

518

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ



С.В. Медведь, В.Г. Зинов

P-518

ЛАМПОВЫЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ
ПЕРЕСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ

/ Обзор /

Дубна 1960 год

518

P-518

С.В. Медведь, В.Г. Зинов

ЛАМПОВЫЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ
ПЕРЕСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ

/ Обзор /

S.V. Medved', V.G. Zinov

Развитие ядерной физики, радиолокации, вычислительной техники за последние годы потребовало применения устройств, способных считать электрические импульсы, разделенные интервалом времени в 1 мксек и меньше. Такие пересчетные схемы были созданы вначале на основе использования электронных ламп, а впоследствии и полупроводниковых приборов.

Разрешающая способность современных пересчетных схем достигает величин порядка нескольких наносекунд. В настоящем обзоре показаны пути, по которым шло усовершенствование пересчетных схем в направлении повышения быстродействия их работы.

1.

В основу большинства быстродействующих пересчетных схем положена двоичная ячейка-устройство, использующее две лампы, которое может находиться в одном из двух возможных устойчивых во времени состояниях равновесия /другие названия: триггер, полупериодный мультивибратор, бинарная ячейка/. Такая ячейка была предложена еще в 1919 году^{1/} /рис. 1/. С тех пор было опубликовано множество работ, посвященных повышению быстродействия и надежности работы двоичной ячейки. Применяя серийно выпускаемые приемно-усилительные радиолампы можно достичь уверенной работы пересчетной ячейки на частотах порядка нескольких мегагерц, не вводя в схему никаких новых элементов по сравнению с рис. 1.

На скорость перехода ячейки из одного стабильного состояния в противоположное /время опрокидывания ячейки/ влияет много факторов, трудно поддающихся точному учету. Однако, легко можно оценить верхнюю границу быстродействия двоичной ячейки. Ток, проходящий через открывающуюся лампу ячейки, используется для заряда емкостей схемы в процессе перехода. Будем считать, что импульс анодного тока J в аноде открывающейся лампы полностью уходит на перезарядку входной емкости закрывающейся лампы от нуля до напряжения запирания. Можно видеть, что минимальное время процесса

перехода t равно^{2/}

$$t = \frac{C_{вх} V}{J},$$

где $C_{вх}$ - входная емкость лампы и паразитная емкость монтажа, V - напряжение записания лампы.

Принимая $C_{вх} = 20$ пф, $V = 10$ в; $I = 20$ ма, что является обычным для современных ламп и схем, получаем время $t = 10^{-8}$ сек. В реальных схемах время перехода получается большим, в первую очередь потому, что средний ток перезаряда емкости $C_{вх}$ меньше максимального.

Из рассмотрения формулы /1/ видно, какие возможны пути повышения быстродействия двоичной ячейки. Во-первых, это всемерное уменьшение паразитных емкостей схемы. Во-вторых, ограничение перепадов напряжений в схеме до минимально необходимых величин. В-третьих, увеличение тока, перезаряжающего емкости во время опрокидывания ячейки. Кроме этого, были сконструированы электронные лампы, специально предназначенные для работы в схеме двоичной ячейки.

2.

Одним из способов уменьшения влияния паразитных емкостей на скорость срабатывания двоичной ячейки является применение катодных повторителей, введенных в цепи положительных обратных связей и разделяющих анодные и сеточные емкости ламп. При этом малая входная емкость катодного повторителя слабо нагружает анодную цепь. Сравнительно большая входная емкость сеточной цепи двоичной ячейки заряжается через малое выходное сопротивление катодного повторителя. Такая схема была впервые предложена в работе ^{/3/} рис.2/. Здесь триггер собран на двух триодах L_3 и L_4 . В их аноды включены корректирующие индуктивности L_1 и L_2 для увеличения крутизны нарастания импульсов. Изменение потенциала анода лампы L_3 / L_4 / передается через катодный повторитель L_1 / L_2 / на сетку противоположной лампы двоичной ячейки. Разрешение, полученное автором для двух входных импульсов, составляло около 40 нсек.

Видоизмененная схема включения катодных повторителей была описана в работе ^{/4/} /рис. 3/. Двоичная ячейка собрана полностью на пентодах с высокой крутизной типа E180F. Катодные повторители в этой схеме перезаряжают

как входные емкости, так и емкости делителей C_1 . Авторы приводят величину разрешения 30 нсек.

Оригинальное включение катодных повторителей - последовательно с лампами, образующими двоичную ячейку, - было предложено в работе ^{15/} /рис.4/. В этой схеме как емкости делителей, так и входные емкости ламп перезаряжаются в процессе опрокидывания ячейки тоже через катодные повторители с малым выходным импедансом Z_k .

Малая величина Z_k повышает быстродействие схемы за счет ускорения перезаряда емкостей. Ускорению переходных процессов также помогают индуктивности, входящие в Z_k .

На основе такой ячейки был построен пересчет на 8, имевший разрешающее время 25 нсек.

3.

Интересный путь, позволяющий использовать паразитные емкости схемы, был предложен в работе ^{16/} /рис. 5/. Лампы L_1 и L_2 образуют ячейку с двумя стабильными состояниями. Пока лампа L_3 проводит, потенциал ее анодов ниже, чем напряжение смещения диодов D_1 и D_2 . Катоды ламп L_1 и L_2 связаны друг с другом через малое прямое сопротивление диодов, и ячейка находится в одном из двух устойчивых состояний. В момент прихода отрицательного пускового импульса на сетку L_3 потенциал ее анода начинает возрастать и диоды запираются. Связь между катодами становится емкостной, и ячейка превращается в колебательную систему. Контур в анодной цепи L_1 и L_2 , состоящий из индуктивности и паразитных емкостей, настроен на частоту 50 Мгц. Колебания продолжаются до тех пор, пока не откроются диоды. Отсюда вытекает жесткое требование к длительности пусковых импульсов: они должны быть не длинее полупериода колебания контура, чтобы не вызвать лишнего срабатывания ячейки. С другой стороны, они не могут быть слишком короткими, так как не успеют вывести ячейку из состояния равновесия. В описываемой схеме длительность пусковых импульсов ограничивается 6 нсек с одной стороны и 10 нсек с другой. Съем выходного сигнала с ячейки осуществляется с помощью катушки, индуктивно связанной с контуром. Такая связь не наруша-

ет симметрии схемы, что важно при работе на высоких скоростях. Схема работала устойчиво от входных импульсов с частотой до 100 МГц.

4.

Другим способом увеличения разрешения двоичной ячейки является ограничение перепадов напряжения в схеме до минимально необходимых величин ^{/7,8/}. В схеме, приведенной в работе ^{/9/} /рис. 6/, такими ограничителями служат германиевые диоды D_1 и D_2 , включенные в анодные цепи двоичной ячейки, и D_3 и D_4 — в сеточных цепях катодных повторителей. В процессе опрокидывания ячейки напряжение на аноде ранее открытой лампы /пусть это будет L_1 / по экспоненте стремится к напряжению источника питания. Этот рост продолжается до тех пор, пока анодное напряжение L_1 не превысит фиксированного значения U_1 , после чего его нарастание прекращается. Следовательно, для перехода ячейки в другое состояние используется лишь небольшой короткий, но самый крутой участок экспоненты.

