использование первого отрицательного полупериода в выгодных условиях.

Следует отметить, что в усилителе с  $n$  одинаковыми каскадами можно легко исследовать при помощи вышеизложенного метода преобразование первого положительного полупериода выходного сигнала от одного каскада к другому.

Но для исследования последовательного усиления первого отрицательного импульса необходимо иметь в виду, что при переходе от первого каскада ко второму первый отрицательный импульс /у выхода второго каскада/ определяется не только первым входным отрицательным импульсом, но и первым положительным входным импульсом.

Если взять, например, цепь /рис.7/, то получим в случае  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 1$  и  $Q = 1$  следующее значение для относительных амплитуд двух полупериодов:

	Выход первого каскада	Выход второго каскада	Выход третьего каскада
Положительное полупериодное колебание	1	1	1
Отрицательное полупериодное колебание	0,91	0,91+0,91=1,82	0,91+1,82=2,73

В приведенных суммах первое слагаемое соответствует первому входному положительному полупериодному колебанию, а второе - первому отрицательному полупериодному колебанию. Видно, что первый отрицательный импульс усиливается больше, чем первый положительный импульс. То же самое можно сказать относительно второго положительного импульса и следующих вторичных импульсов.

Не следует однако пренебрегать тем фактом, что у выхода первого каскада вторичные импульсы вообще меньше первых импульсов, причем тем меньше, чем меньше  $Q$ . Только при значениях  $Q$  больших 2-3 появляются значительные вторичные импульсы.

Таким образом видно, что иногда выгоднее использовать не первую положительную, а первую отрицательную полуволну.

Если  $a_1$  представляет усиление одного каскада для первой положительной полуволны и  $\tau$  обозначает отношение амплитуды первого отрицательного полупериодного колебания к амплитуде первого положительного полупериодного колебания, общее усиление  $n$  каскадов будет:

$$a_1^n \text{ для первого положительного полупериодного колебания,}$$

$$\tau^n a_1^n \text{ для первого отрицательного полупериодного колебания.}$$

Если желаем иметь одинаковые усилительные каскады, необходимо, чтобы ширина выходных импульсов была равна ширине входных импульсов, т.е. придется работать с параметром  $\frac{\Omega}{\omega_0}$ , близким к единице.

Из вышесказанного следует, что в случае цепи, приведенной на рис. 7, оптимальное усиление, основанное на первом положительном полупериодном колебании, получается при  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 1,3 - 1,6$  и  $Q = 2-3$ ; в этих условиях относительное усиление  $\xi_{\text{отн}}$  равно 0,9 - 1,10, ширина импульса практически не возрастает и вторичные колебания слабы.

В случае схемы, показанной на рис. 16, оптимальное усиление, основанное на первом положительном полупериоде, получается также при  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 0,9-1,3$  и  $Q = 1-2$ , относительное усиление  $\zeta_{\text{ум}}$  получается даже большим.

При усилении, основанном на первом отрицательном полупериоде в случае схемы, показанной на рис. 7, рекомендуются значения  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 0,9-1,3$  и  $Q = 2-3$ , а в случае схемы, показанной на рис. 16, рекомендуются значения  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 1-1,3$  и  $Q = 3$ , в этих случаях ширина выходного импульса стремится к  $\frac{\omega_0}{\pi}$ , и поэтому рекомендуется для  $\frac{\Omega}{\omega_0}$  значение, близкое к единице.

Следует также отметить, что, если принять для  $Q$  большее значение, вторичные колебания не затухают достаточно быстро.

В случае очень слабых сигналов, когда применяется цепь рис. 16, рекомендуется уменьшить постоянную времени межкаскадной  $RC$  цепи связи с тем, чтобы увеличить затухание низких частот.

### 5. Пример

Рассмотрим случай усиления не меньше, чем в 5000 раз полусинусоидального импульса длительностью в  $10^{-8}$  сек ( $\Omega = \frac{\pi}{10^{-8}}$ ). Предполагаем, что применяются пентоды, имеющие  $S = 23$  ма/в и  $C = 25$  пф. В случае цепи рис. 7, если  $Q = 2$  и  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 1,50$  /или в случае цепи рис. 16 с  $Q = 1$  и  $\Omega = \omega$ ), усиление на каскад составляет

$$a_1 = \frac{1 \times 0,023}{25 \times 10^{-12} \pi \cdot 10^8} = 2,93$$

Элементы цепи рис. 7 определяются следующим образом:

$$\frac{\Omega}{\omega_0} = 1,50 \quad , \quad \omega_0 = \frac{\Omega}{1,5} = 2,09 \times 10^8$$

$$L = \frac{1}{C \omega_0^2} = \frac{1}{25 \cdot 10^{-12} \cdot 2,09^2 \cdot 10^{16}} = 0,92 \text{ мкГн}$$

$$R = QL \omega_0 = 2 \cdot 0,92 \cdot 10^{-6} \cdot 2,09 \cdot 10^8 = 386 \text{ Ом}$$



Элементы цепи рис. 16 можно рассчитать следующим образом:

$$\frac{\Omega}{\omega_0} = \frac{\Omega}{\omega} \frac{\omega}{\omega_0} = 1 \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866 \quad \omega_0 = 3,65 \cdot 10^8$$

$$L = \frac{1}{C\omega_0^2} = \frac{1}{25 \cdot 10^{-12} \cdot 3,65^2 \cdot 10^{16}} = 0,3 \text{ мкгн} \quad R = \frac{L\omega_0}{Q} = 109 \text{ ом.}$$

С 8 каскадами получаем усиление, равное 5460, а импульс сохраняет практически свою первоначальную ширину. Это относится к первому положительному импульсу. Задачу можно решать и с меньшим числом каскадов, если усиление основано на первом отрицательном полукколебании. Для этого рассмотрим случай цепи рис. 16 с  $Q = 3$  и  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 1,3$ . Для положительного полукколебания получаем усиление  $1,17 \times 12,93 = 6000$ , что также представляет приемлемое решение.

Как уже было сказано, в конце усиления выпрямительный диод обычно устраняет импульсы нежелательной полярности; чтобы второй положительный или отрицательный импульс не имел слишком большую величину для  $Q$  выбирается значение не больше 3. Таким образом, мертвое время после каждого импульса превосходит ширину первоначального импульса не больше чем в 3-4 раза.

Выходной импульс порядка одного вольта обычно вводится в импульсно-формирующую цепь. При этом в начале бесполезные полуволны устраняются с помощью диода, и затем первое полукколебание проходит через амплитудный дискриминатор. Таким образом, можно получить на выходе последнего каскада импульсы порядка 50 в практически имеющие ширину первоначального импульса; этот начальный импульс, как указывалось в приведенном примере, может иметь на входе усилителя уровень ниже 100 мкв.

### в. Опытные данные

Выше приведенные теоретические результаты были проверены с помощью Иона Доре Ландау в Бухарестском политехническом институте. Для одного каскада /рис.22/ при подаче на вход импульсов указанной на рис. а формы на выходе получается: для  $Q = 1$  импульс показан на рис. б, для  $Q = 2$  импульс показан на рис. в и для  $Q = 3$  импульс указан на рис. д

Первая полуволна воспроизводит входной сигнал. Если после такого каскада вводится диод, режущий первую полуволну, а также переходной каскад и катодный повторитель, то получается выходной импульс, указанный на рис. е. На этом принципе в Бухаресте был создан усилитель с четырьмя каскадами, с одним переходным каскадом и одним катодным повторителем. Использовались лампы 6AG7 для импульсов длительностью 0,1 мксек. Входная амплитуда 100 мкв повысилась на выходе до 5 в.

В Объединенном институте ядерных исследований был создан с помощью Иона Рэиляну усилитель для импульсов длительностью 30 мксек. Использовались лампы 6Ж9П с крутизной 17 ма/в, пентод 6Э5П для оконечного каскада и катодный повторитель на триоде 6С3П /рис. 23/. Этот усилитель с коэффициентом усиления около 1000 использовался в видео-канале специальной телевизионной установки, точно воспроизводящей линейные рисунки.

### 6. Заключение

Для усиления очень коротких /длительностью до 0,1 мксек/ слабых импульсов, содержащих информацию в своей фазе, широкополосные усилители не подходят, так как условия сохранения на выходе длительности первоначального импульса приводят к большому числу усилительных каскадов.

Более подходящими являются каскады с настроенными контурами /рис. 7 и 16/, число которых может быть меньше. В таких случаях рекомендуется выбрать  $Q = 1-3$  и  $\frac{\Omega}{\omega_0}$ , близкое к единице. Когда необходимо большое усиление, то есть больше 3-4 каскадов, рекомендуется использовать первый отрицательный импульс из серии затухающих колебаний, полученных на выходе.

Изложенный метод усиления находит себе применение прежде всего в ядерной физике. Он полезен не только в импульсных усилителях, но и в осуществлении входной цепи усилителя, с которой связан обычно выход фотоумножителя. Можно при этом приспособить параллельную  $LCR$  цепь так, чтобы получить  $\xi_{\text{нм}}$  порядка 1,2, т.е. чтобы амплитуда выходного импульса составляла около 60% напряжения, полученного интегрированием импульса тока в цепи  $RC$ , но практически без удлинения импульса.

543/10 142.

Ширина выходного импульса напряжения /первого положительного полуколебания/ может иногда быть даже меньше входного импульса тока. Этим путем можно пробовать увеличить разрешающую способность схем совпадения в ядерной физике.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 декабря 1959 года.