Включение диодов-ограничителей повышает быстродействие пересчетных ячеек и довольно широко применяется в схемах. В описываемой схеме было получено разрешение 60 нсек. В схемах, приведенных ранее на рис. 3 и 4, тоже были использованы ограничивающие диоды. Например, в схеме на рис. 4 диоды D_1 и D_2 служат для ограничения перепадов напряжения на Z_k по максимуму, а D_3 и D_4 — по минимуму.

Диоды, применяемые в цепях ограничения, должны иметь прямое сопротивление, малое по сравнению с шунтируемой ими нагрузкой. Источник смещения для этих диодов тоже должен быть с малым внутренним сопротивлением как по постоянному току, так и в области высоких частот.

5.

Обратимся вновь к формуле /1/, определяющей минимальное время опрокидывания двоичной ячейки-триггера. Как было видно из приведенных выше схем, практически все способы уменьшения емкостей, перезаряжающихся в процессе опрокидывания, исчерпаны. Перепады напряжений V , необходимые для надежной работы триггера, по-видимому, не могут быть сделаны менее

5-10 вольт. Однако остается еще один путь повышения быстродействия двоичной ячейки - это увеличение тока I , перезаряжающего емкости схемы во время опрокидывания.

Лампы обычных двоичных ячеек выполняют две функции: обеспечивают ток, необходимый, во-первых, для быстрого переключения, во-вторых, для поддержания установившегося состояния. Объединение этих функций в одной и той же лампе невыгодно. Быстрое переключение требует от лампы максимально возможного кратковременного тока, в то время как для фиксирования состояния можно ограничиться значительно меньшим анодным током.

Было предложено /2/ расчлнить схему двоичной ячейки на два каскада, выполняющие раздельно обе функции: ведомый /запоминающий/ и ведущий /переключающий/ каскады.

Переключающий каскад состоит из двух ламп, работающих только в моменты прихода запускающих импульсов. Одна из ламп переводит запоминающий каскад в первое стабильное состояние, другая - в противоположное.

В качестве ведомого каскада может быть использована любая схема триггера. Для большего быстродействия выгодно применять те схемы, в которых перепады напряжений в анодных цепях ламп полностью передаются в сеточные. В качестве среднего звена в междупроводных делителях такого триггера можно применять батареи или стабилитроны. Для опрокидывания триггера к анодам /или сеткам/ ламп нужно подать равные по амплитуде разнополярные импульсы. Сочетание ведомого и переключающего каскада является полной двоичной ячейкой. Переключающий каскад должен работать от запускающих импульсов одной полярности и выдавать одновременно два чередующихся разнополярных импульса /рис. 7/. Для достижения быстродействия импульсы тока, поступающие на ведомый каскад, должны быть возможно большими. В установившемся состоянии через переключающиеся лампы не должен проходить ток, так как это приводит лишь к бесцельному рассеянию мощности на электродах. Вышеперечисленные требования определяют выбор режима переключающих ламп.

Лампы должны попеременно находиться в двух положениях с разными уровнями смещения. Минимальное напряжение смещения выбирается вблизи точки отсечки $V_{отс}$. Максимальное напряжение смещения $V_{макс}$ выбирается таким, чтобы

пусковой импульс с амплитудой V , поступающий на сетки обеих переключающих ламп, вызывал появление анодного тока только в одной лампе, а именно в той, которая имеет минимальное смещение. Поэтому величина напряжения максимального смещения должна быть не менее, чем $|V_{отс}| + V$.

После каждого опрокидывания ведомой ячейки одна переключающая лампа из режима максимального смещения переходит в режим минимального, а другая - наоборот. Это обеспечивается связью по постоянному току между каскадами.

Были построены и испытаны такие разделенные схемы с использованием пентодов в качестве переключающих ламп и ячейки на лампе 6Н15П со стабилизаторами или батареями в цепях делителей. Но наиболее быстрое переключение было получено при замене пентодов на лампы со вторичной эмиссией типа *EFP-80* /рис. 8/. При длительности запускающих импульсов от 2 до 5 нсек были получены разрешающие времена порядка 10 нсек. Схема не испытывалась от периодических импульсов, однако авторы не сомневаются в ее работоспособности на высоких частотах, если при этом не будут превышены допустимые мощности рассеяния для переключающих ламп.

6.

Ячейки, выполненные по симметричной схеме, хранят сосчитанное число в виде того или иного состояния ячейки. Стабильность обоих устойчивых состояний обеспечивается наличием в схеме гальванической обратной связи и соответствующим выбором параметров. Этой же связью объясняется и регенеративный процесс перехода ячейки из одного состояния в другое под действием внешнего запускающего импульса.

Однако, для быстрого и четкого процесса опрокидывания в схеме должен существовать некоторый элемент, который в момент, когда схема выведена из устойчивого состояния, указывает, в каком направлении должен завершиться переход /опрокидывание/. Этот элемент должен обладать инерцией, или "памятью", т.е. направление его действия должно зависеть от состояния, из которого выведена ячейка. Такой элемент схемы иногда называют "переключ-

чатальной памятью" /10/. Время Δ , в течение которого "память" должна хранить информацию о предыдущем состоянии ячейки, выбирается не меньшим, чем время опрокидывания $\tau_{\text{переход}}$. Если же сделать $\Delta \gg \tau_{\text{переход}}$, то разрешение триггера заметно уменьшится за счет удлинения времени переходных процессов в схеме.

Обычно элементами, осуществляющими "переключательную память", являются конденсаторы C , шунтирующие сопротивления R анодосеточной связи триггера /рис. 1/. В установившемся режиме напряжение на обоих конденсаторах различно и зависит от того, какая из ламп проводит. В процессе опрокидывания заряд на конденсаторах не успевает значительно измениться. При этом конденсатор, ранее соединенный с анодом запертой лампы и заряженный до большего напряжения, чем противоположный, разряжается, создавая на сетке запираемой лампы отрицательное смещение. Время перезаряда конденсатора до нового, меньшего напряжения /время "памяти" Δ /, должно быть больше $\tau_{\text{переход}}$.

В быстродействующих ячейках величина RC берется по возможности малой, но не меньше, чем это требуется для построения частотно-независимого делителя в цепи междупламповой связи /т.е. $RC = R_1 C_1$ /. Так как $C_{вх}$ для данной схемы есть величина постоянная, то приходится уменьшать R_1 . Однако это приводит к нежелательным результатам, так как с уменьшением R_1 падает коэффициент передачи делителя, что снижает быстродействие ячейки. Одновременное уменьшение R и R_1 тоже невыгодно, так как делитель включается параллельно анодной нагрузке.

Как было описано выше, выход был найден во включении в цепь обратной связи катодного повторителя. Его низкое выходное сопротивление позволяет без ущерба для быстродействия уменьшать сопротивления делителя, которые включаются как нагрузка повторителя.

Дальнейшие шаги в сторону повышения быстродействия работы ячейки были сделаны при замене конденсаторов другими элементами "памяти", имеющими лучшую переходную характеристику.

На рис. 9 показаны три способа введения в схему двоичной ячейки элементов "памяти" /11/. Переходная характеристика цепи А имеет длинный экспоненциальный спад. Характеристика цепи Б имеет более крутой спад, но

на нем возможен заход в случае шунтирования индуктивности L сопротивлением больше критического. Переходная характеристика цепи В с закороченным на конце отрезком высокочастотного кабеля имеет фронт и спад одинаковой крутизны.

Очевидно, что для быстродействующих ячеек наиболее удобен последний вид "памяти". Однако современные высокочастотные линии задержки имеют низкое характеристическое сопротивление: около сотни ом. Поэтому сигнал, выделяющийся на такой анодной нагрузке, будет невелик. Лампы, применяемые в подобных ячейках, должны обладать большим анодным током и малым напряжением отсечки. Ячейка с анодной нагрузкой по схеме В была построена ^{/11/} (рис. 10). Максимальное разрешение ее 11 нсек.

7.

Интересна схема ячейки с использованием линии задержки ^{/12/}, блок-схема которой приведена на рис. 11. Ячейка состоит из триггера с катодной связью и схемы управления. Для перехода ячейки из одного состояния в другое на сетку левой лампы должны подаваться импульсы чередующейся полярности. Такие импульсы формируются схемой управления, и полярность их зависит от состояния двоичной ячейки, которая связана со схемой управления по постоянному току через линии задержки Л.З. Включение линии задержки не позволяет схеме управления послать следующий пусковой импульс в ячейку до тех пор, пока ячейка не закончит процесса опрокидывания под действием предыдущего. Это значительно повышает надежность работы пересчетной ячейки. Принципиальная схема ячейки приведена на рис. 12.

Схема управления выполнена на двойном триоде L_3 и L_4 , в аноды которого включены половины первичной обмотки широкополосного трансформатора, намотанные в противоположных направлениях. В нормальном состоянии L_5 заперта по управляющей сетке, и ток через триоды не течет. Положительный пусковой импульс открывает L_5 и вызывает появление анодного тока в одном из триодов L_3 или L_4 , в зависимости от того, в каком положении находится триггерная ячейка. Вторичная обмотка трансформатора, на которой появляются

импульсы чередующейся полярности, включена в цепь управляющей сетки L_2 . Перепады напряжений в анодах триггера малы из-за низкого характеристического сопротивления линии задержки. Поэтому в делителе цепи обратной связи применен стабилитрон, позволяющий передать перепад анодного напряжения в цепь сетки противоположной лампы без потерь.

Схема устойчиво работала на частотах до 20 Мгц. Линия имела время задержки 25 нсек. Авторы указывают, что быстродействие пересчета ограничивалось недостаточной широкополосностью трансформатора.

«8.

Появление ламп со вторичной эмиссией расширило возможность создания быстродействующих пересчетных ячеек. Помимо высокой крутизны и добротности, эти лампы обладают специфическими особенностями, делающими их пригодными для использования в качестве основного элемента ячейки.

Первая особенность состоит в том, что ток динода лампы имеет обратное направление по сравнению с током анода, т.е. во внешней цепи ток течет от динода. Вследствие этого напряжения на диноде и управляющей сетке оказываются в фазе, что позволяет получить положительную обратную связь путем подачи напряжения с динода на управляющую сетку.

Вторая особенность состоит в том, что ток анода лампы со вторичной эмиссией в несколько раз может превышать ток катода. Поэтому возможен второй тип положительной обратной связи - с анода в катод этой же лампы.

На рис. 13 показаны оба вида обратной связи. Сделав обратную связь гальванической и подобрав сопротивление делителя, можно добиться двух устойчивых состояний лампы: открытого /напряжение на управляющей сетке около нуля/ и закрытого. Следовательно, на одной лампе можно построить двоичную пересчетную ячейку.

Вышеперечисленные особенности ламп со вторичной эмиссией позволили построить пересчетные ячейки как на двух лампах, так и на одной.

Рассмотрим схему ячейки^{/13/} на двух лампах типа *EFP-60* /рис.14/. Лампы связаны друг с другом по постоянному току общим большим катодным

сопротивлением. Каждая лампа ячейки имеет гальваническую обратную связь с динода на управляющую сетку через стабилитрон, шунтированный емкостью. Обе эти связи позволяют только одной из ламп находиться в открытом состоянии. Конденсаторы, связывающие анод каждой лампы с сеткой противоположной, необходимы для процесса опрокидывания. Стабилитроны выполняют еще одну функцию — они стабилизируют режим динодов.

Запуск ячейки осуществляется с помощью схемы из 4 полупроводниковых диодов и сопротивления R . Для опрокидывания требуются два одинаковых разнополярных импульса, которые получаются со специальной инверторной лампы. Напряжение на R отпирает два диода и запирает два других, тем самым осуществляя подачу положительного пускового импульса только на сетку закрытой лампы, а отрицательного — на сетку открытой. Разрешение, полученное при работе с этой ячейкой, составляет 10 нсек.

9.

Был сделан еще один важный шаг по пути увеличения быстродействия двоичных ячеек — сконструирована специальная лампа с поперечным отклонением электронного луча^{/14/}. Эта лампа может быть использована как в ведомом каскаде ранее описанной схемы, так и самостоятельно.

Устройство новой лампы следующее: пучок электронов, вылетающих с катода, формируется в узкий плоский луч вспомогательными электродами. Этот луч с помощью двух отклоняющих пластин Π_1 и Π_2 может быть направлен на один из двух анодов /рис. 15а/. В анодные цепи включаются равные сопротивления R . Аноды соединяются непосредственно с противоположными отклоняющими пластинами.

Зависимость тока анодов от отклоняющего напряжения показана на рис. 16. Так как изменения напряжения на анодах полностью передаются на пластины, то можно написать уравнение для отклоняющего напряжения:

$$E_{\text{откл}} = (E_{\Pi_1} - E_{\Pi_2}) = (E_{A_2} - E_{A_1}) = -(\mathcal{I}_{A_2} - \mathcal{I}_{A_1}) \cdot R \quad 121$$

График зависимости $I_{A2} - I_{A1}$ от отклоняющего напряжения был построен по анодным характеристикам. Нагрузочная кривая при одинаковых анодных нагрузках R будет пересекать характеристику лампы в трех точках при условии

$$-S > -\frac{1}{R},$$

/2/

где

$$S = \frac{d(I_{A2} - I_{A1})}{d(E_{п1} - E_{п2})}$$

Можно показать, что 1 и 2 будут точками устойчивого равновесия, а среднее положение /точка 0/ является неустойчивым.

Используя такую лампу, можно создать двоичную пересчетную ячейку. Схема ее дана на рис. 15а. Запускающие импульсы подаются на отклоняющие пластины через диоды. Спротивления R_{a1} и R_{a2} являются нагрузками. Съем сигнала производится через RC -цепь и диод с одного из анодов. Минимальное напряжение, необходимое для переброса луча с одного анода на другой составляет всего 0,7 вольта. Был сконструирован еще один вариант подобной лампы с использованием вторичной эмиссии /рис. 15б/. При включении этой лампы в схему с отклоняющими пластинами, в отличие от предыдущего варианта, соединялись одноименные диоды, потому что при попадании луча на диод его потенциал становился выше, чем потенциал другого диода. Такая лампа имела большую крутизну и для устойчивой работы ее можно было включать меньшие диодные нагрузки.