Л и т е р а т у р а

1. Rozenstein S. Gross E-Electronic & Rad. Eng., 35, Sept 1958, 327.

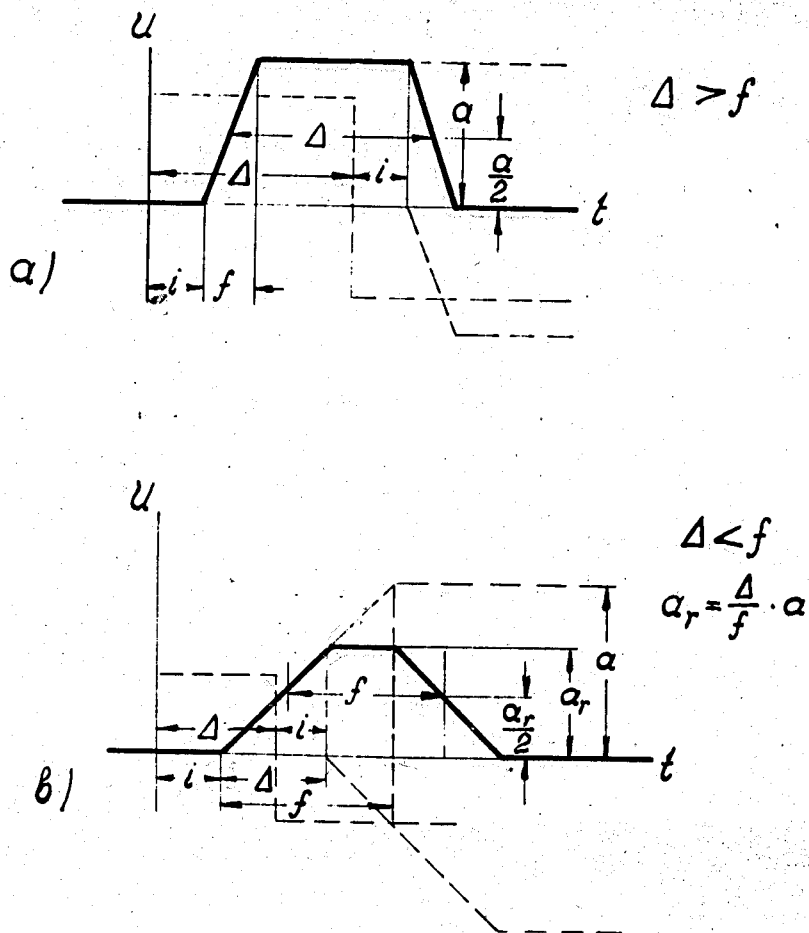


Рис. 1. Выходной сигнал в случае действия на входе идеального прямоугольного импульса.

- а/ продолжительность сигнала больше продолжительности переднего фронта.
- б/ продолжительность сигнала меньше продолжительности переднего фронта.

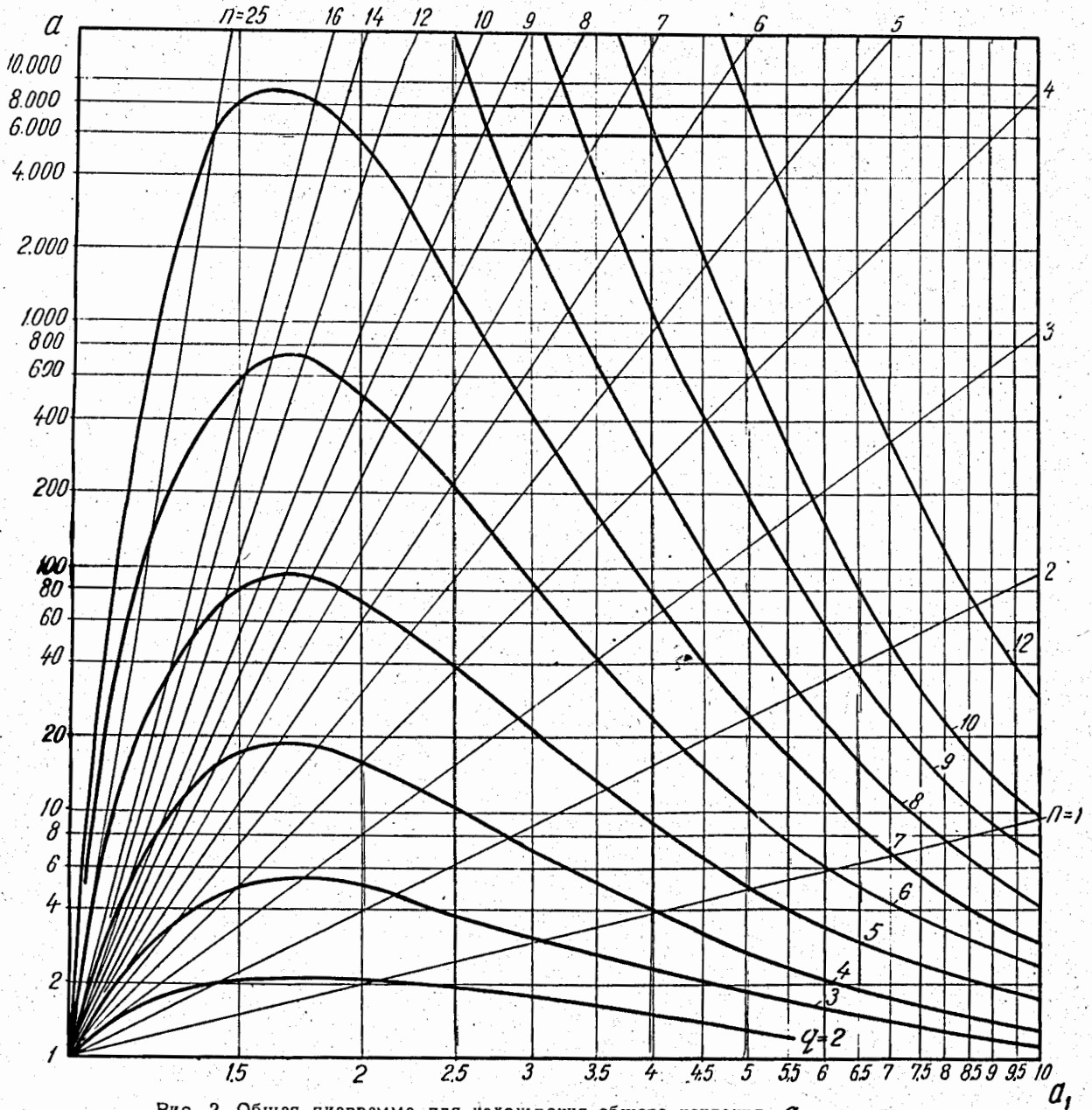


Рис. 2. Общая диаграмма для нахождения общего усиления  $\alpha$  усилителя в зависимости от трех параметров:  $\alpha_1, n$  и  $q = \frac{S_f}{K_C}$ , где  $\alpha_1$  - усиление одного каскада,  $n$  - число каскадов.

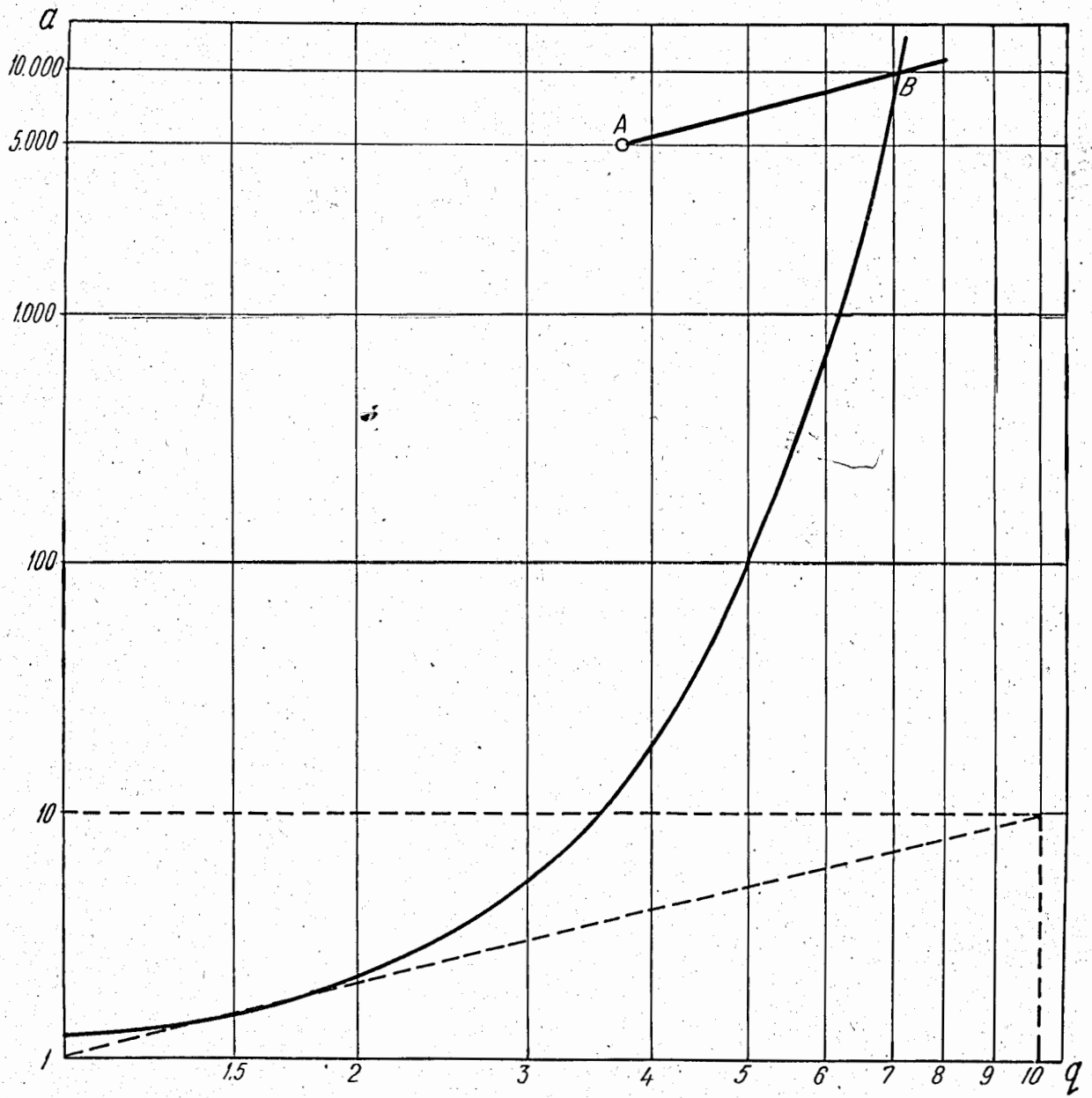


Рис. 3. Максимальное общее усиление, получаемое для разных значений  $q$ .

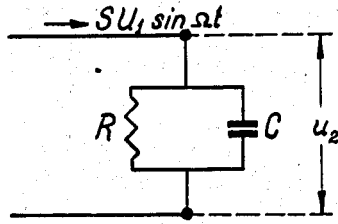


Рис. 4. Эквивалентная схема реостатного усилительного каскада.

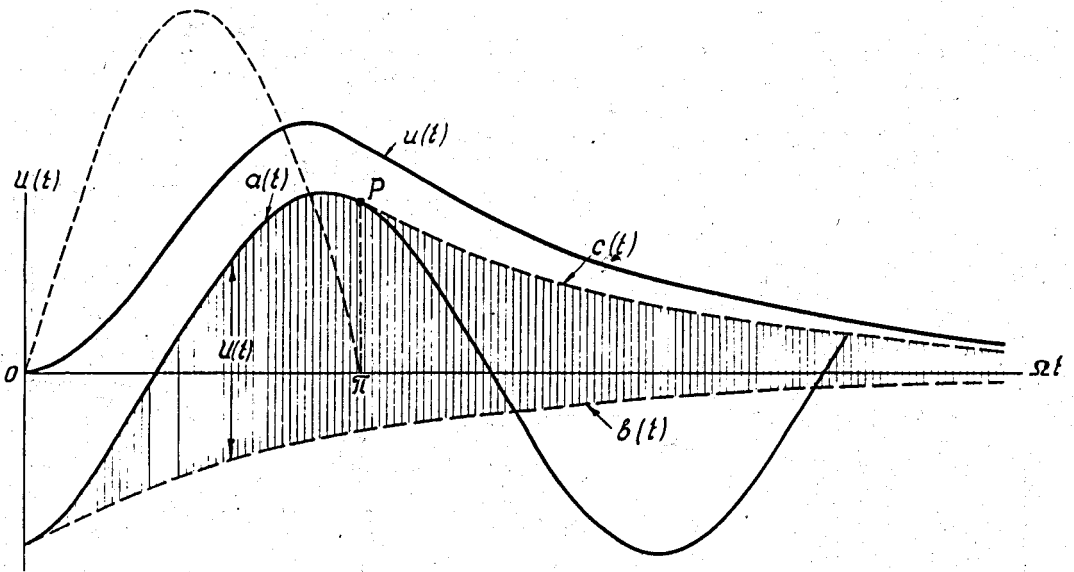


Рис. 5. Графическое определение реакции с помощью функций  $\alpha(\Omega t)$ ,  $\beta(\Omega t)$  и  $\zeta(\Omega t)$  в случае  $RC\Omega = 3$ .

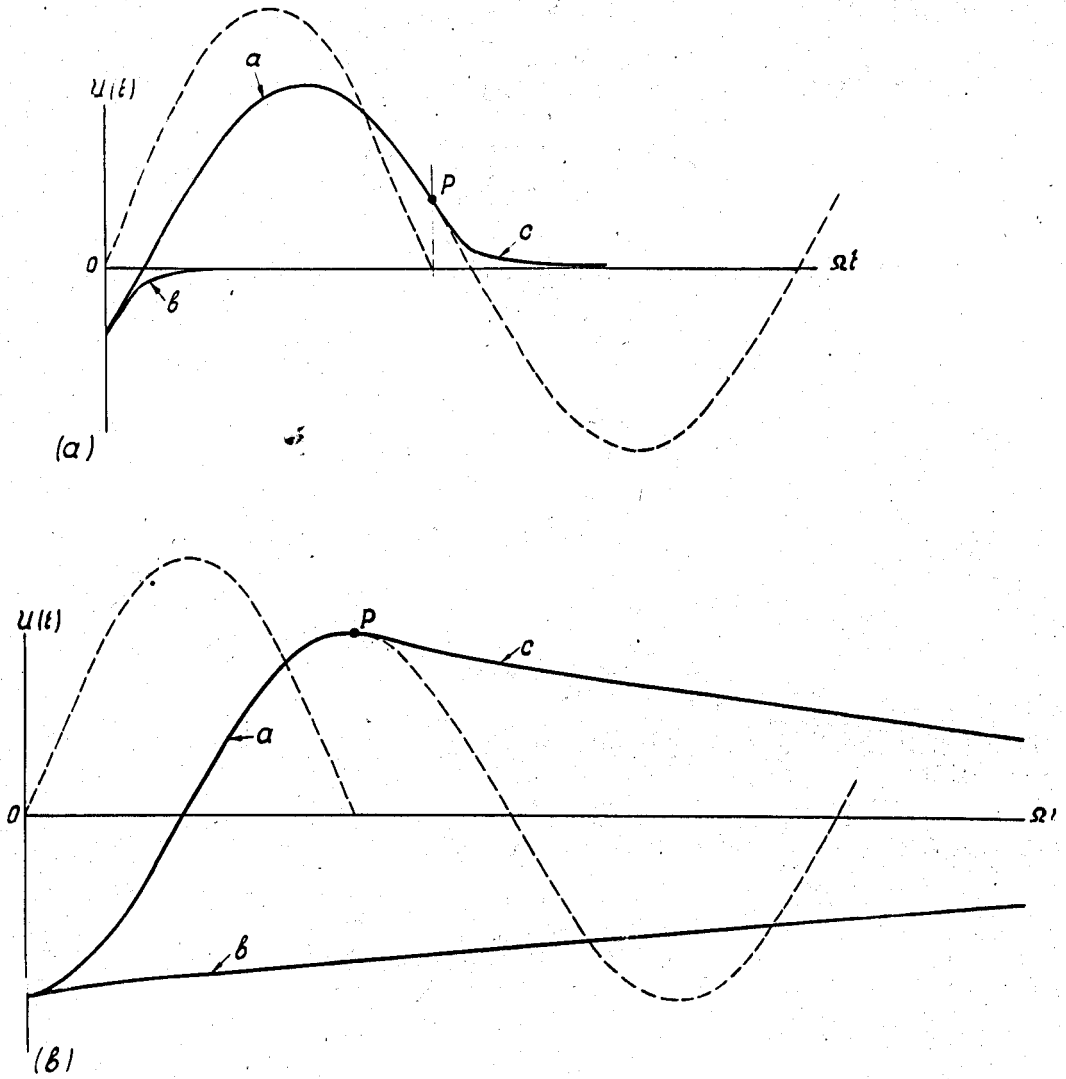


Рис. 8. Определение реакции в случаях: а/  $RC\Omega$  малая величина /  $RC\Omega=0,384$  /  
и в/  $RC\Omega$  большая величина /  $RC\Omega=10$  /.



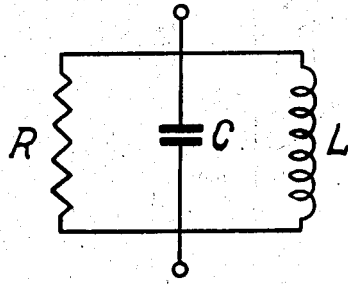


Рис. 7. Анодная нагрузка первого типа для настроенных каскадов.

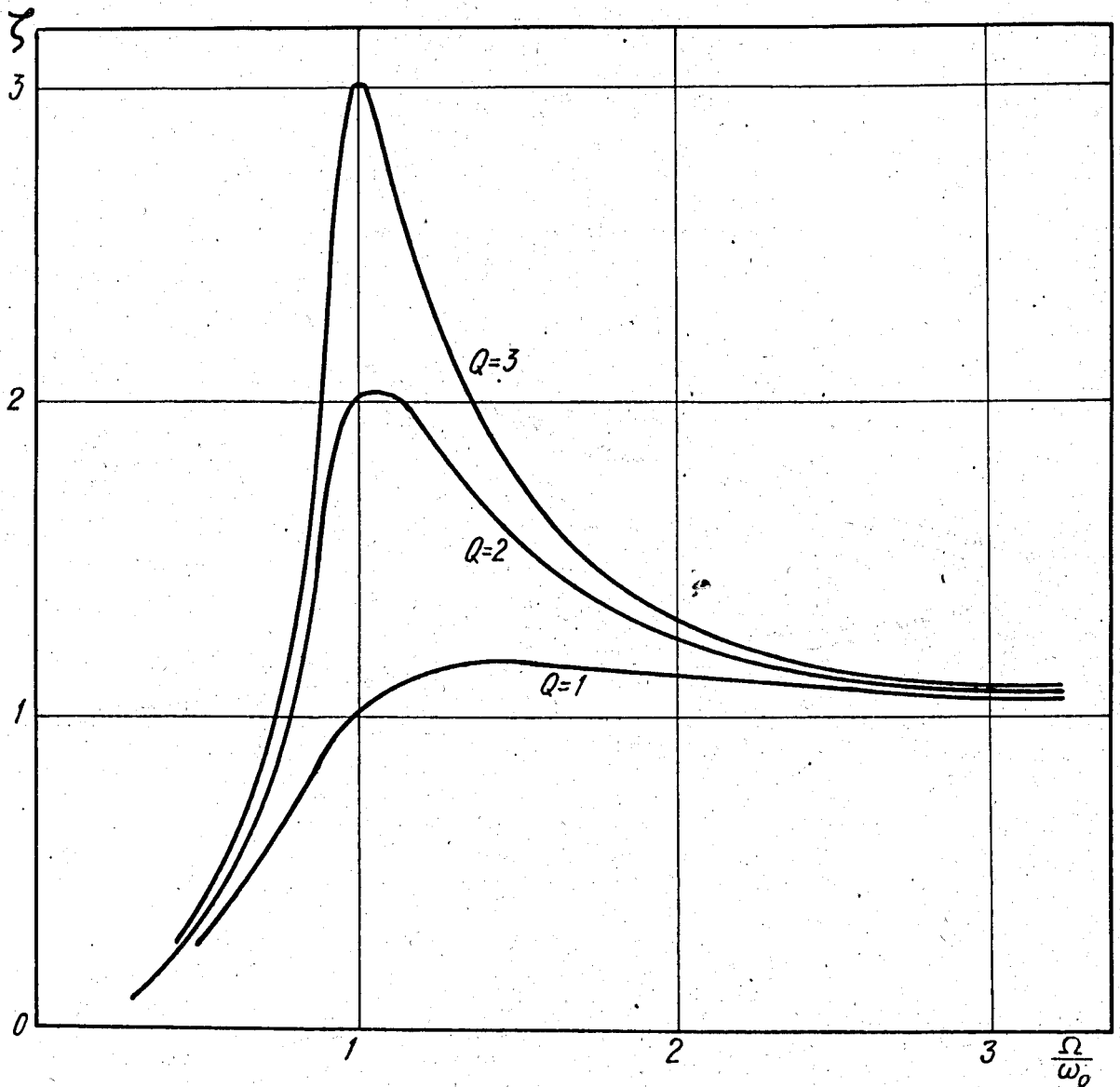


Рис. 8. Изменение множителя  $\xi / \frac{\Omega}{\omega_0}$  для трех значений  $Q$ .