Второй вариант лампы с поперечным отклонением луча тоже может быть использован для создания пересчетной ячейки. Однако более интересным кажется применение их в качестве ведомого каскада в ячейках с разделенными функциями /рис. 17/. Малые междуэлектродные емкости и небольшие перепады напряжений между установившимися состояниями позволили получить такое высокое разрешение как 2 нсек^{/2/}.

10.

Дальнейшее повышение быстродействия двоичных ячеек ограничивается

временем пролета электронов в лампе. В современных конструкциях ламп оно составляет величину порядка 1 нсек. Время пролета играет роль своеобразной "памяти", которая не мешает работе двоичной ячейки при разрешениях порядка единиц наносекунд, но для преодоления трудностей, вносимых ею на более коротких временах, придется разрабатывать принципиально новые конструкции электровакуумных приборов.

Возможно, что полупроводниковая электроника, частотные пределы которой еще не достигнуты, сможет значительно увеличить быстродействие пересчетных ячеек. В настоящее время уже опубликованы работы^{/15,16/} с описаниями пересчетных ячеек на 20 и 50 Мгц, построенных на полупроводниковых приборах.

11.

В вышеприведенных описаниях быстродействующих двоичных схем не освещались вопросы запуска и съема сигнала с ячейки, а также индикации ее состояния.

При работе с разрешающими временами вплоть до 25 нсек обычно применяется подача пусковых импульсов через диоды в анодную и реже в сеточную цепь. Для повышения быстродействия важно, чтобы импульс с входного устройства, вызвав процесс опрокидывания, не препятствовал его дальнейшему течению. Поэтому необходимо уменьшить длительность пусковых импульсов.

Диоды, через которые подаются пусковые импульсы, направляют их только на ту лампу ячейки, которая под действием импульса данной полярности может изменить свое состояние /например, в случае отрицательных пусковых импульсов они подаются только на сетку открытой лампы/. Диоды, кроме того, помогают избежать обратного воздействия ячейки на пусковое устройство.

Для запуска иногда применяют два одновременных разнополярных импульса, подаваемых на противоположные лампы ячейки через специальную диодную схему^{/13/} /рис. 14/. Для запуска более быстрых ячеек в схему вводится отдельная пусковая лампа, включаемая последовательно с лампами триггера^{/6,11/} /рис. 5 и 10/.

Индикацию состояния ячейки можно осуществить обычными способами: включением в анодную цепь стрелочного прибора или неоновой лампы параллельно анодной нагрузке. Однако в быстродействующих схемах перепады напряжений в анодных цепях малы и не всегда могут обеспечить работу неоновых индикаторов. Применение же дополнительных усилительных ламп, как это сделано в работе ^{/17/}, может быть оправдано лишь в исключительных случаях. Более универсальным является включение стрелочного прибора ^{/11,13/}.

При измерении числа импульсов, случайно распределенных во времени, как это часто имеет место при экспериментах в ядерной физике, отсутствие индикации в первых быстродействующих ячейках пересчетной схемы, не является недостатком. Потеря нескольких $\sim 10\%$ импульсов при высоких скоростях счета, на которых применяются подобные пересчеты, очень мало отразится на окончательном результате.

Малые величины перепадов напряжения в быстродействующих ячейках затрудняют непосредственный запуск следующего каскада. Было предложено несколько способов соединения ячеек друг с другом. Во всех случаях цепь съема сигнала и запуска следующей ячейки не должна сильно нагружать предыдущую ячейку и нарушать симметрию схемы. Обычная дифференцирующая *RC*-цепочка плохо удовлетворяет этим требованиям и в быстродействующих схемах не применяется.

В работе ^{/18/} были предложены импульсные повышающие автотрансформаторы, включаемые в катод лампы двоичной ячейки. Сигнал с автотрансформатора подается на сетку усилительной лампы типа 6АК5, с анодной нагрузки которой через диоды снимается запускающий импульс на следующий каскад.

Удовлетворительные результаты дает включение высокочастотного трансформатора на ферритовом сердечнике в анодные цепи ламп. Первичная обмотка его разбивается на две половины, которые включаются последовательно с анодными нагрузками ламп. Выбором индуктивности обмотки можно получить хорошо продифференцированный импульс. Такое включение трансформатора использует токи обеих ламп ячейки и не нарушает ее симметрии. Одновременно индуктивности первичной обмотки служат корректирующими элементами в анодных цепях ^{/11/}.

Для съема сигнала часто используются катодные повторители^{/4/} - вносимая ими малая емкость не нарушает работы схемы. В работе^{/5/} применена оригинальная дифференциальная схема /рис. 4/, напряжение с которой подается в сеточную линию усилителя с распределенными параметрами, служащего для связи между ячейками. Включение подобной схемы не нарушает симметрии ячейки, так как напряжение на ее входы снимается с обеих половин ячейки.

Междукаскадные усилители позволяют запускать последующие каскады импульсом с достаточно большой амплитудой, что повышает надежность срабатывания пересчетной схемы.

Для надежной и быстрой работы обе половины пересчетной двоичной ячейки должны быть симметричными. Желательно, чтобы детали имели допуски не более 5%, а лампы, входящие в одну ячейку, отличались друг от друга по крутизне и анодному току не более, чем на 10%. Быстродействующие ячейки обычно снабжаются симметрирующими потенциометрами, чаще в цепях управляющих сеток^{/3/}, реже - в экранных сетках^{/19/}, позволяющими компенсировать разницу в параметрах ламп. Подстройка производится по максимальной частоте срабатывания ячейки.

12.

В ряде случаев желательно иметь число, зафиксированное пересчетным прибором, в более привычной для экспериментатора десятичной системе счисления. В литературе описано несколько способов построения пересчетных схем с коэффициентом пересчета, равным $10^{/20,21/}$. Практически из них для конструирования быстродействующих схем были использованы два:

1/ введение обратных связей в пересчетную схему, построенную на двоичных ячейках;

2/ соединение ячеек в кольцевые схемы.

Быстродействующие пересчетные декады, построенные по первому принципу, чаще всего выполняются следующим образом^{/22,23,24,25/}. Схема /рис.18/ состоит из 4 двоичных ячеек и переключающего устройства, условно обозначенного в виде ключа на два положения. Положение ключа зависит от состояния

ячейки "2³" - при пребывании этой ячейки в положении "0" ключ замыкает контакт А. При этом схема считает обычным образом 7 входных импульсов, 8-й импульс переводит ячейку "2³" в положение "1", остальные ячейки в положение "0" и перебрасывает ключ на контакт Б. 9-й импульс меняет состояние только первой ячейки "2⁰", 10-й импульс попадает с выхода "2⁰" на ячейку "2³", возвращая ее в состояние "0", а ключ перебрасывается на контакт А. Цикл заканчивается.

В разобранный принцип построения декады имеется источник нестабильности работы. Во время перехода ячейки "2³" под действием 10-го импульса в первоначальное состояние может наступить момент, когда ключ, связанный с ячейкой "2³", уже перебросится на контакт А, а импульс с входной ячейки "2⁰", не успев закончиться, пройдет на "2¹". Чтобы этого избежать, в цепь переброса ключа /обозначена на схеме пунктиром/ полезно ввести временную задержку /ВЗ/ /26/. В результате момент переброса ключа запаздывает по отношению ко времени опрокидывания ячейки "2³". Время задержки срабатывания ключа выбирается несколько большим длительности импульса с ячейки "2⁰".