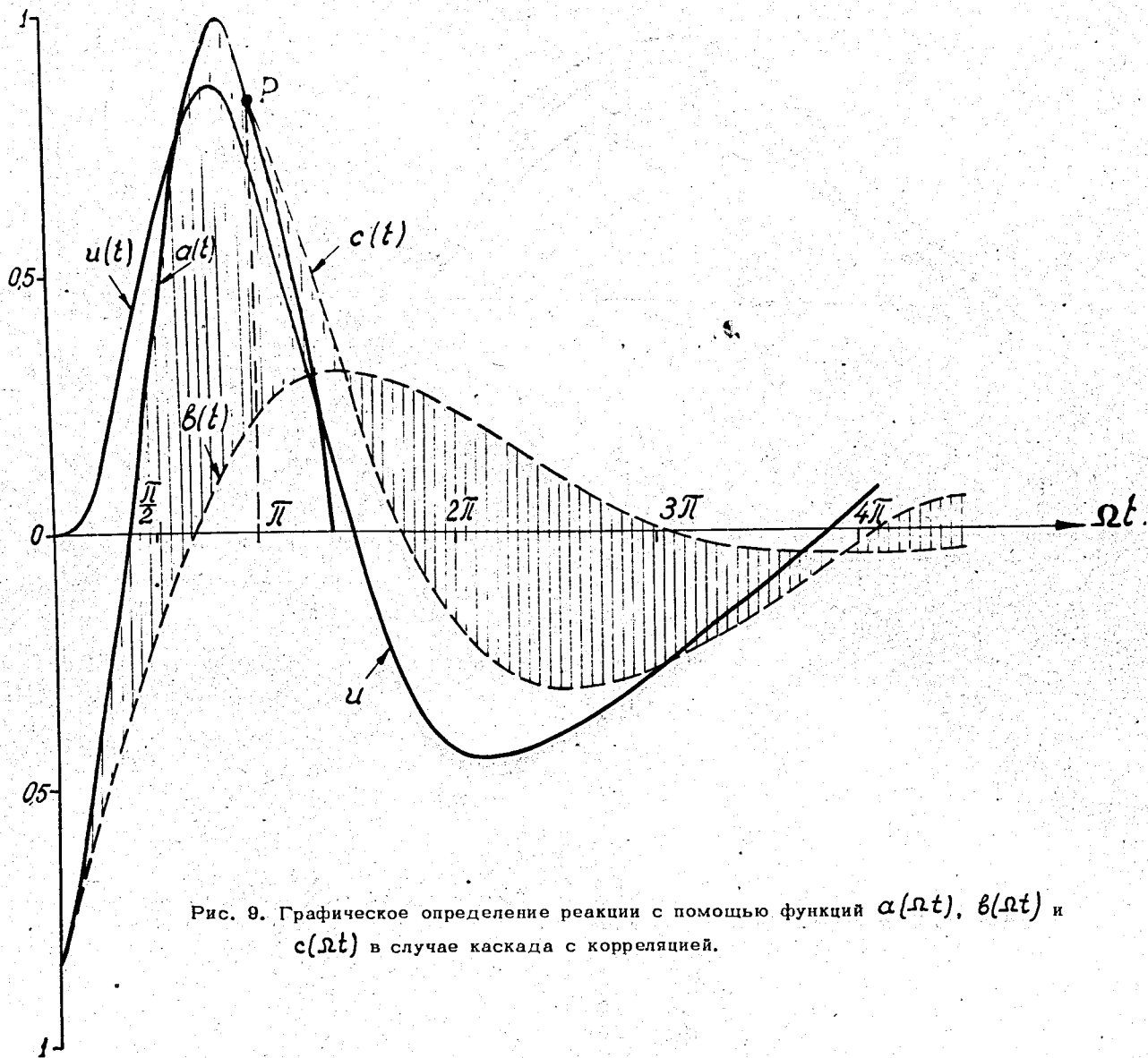


Рис. 9. Графическое определение реакции с помощью функций  $\alpha(\Omega t)$ ,  $\beta(\Omega t)$  и  $c(\Omega t)$  в случае каскада с корреляцией.

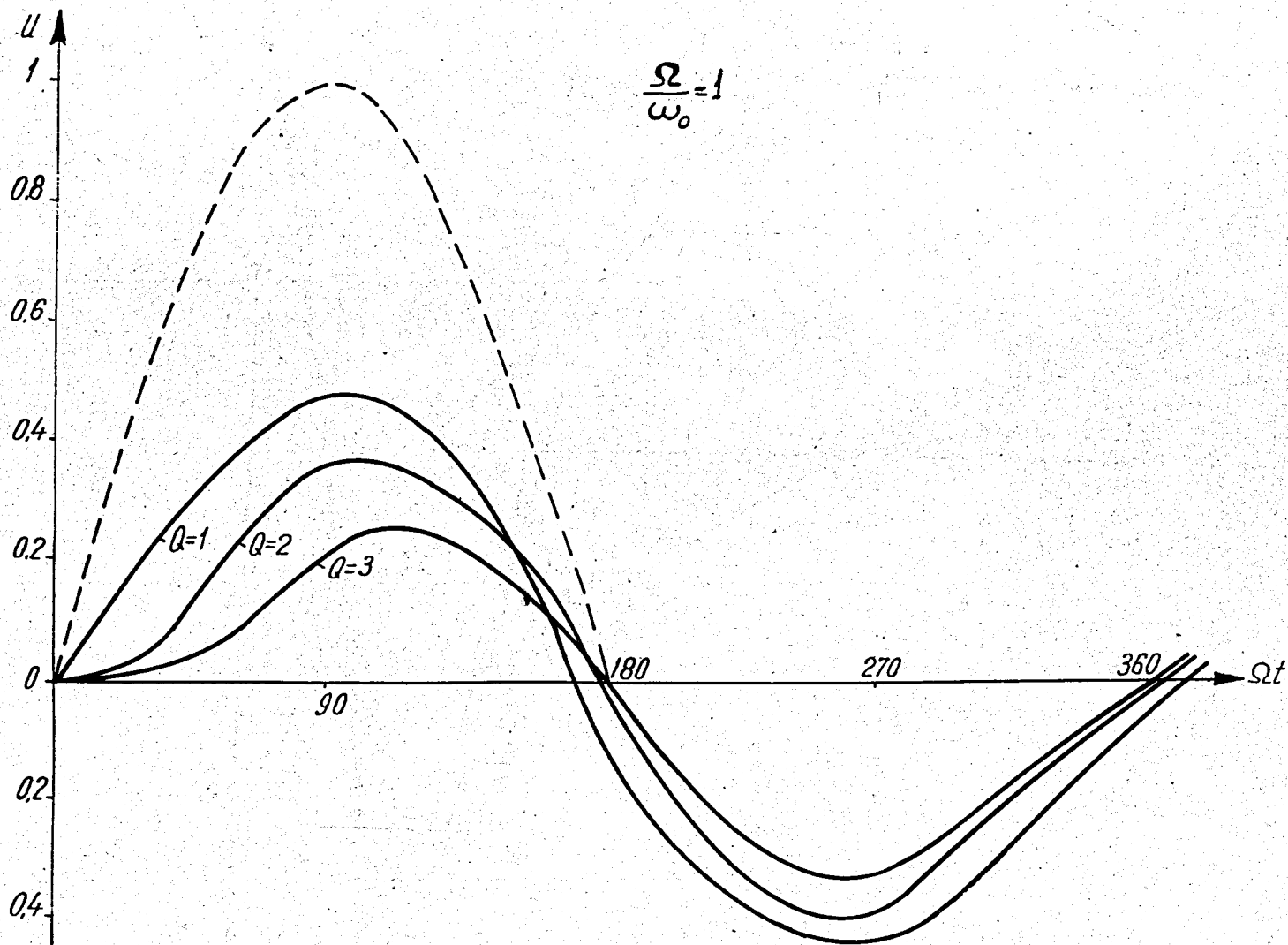


Рис. 10. Нормированные реакции в случае  $\frac{\Omega}{\Omega_0} = 1$  для трех значений  $Q$ .

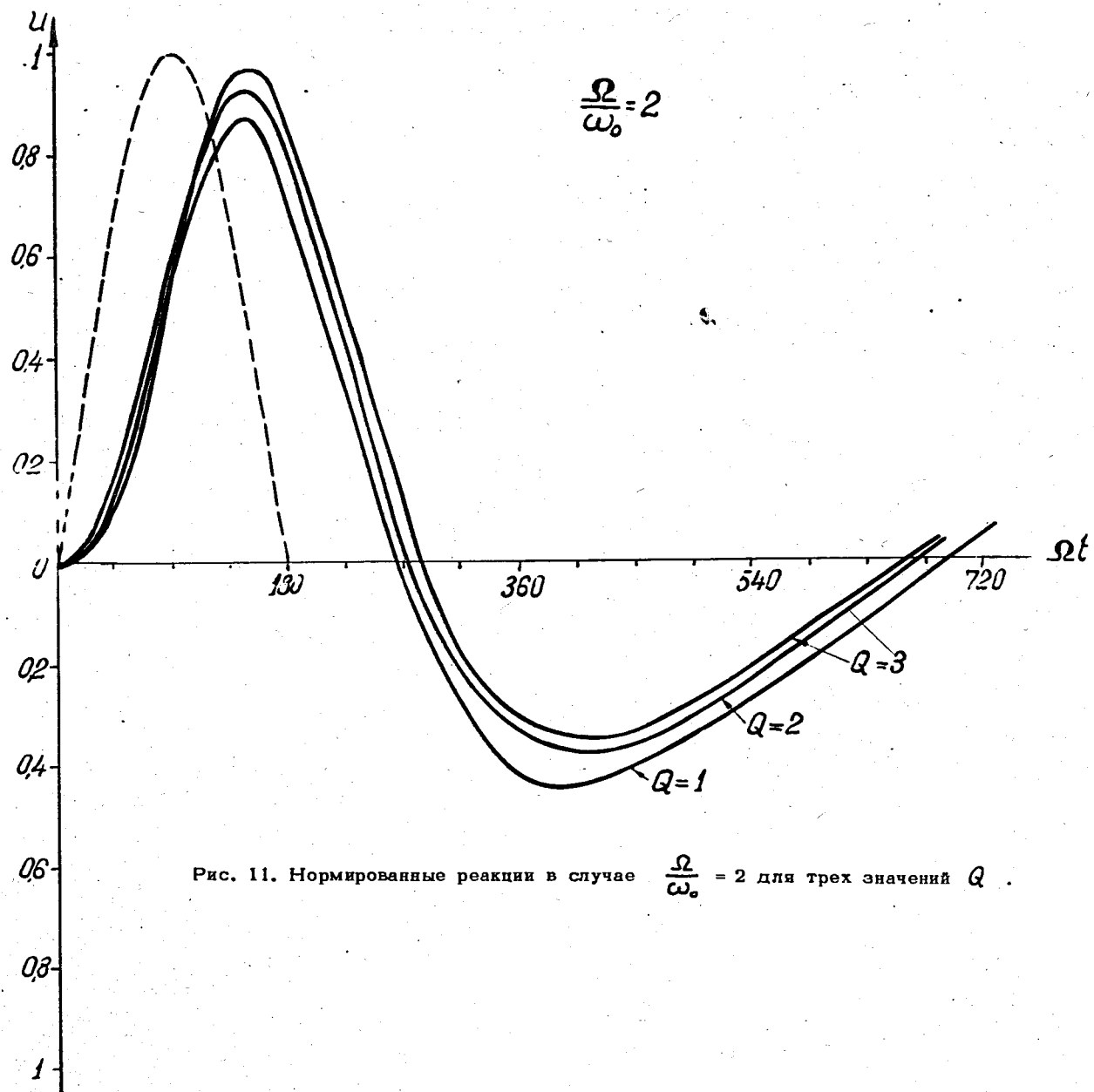


Рис. 11. Нормированные реакции в случае  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 2$  для трех значений  $Q$ .

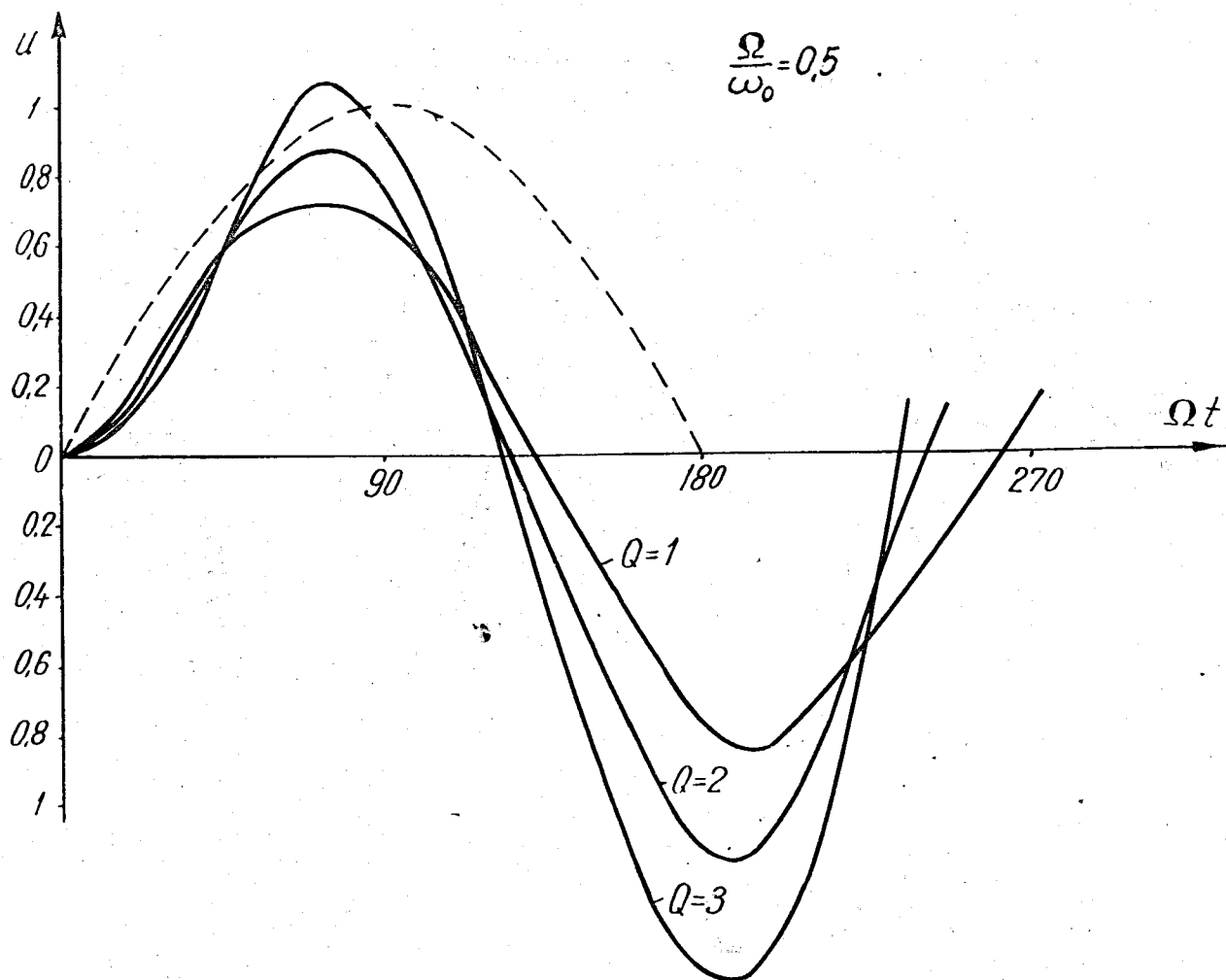


Рис. 12. Нормированные реакции в случае  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 0,5$  для трех значений  $Q$ .

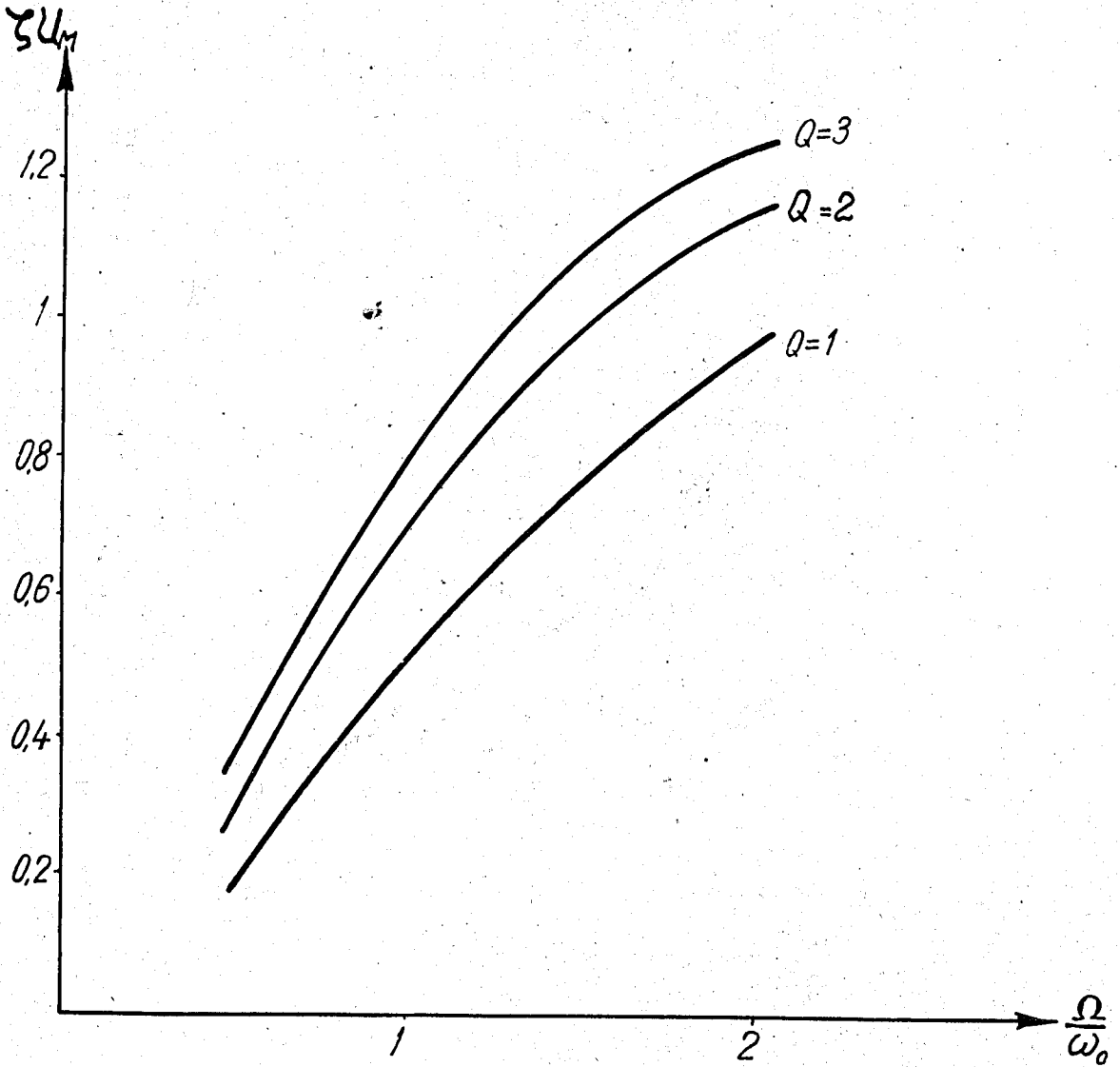


Рис. 13. Изменение относительного усиления для настроенного каскада.

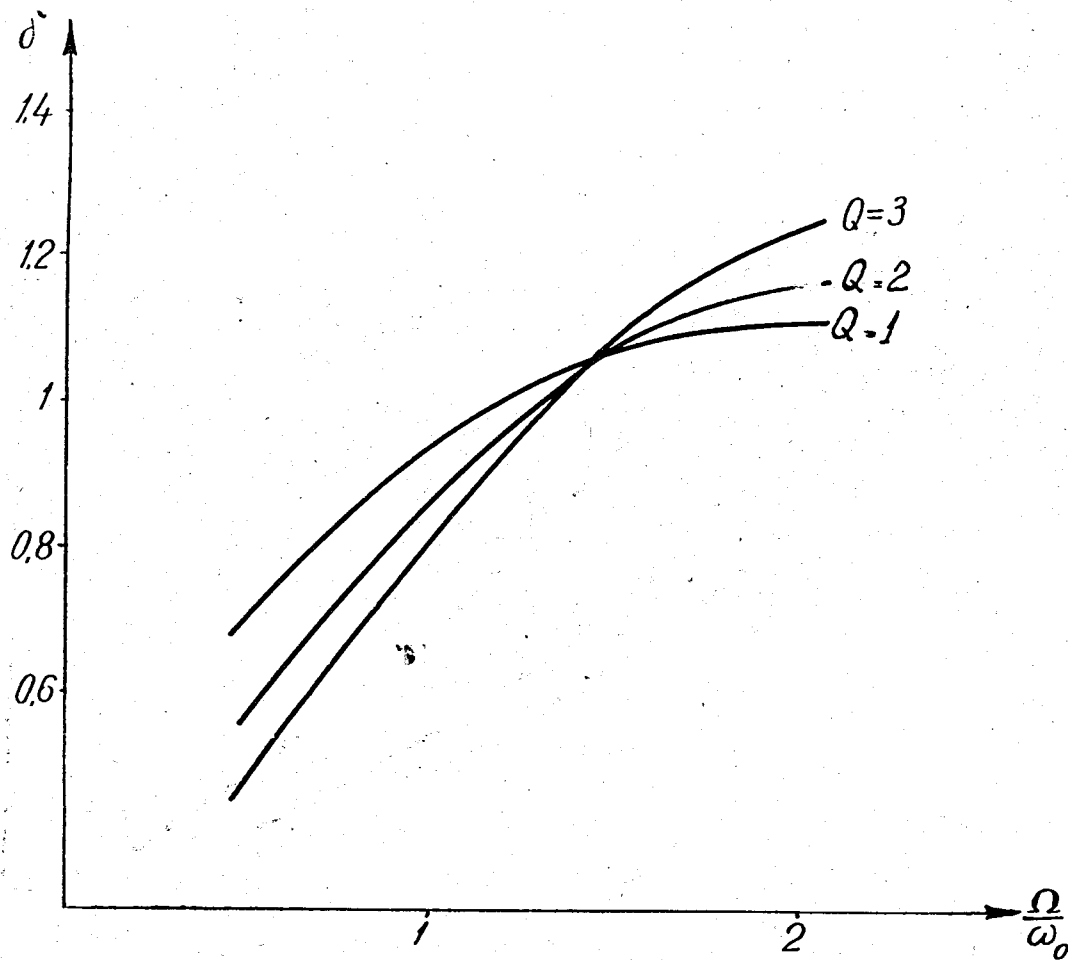


Рис. 14. Изменение относительной ширины импульса на уровне 1/2.