В качестве переключающего элемента в одной из работ /24/ использовалась схема совпадений на полупроводниковых диодах. Ячейки были построены на пентодах с высокой крутизной и связаны друг с другом через отдельные усилительные каскады. Эта схема пересчитывала импульсы с частотой до 10 МГц.

Дальнейшее повышение скорости работы декад пойдет, вероятно, по пути отказа от обратных связей и замены их логическими переключающими устройствами /27/ типа схем совпадений и антисовпадений. Это объясняется тем, что для появления сигнала обратной связи необходимо прохождение импульса через цепочку триггеров, что связано с временной задержкой. Сигналы же на переключающие схемы подаются после прохождения импульса только через один триггер. Кроме того, переключающие схемы могут обладать большим быстродействием, чем триггер.

13.

Для построения схем с коэффициентом пересчета, не равным 2, как указывалось, можно идти и по другому пути - использованию различных кольцевых схем. /28/

В качестве примера можно привести схему пересчета на 3, построенную на лампах типа 6ВН6 с двумя управляющими сетками ^{/29/} /рис. 19/. Работает эта схема следующим образом.

Предположим, что L_2 находится в открытом состоянии, тогда L_1 заперта по третьей сетке, а L_3 - по первой. Если положительный пусковой импульс будет подан на первые сетки всех ламп, то он откроет только L_3 . Перепад напряжения на анодном сопротивлении L_3 закроет L_2 по третьей сетке, а L_1 - по первой. Подобный же процесс произойдет при подаче следующего пускового импульса.

Если подавать импульсы не на первые, а на третьи сетки ламп 6ВН6, то кольцевая схема будет считать импульсы в обратном направлении:

$L_2 \rightarrow L_1 \rightarrow L_3 \rightarrow L_2$. Схема способна пересчитывать импульсы с частотой 10 Мгц.

Коэффициент пересчета подобных схем равен числу управляющих сеток в лампе плюс единица. Поэтому построение схем с пересчетом более чем на 3 затруднительно.

14.

Более надежные и не требующие специальных ламп кольцевые схемы могут быть построены на основе двоичных ячеек.

В работе ^{/30/} приведена схема кольцевого пересчета, работающего на частотах до 1 Мгц /рис. 20/. Каждый каскад кольца состоит из триггера, собранного на первых двух сетках пентодов 6Ф1Н, как на триодах. Анод одной из ламп используется для создания перебрасывающего импульса на следующий каскад. Анод другой лампы свободен.

Работает схема следующим образом. Пусть в левом каскаде верхняя лампа L_1 проводит, а в остальных каскадах проводят нижние лампы. Такое положение достигается соответствующим построением цепей сброса. Отрицательный пусковой импульс поступает одновременно на антидинатронные сетки всех верхних ламп. Так как все верхние лампы, кроме L_1 , заперты уже по первой сетке, то импульс воздействует только на левый каскад. Положительный пере-

пад напряжения с анода L_1 через емкость C_2 передается на запертую лампу L_3 и вызывает в каскаде L_3-L_4 регенеративный процесс, после чего L_3 переходит в проводящее состояние, а L_4 закрывается. Отрицательный перепад с экранной сетки L_3 через емкость C_1 и диод изменяет потенциал управляющей сетки L_1 . В ячейке L_1-L_2 происходит опрокидывание, и L_1 запирается. При приходе второго запускающего импульса процесс повторяется, и в состоянии с верхней проводящей лампой оказывается ячейка L_5-L_6 .

Коэффициент пересчета /т.е. число каскадов в кольце/ теоретически не ограничен, а практически лимитируется мощностью источника пусковых импульсов и легко может быть доведен до 100, как утверждает автор. Схема может быть использована также в качестве сдвигающего регистра.

Быстродействующие пересчетные кольцевые схемы были построены также на лампах со вторичной эмиссией /4,13/. Рассмотрим работу такой схемы /рис.21/.

Кольцо состоит из 5 каскадов на лампах типа *EFP-60*. Каждый каскад охвачен петлей гальванической положительной обратной связи с динода на управляющую сетку. Лампа в таком каскаде может находиться либо в закрытом, либо в проводящем состоянии. Все лампы кольца связаны по постоянному току через общее большое катодное сопротивление /10 ком/. Поэтому только одна из всех ламп /пусть это будет L_1 / может находиться в проводящем состоянии. Отрицательный пусковой импульс подается одновременно на все лампы кольца через диоды. При запираии лампы L_1 на ее аноде появляется положительный перепад напряжения, который через емкость C подается на управляющую сетку следующей лампы L_2 . Лампа L_2 переходит в проводящее состояние, а L_1 запирается. Такой же процесс повторяется после поступления на вход второго импульса - теперь в проводящее состояние перейдет лампа L_3 .

Разрешающее время, полученное в этой схеме, составляет 30 нсек. Лампы, стоящие в одном и том же кольце, подбирались по крутизне диодной характеристики в пределах 10%.

15.

В разделах 2-14 описывались пересчеты, основанные на использовании того или иного вида триггера. Известен другой путь построения схем для счета импульсов - применение накопительных счетчиков. В большинстве случаев

накопительные счетчики употребляются при счете периодических импульсов, при необходимости получения больших коэффициентов пересчета.

Накопительным элементом подобных счетчиков служит конденсатор C_1 /рис. 22а/. Конденсатор C_2 имеет меньшую величину, чем C_1 и является дозирующим. Полярность включения диодов зависит от полярности входных импульсов. Схеме счетчика предшествует формирующее устройство, выравнивающее амплитуды входных сигналов. По мере поступления на вход n импульсов напряжение на конденсаторе C_1 ступеньками достигает некоторого фиксированного значения E_n , после чего срабатывает разрядное устройство. Оно разряжает емкость C_1 и одновременно создает пусковой импульс для следующего каскада. Коэффициент пересчета накопительной ячейки может быть сделан достаточно большим. Он ограничивается по следующим причинам. Во-первых, при слишком больших коэффициентах пересчета повышаются требования к стабильности амплитуды входящих импульсов. Во-вторых, напряжение на конденсаторе C_1 возрастает по ступенчатой кривой, огибающей которой является экспонента. Поэтому ступеньки напряжения, полученные от импульсов с большим номером, мало отличаются друг от друга. Это может привести к нечеткому срабатыванию спусковой разрядной схемы. Для линеаризации огибающей в схему вводится катодный повторитель /рис. 22б/. Однако включение катодного повторителя не снимает первого недостатка, и коэффициент пересчета накопительных ячеек обычно не превышает 10.

Из-за естественного разряда конденсатора и обусловленной этим нижней границей частоты поступления импульсов на накопительную ячейку она почти не применяется при счете случайно распределенных во времени импульсов.