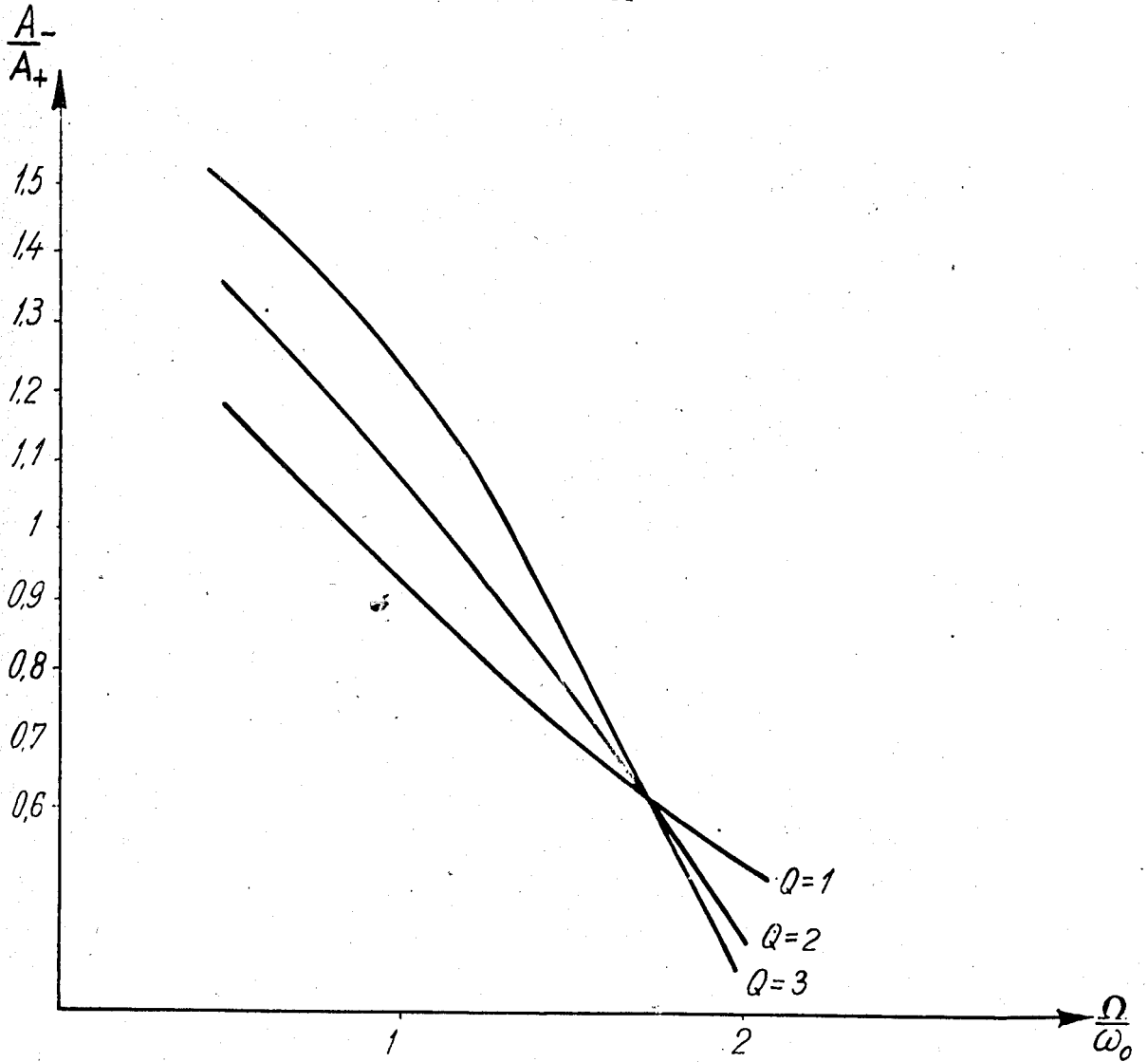


Рис. 15. Изменение отношения амплитуд первой отрицательной полуволны и первой положительной полуволны.

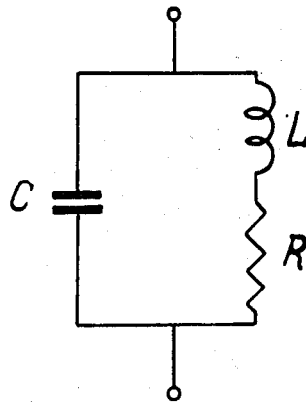


Рис. 16. Анодная нагрузка второго типа.



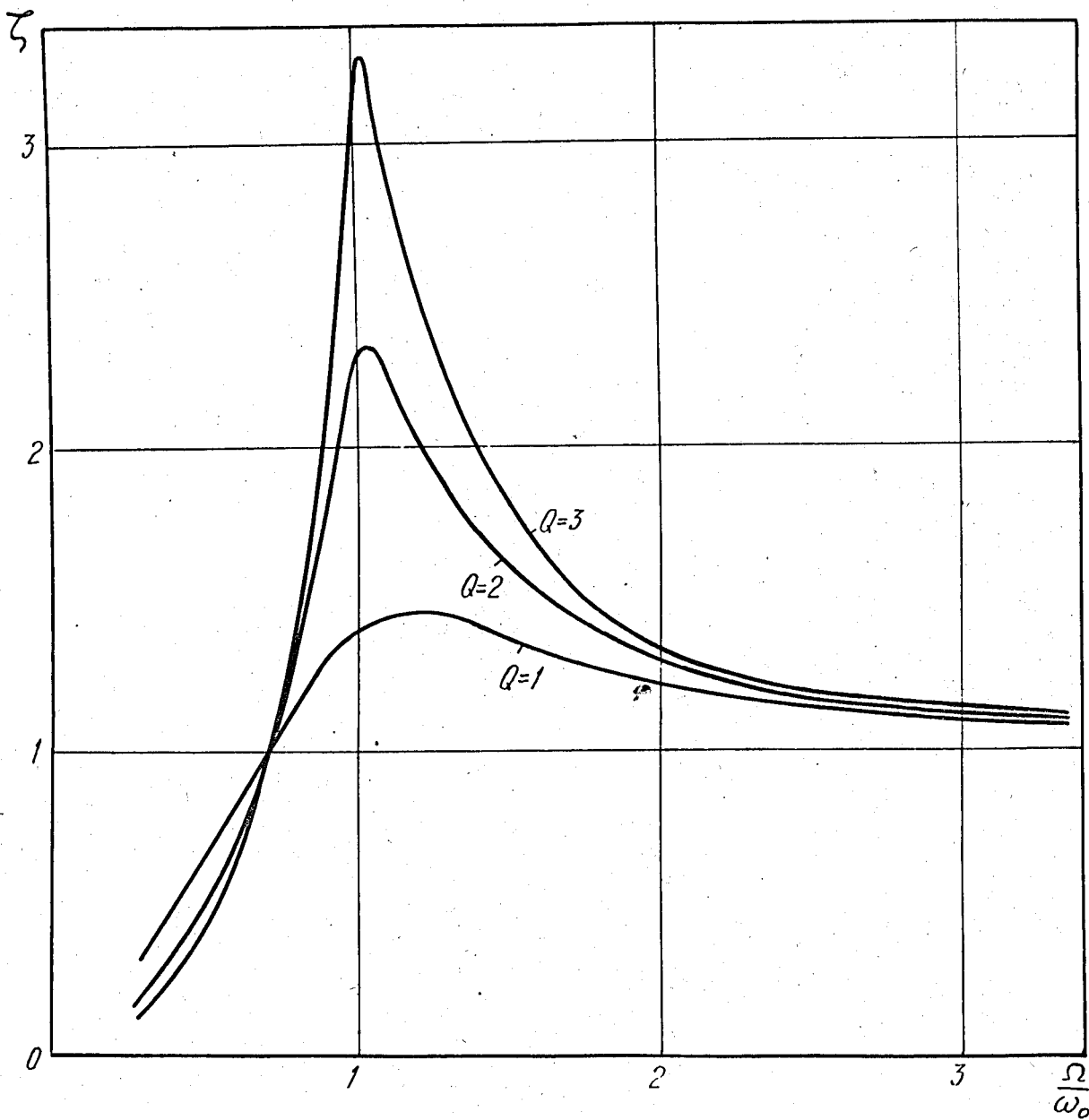
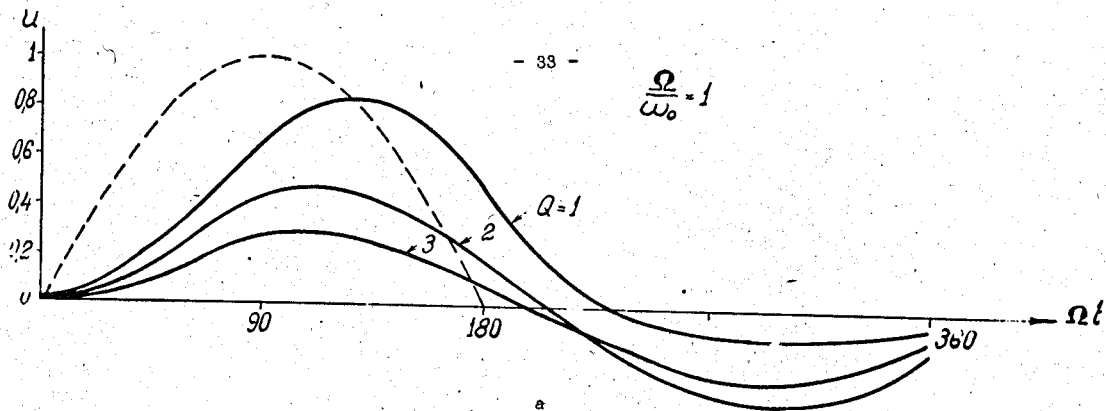


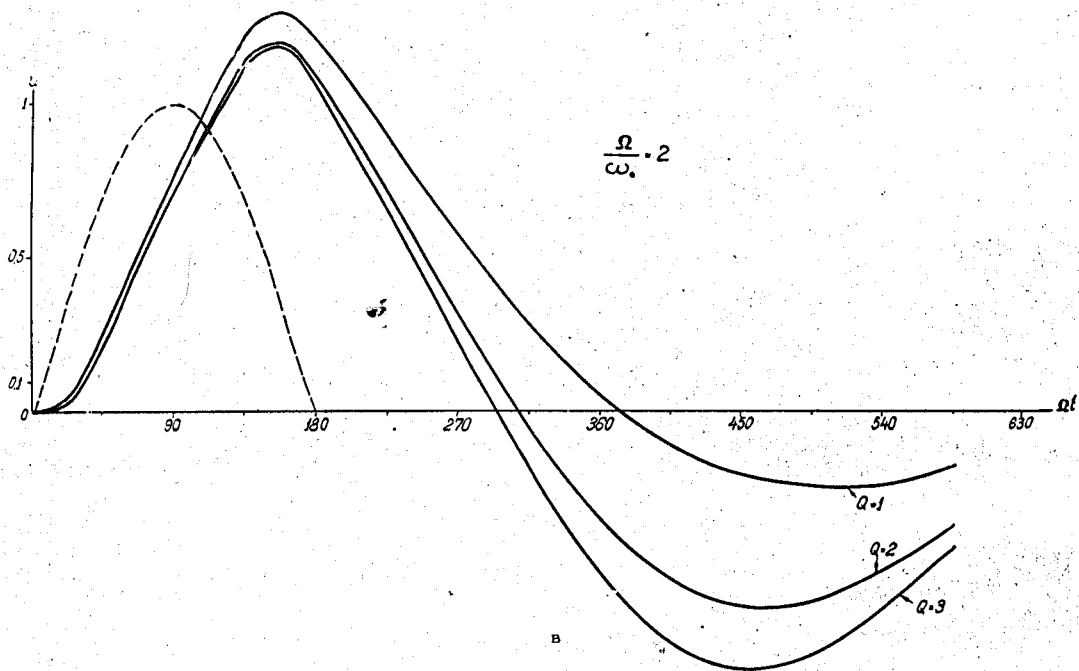
Рис. 17. Изменение фактора  $\zeta(\frac{\Omega}{\omega_0})$  в случае анодной нагрузки второго типа.

$$\frac{\Omega}{\omega_0} = 1$$



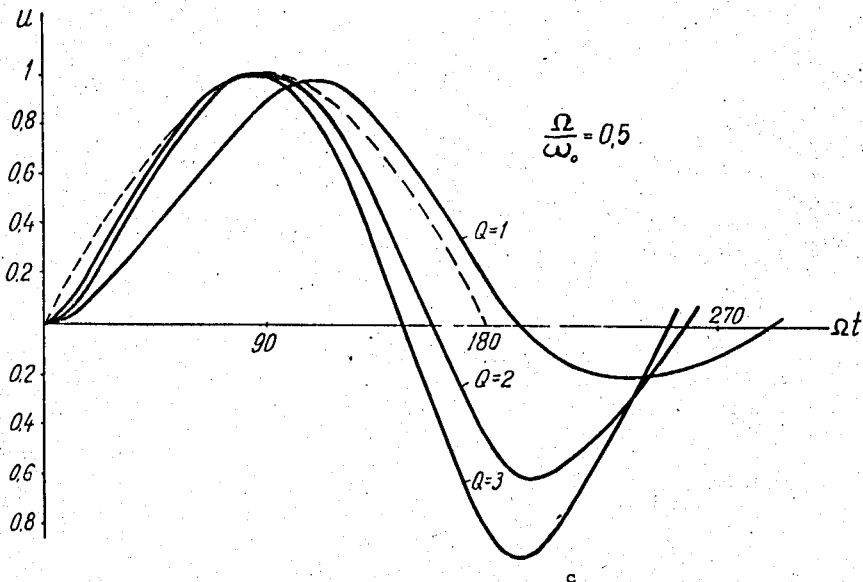
а

$$\frac{\Omega}{\omega_0} = 2$$



в

$$\frac{\Omega}{\omega_0} = 0.5$$



с

Рис. 18. Реакция в случае каскада второго типа.

а/ для  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 1$     в/ для  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 2$     с/ для  $\frac{\Omega}{\omega_0} = 0.5$

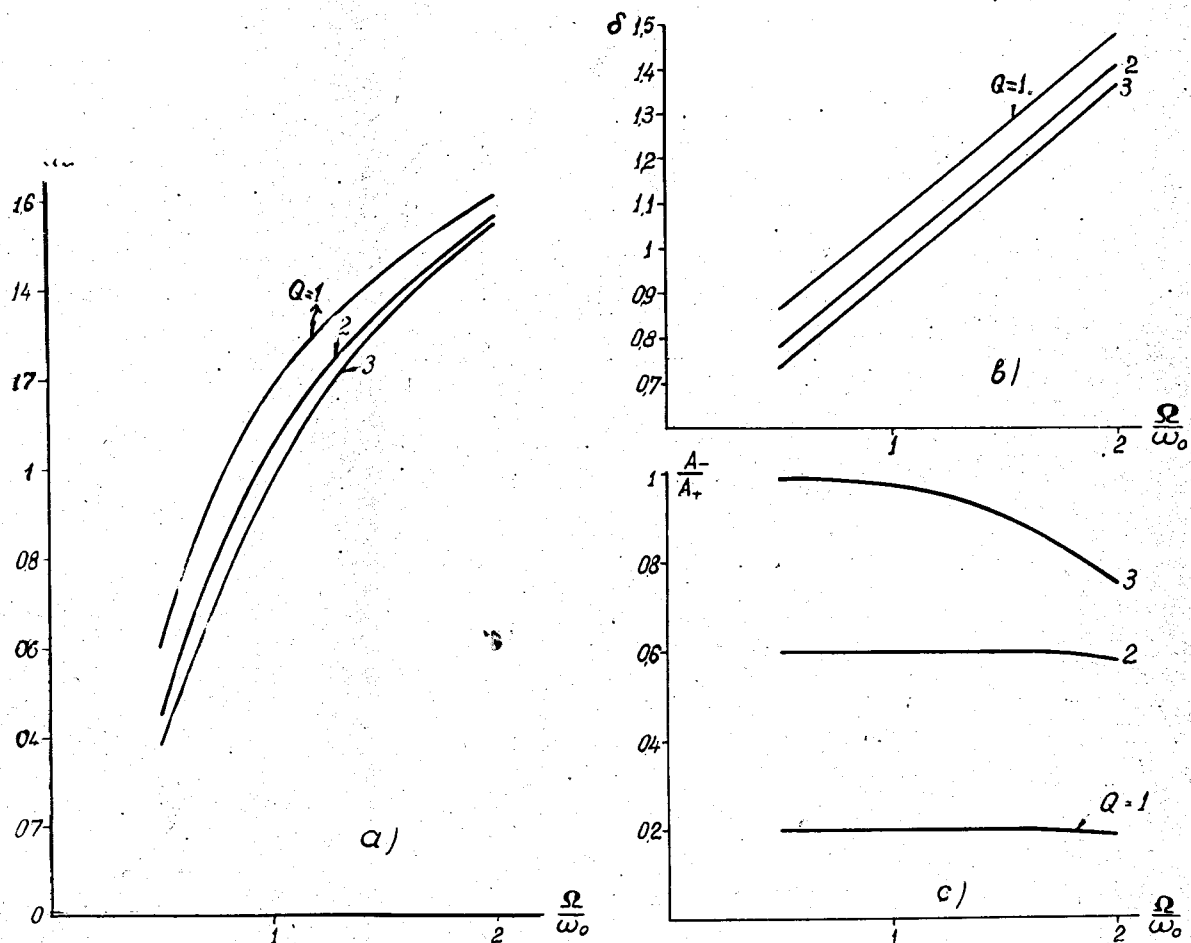


Fig. 19

Рис. 19. Характеристики каскада второго типа: а/ изменения относительного усиление, в/ изменение относительной ширины импульса и с/ изменение отношения амплитуд парных полувольт.

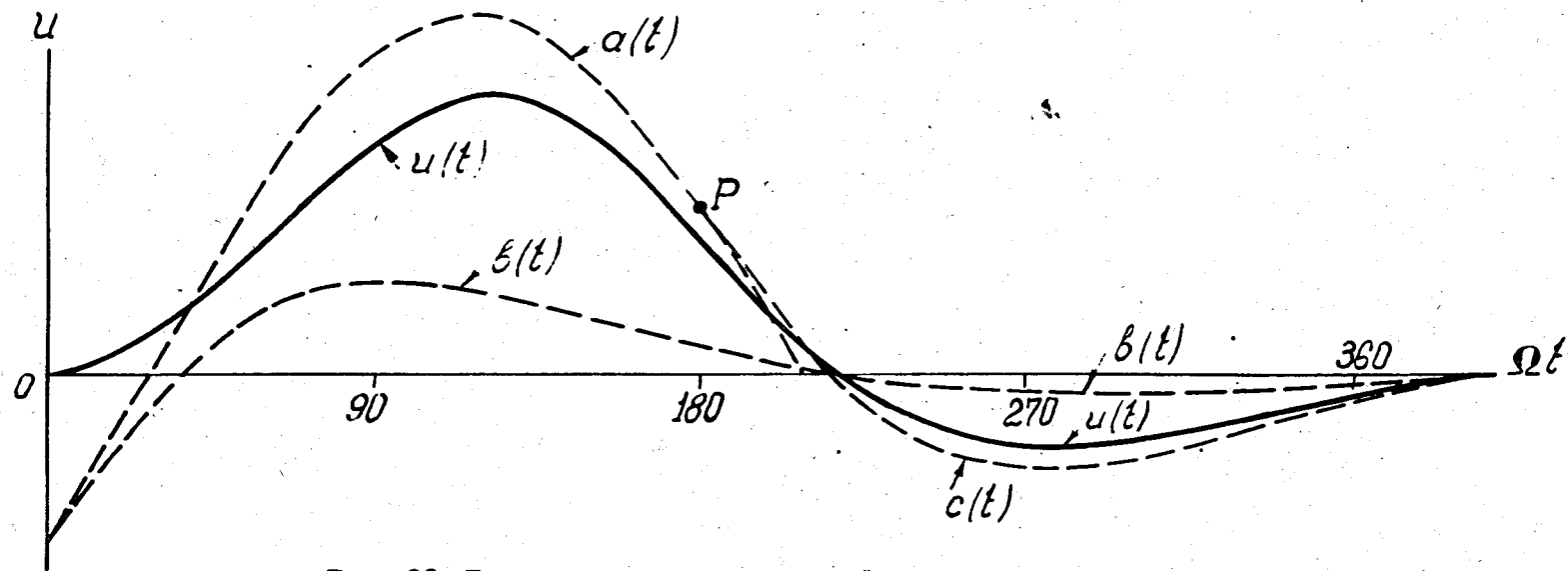


Рис. 20. Реакция каскада с анодной нагрузкой второго типа в случае  $\Omega = \omega$  и  $Q = 1$