В работе^{/31/} была сделана попытка избавиться от этого недостатка. В схему обычного накопительного счетчика с коэффициентом пересчета 5 введено фиксирующее устройство на лампах L_4-L_7 /рис. 23/. Работает оно следующим образом. В начале разность потенциалов на конденсаторе C_1 удерживается на уровне 60 вольт с помощью диода L_3 и сопротивления R . При этом четыре диода L_6 и L_7 отперты, а четыре триода L_4 и L_5 заперты. При поступлении первого входного импульса напряжение на C_1 падает до 48 вольт, что вызывает запираание диода L_{6a} . Соответствующий ему триод L_{4a} отпирается. Так как

общая анодная нагрузка всех триодов /сопротивление $R = 2,2 \text{ M}$ / очень велика, то на аноде лампы Л_{4a} /следовательно, и на зарядном конденсаторе/ устанавливается потенциал всего на 1-2 вольта выше потенциала сетки, который фиксирован на уровне +48 вольт. При поступлении второго входного импульса потенциал на конденсаторе падает до 36 вольт и т.д.

Фиксирующая схема вступает в действие только при малых скоростях счета. При больших загрузках она не успевает срабатывать, но в этом случае она и не очень нужна. Разрешение, приводимое автором, определялось не пересчетом, а входными устройствами. Оно составляло 0,25 мксек.

В работе /32/ приведена схема накопительной ячейки для больших скоростей счета. Чтобы при остановке счета не потерять накопленных на емкости импульсов, автор предлагает довольно сложную схему ступенчатой разрядки емкости до начального потенциала. Число ступенек считается обычным медленным пересчетом.

16.

В экспериментальной ядерной физике часто встречаются случаи, когда при сравнительно небольшой средней скорости поступления импульсов на вход они могут быть сгруппированы пачками. Такие пачки импульсов выдаются детекторами частиц из современных ускорителей или импульсных реакторов. Для того, чтобы сосчитать все импульсы в пачке без потерь, приходится конструировать сложные пересчетные приборы с высоким разрешением, которые в процессе работы используются очень неэкономно.

Возможен другой способ счета импульсов в пачке - надо с помощью некоторого устройства на небольшое время запомнить число пришедших импульсов, а затем /например, в промежутке между пачками/ сосчитать их обычным сравнительно медленным пересчетом.

Такие устройства были предложены и осуществлены /33,34,35,36,37/. Входная часть всех устройств не отличается в принципе от накопительной ячейки: приходящие импульсы ступеньками повышают напряжение на конденсаторе. Между собой схемы отличаются лишь способом считывания числа

импульсов, накопленных на емкости. В работах ^{/33,34,35/} запоминающая емкость разряжается ступеньками с помощью импульсов, создаваемых отдельным генератором L_5 на рис. 24/. Величина заряда, снимаемого с емкости при считывании, подбирается равной заряду, приносимому входным импульсом. Генератор работает до тех пор, пока заряд на емкости не исчезнет. Напряжения в различных точках схемы показаны на рис. 25. При этих условиях пачка случайно распределенных во времени входных импульсов преобразуется в последовательность импульсов с интервалами, зависящими от частоты генератора. В качестве генератора может быть использована также первая двоичная ячейка пересчета, включенного последовательно с накопительной ячейкой. В нормальном состоянии ячейка блокируется начальными напряжением запоминающей емкости /непосредственно или через усилитель/. Входные импульсы изменяют это напряжение и переводят ячейку в режим автоколебаний. При каждом колебании с емкости снимается заряд, соответствующий одному входному импульсу. Колебания ячейки продолжаются до момента восстановления начального потенциала на запоминающей емкости.

В принципе возможен другой способ разряда запоминающей емкости. Если каким-либо образом заставить емкость разряжаться линейно, то время разряда будет прямо пропорционально начальному напряжению, т.е. числу поступивших импульсов.

Схема, использующая линейный разряд, приведена в работе ^{/37/} /рис.26/. Приходящие отрицательные импульсы заряжают конденсатор C_2 через диод. При разряде C_2 через сопротивление R напряжение на конденсаторе стремится к +150 вольтам. Диод D_3 позволяет конденсатору разряжаться только до нуля. Таким образом, из экспоненциальной кривой разряда используется лишь маленький начальный участок, который можно считать линейным. Напряжения в различных точках схемы показаны на рис. 27. Длительность импульса в аноде лампы ограничителя L_1 пропорциональна числу пришедших на вход сигналов. Этот импульс запускает запертый по третьей сетке блокинг-генератор с фиксированной частотой / 1 МГц / на лампе L_2 . Подбором R можно добиться соответствия между числами входных и выходных импульсов. Схема, приведенная на рис. 26, работает успешно при числе запоминаемых импульсов не более 5.

Дальнейшее увеличение емкости "памяти" может быть получено с помощью катодного повторителя, включаемого для линеаризации огибающей кривой напряжения на конденсаторе C_2 .

Схемы, описанные в этом разделе, могут быть использованы не только в работе с пульсирующими источниками импульсов, но и при счете случайно распределенных во времени событий. В этом случае они позволяют применять при измерениях более медленные пересчетные схемы, без увеличения числа потерь при счете. Приближенные формулы просчетов при измерениях с помощью запоминающих ячеек приведены в работах /33,36/.

При работах с запоминающими ячейками надо твердо представлять себе, что они лишь уменьшают потери счета, но не могут повысить среднюю скорость счета выше той, на которую рассчитан следующий за ячейкой пересчетный прибор.

Быстродействие запоминающих ячеек может быть весьма большим. Оно ограничивается лишь скоростью формирующего входного устройства и свойствами примененных в схеме диодов.

17.

Для уменьшения потерь при счете импульсов, вызванных недостаточно высоким разрешением пересчетного прибора, в работе /38/ было предложено регистрировать несосчитанные импульсы другим пересчетным прибором. Блок-схема установки приведена на рис. 38. Входные импульсы подаются на оба входа схемы совпадений СС, причем на один из входов - с задержкой через формирующее звено. Длительность сформированных импульсов T равна или несколько больше разрешающего времени пересчетного прибора. Величина задержки такова, что нет самосовпадений, т.е. совпадений сформированных импульсов с входными импульсами. Два входных импульса, разделенных временем, большим чем T , не вызовут срабатывания схемы совпадения и оба зарегистрируются пересчетным прибором № 1. Импульсы же, пришедшие в течение времени T , вызовут срабатывание СС. Сигнал со схемы совпадений

закроет схему антисовпадений СА и на пересчетный прибор № 1 успеет пройти только первый из двух импульсов. Второй импульс, который не был бы сосчитан пересчетом № 1, поступает только на вход пересчета № 2 и регистрируется им. Такая установка существенно уменьшает потери счета.

В заключение авторы хотят указать, что в обзоре преимущественно освещены работы, в которых предлагаются новые решения задачи повышения быстродействия пересчетных схем и уменьшения потерь при счете импульсов. Авторы не останавливались на работах, посвященных различным малосущественным модификациям этих новых схем, и поэтому в обзор включены, в основном, лишь оригинальные работы.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 апреля 1960 года.