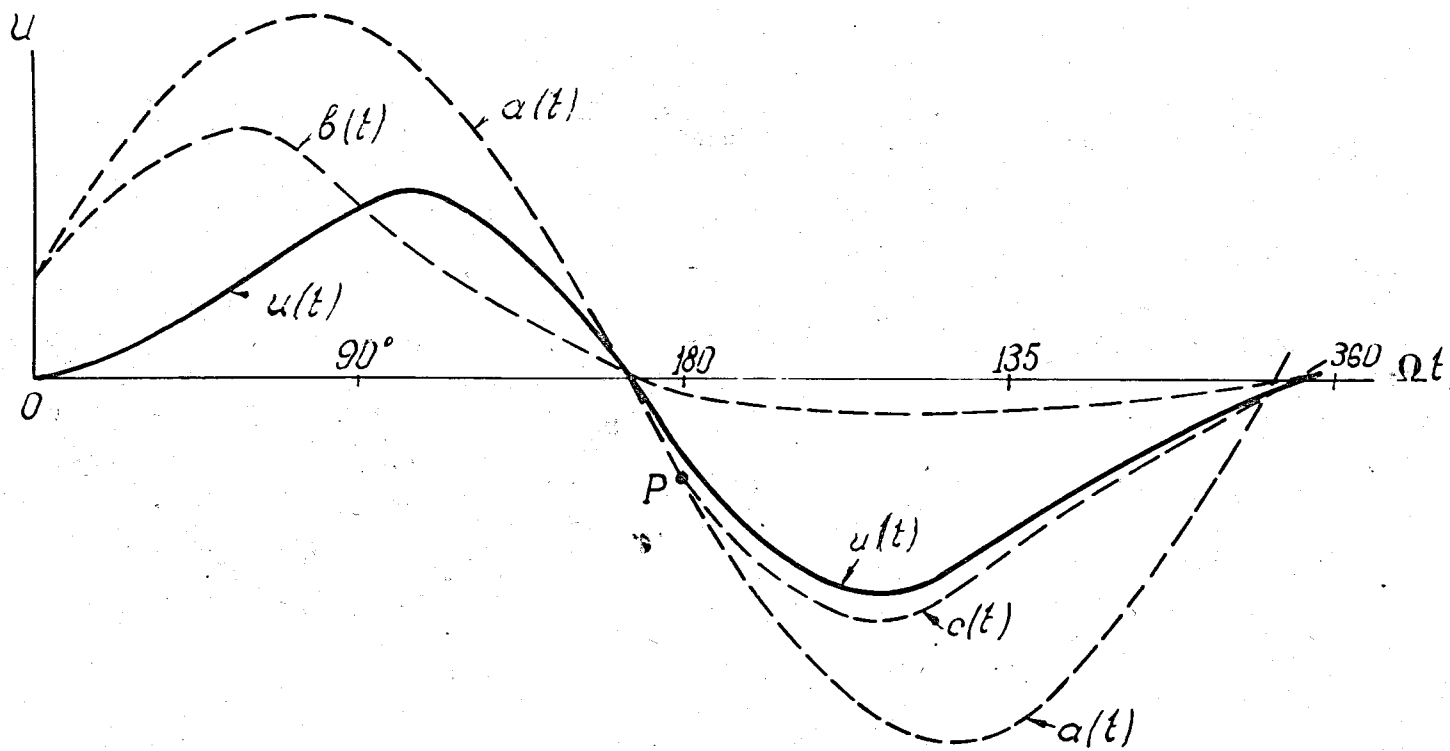
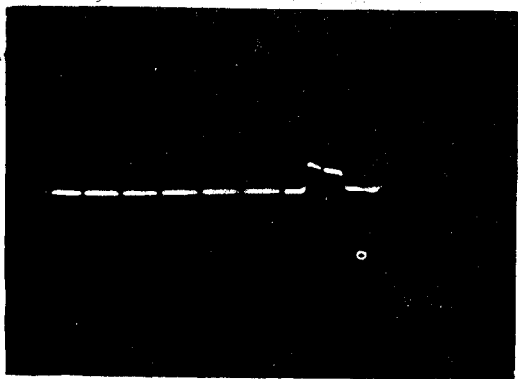
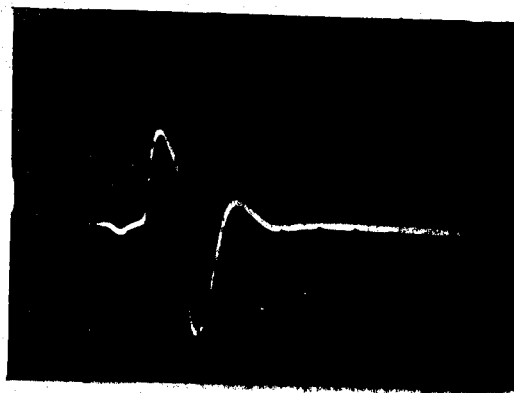


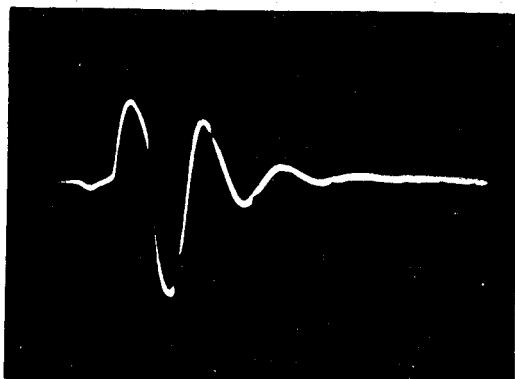
Рис. 21. Реакция каскада с анодной нагрузкой первого типа в случае  $\Omega = \omega$  и  $Q = 1$



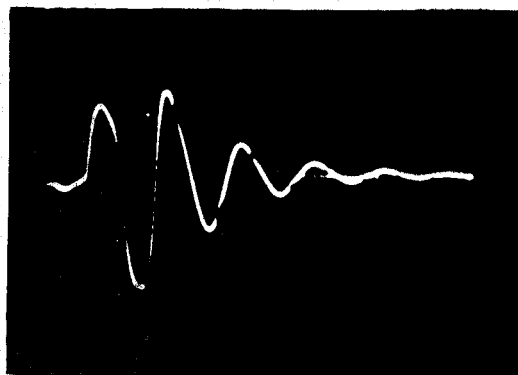
a/



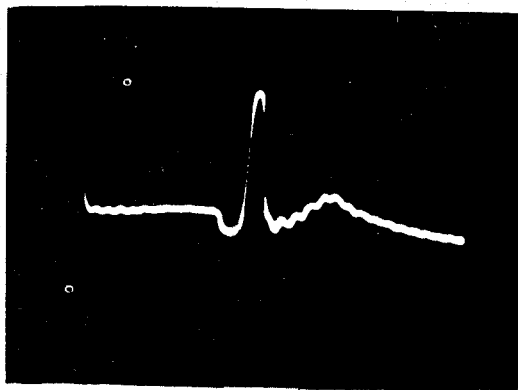
в/



с/



д/



е/

Рис. 22. Форма импульса, полученная на опыте: а/ импульс на входе, в/ импульс на выходе при  $Q = 1$ , с/ то же самое при  $Q = 2$ , д/  $Q = 3$ , е/ импульс после отсечки при помощи диода.

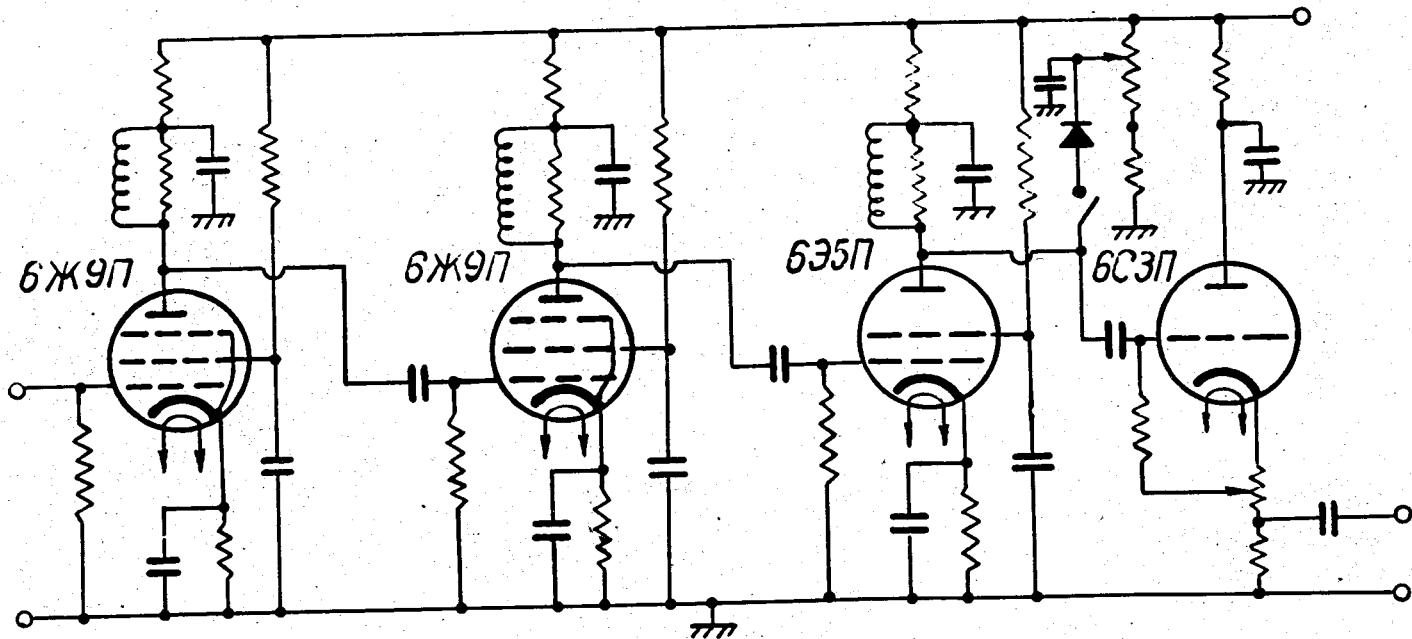


Рис. 23 . Схема усилителя.