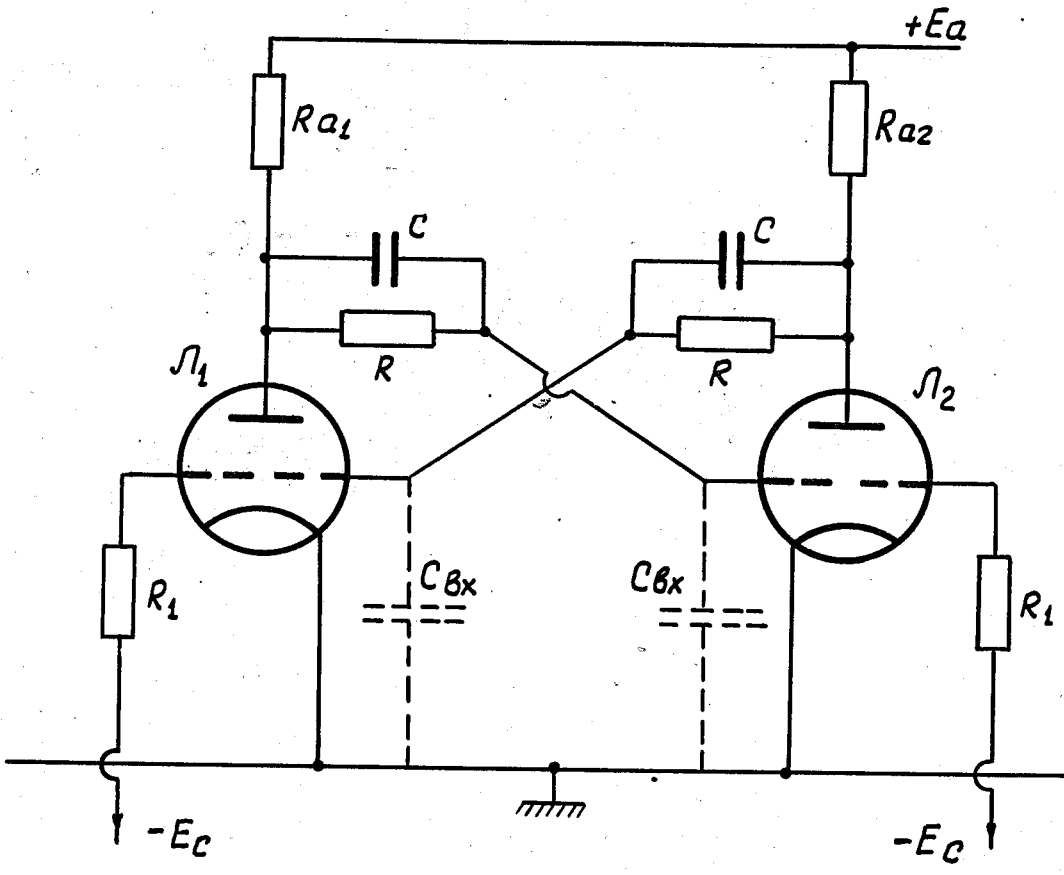


Рис. 1.

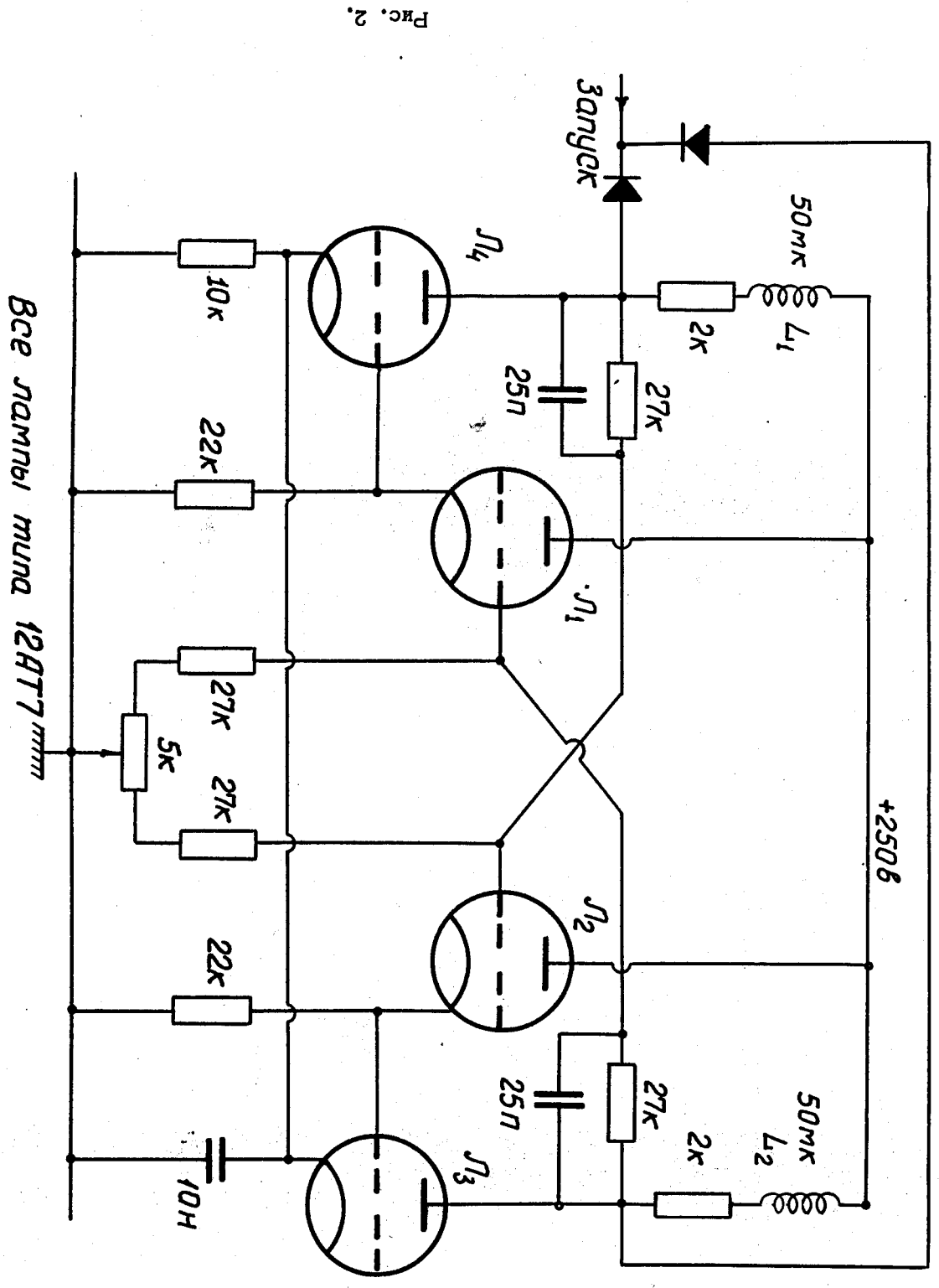


Рис. 2.

Бсе напмы мунд 12АТ7

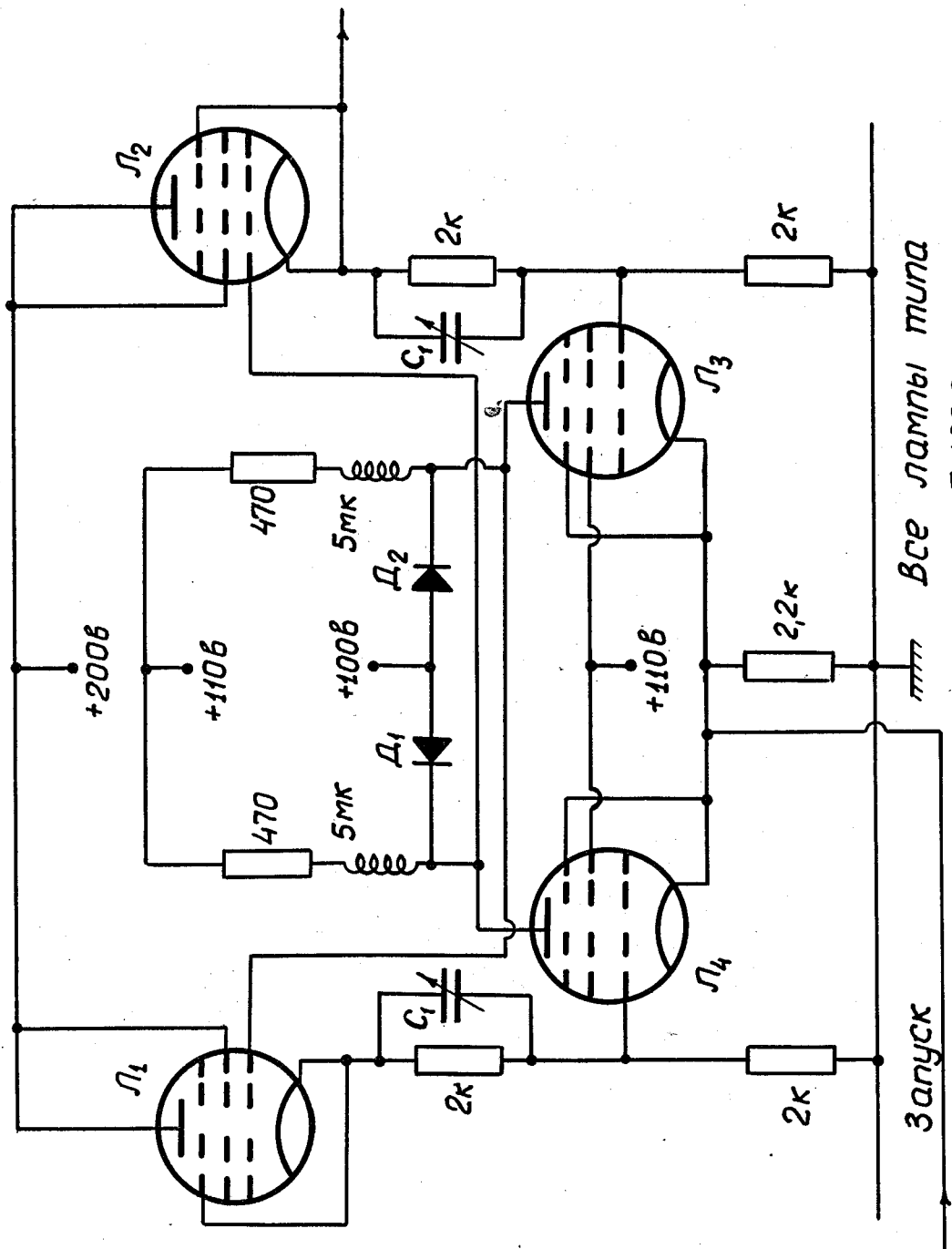


Рис. 3.

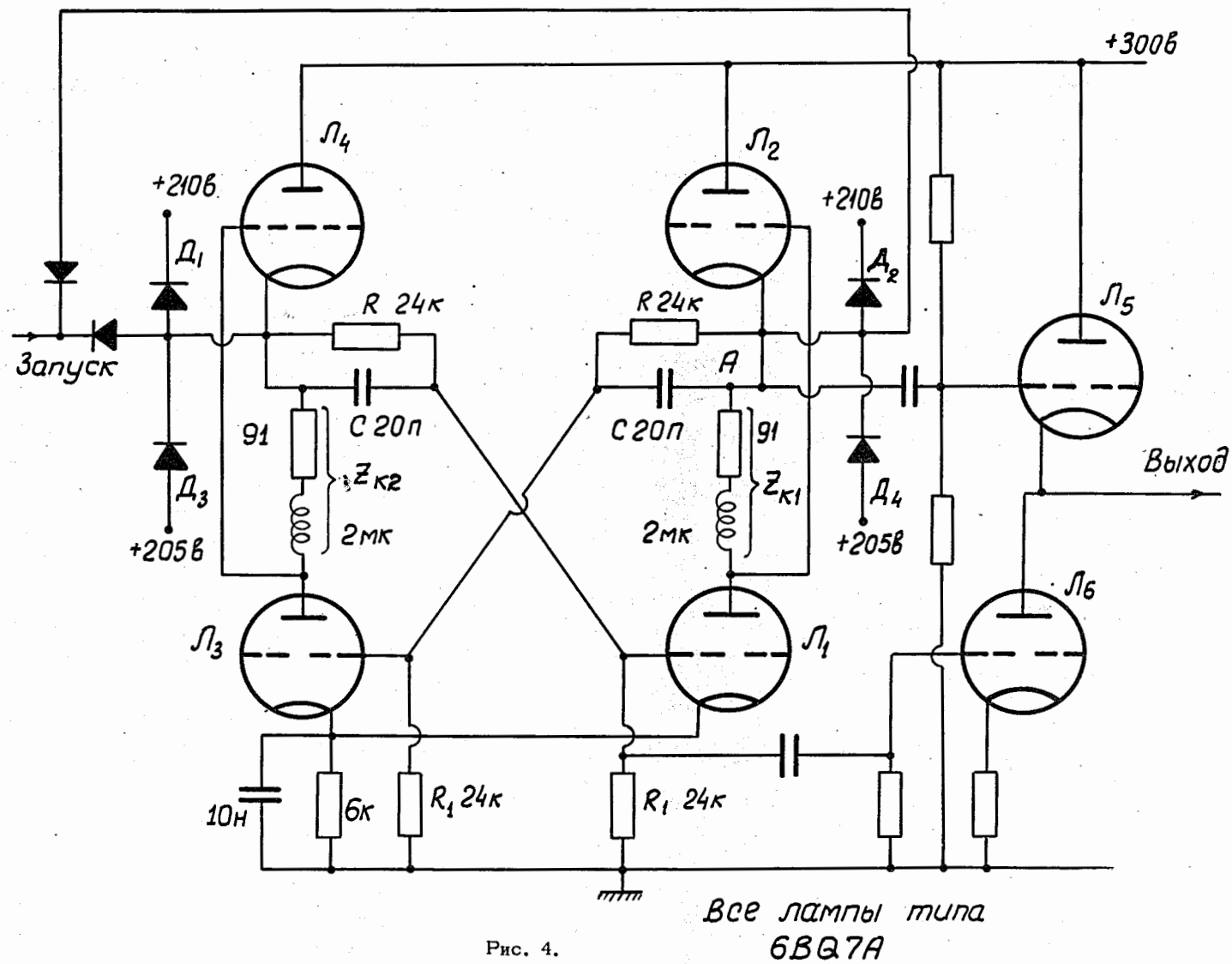


Рис. 4.

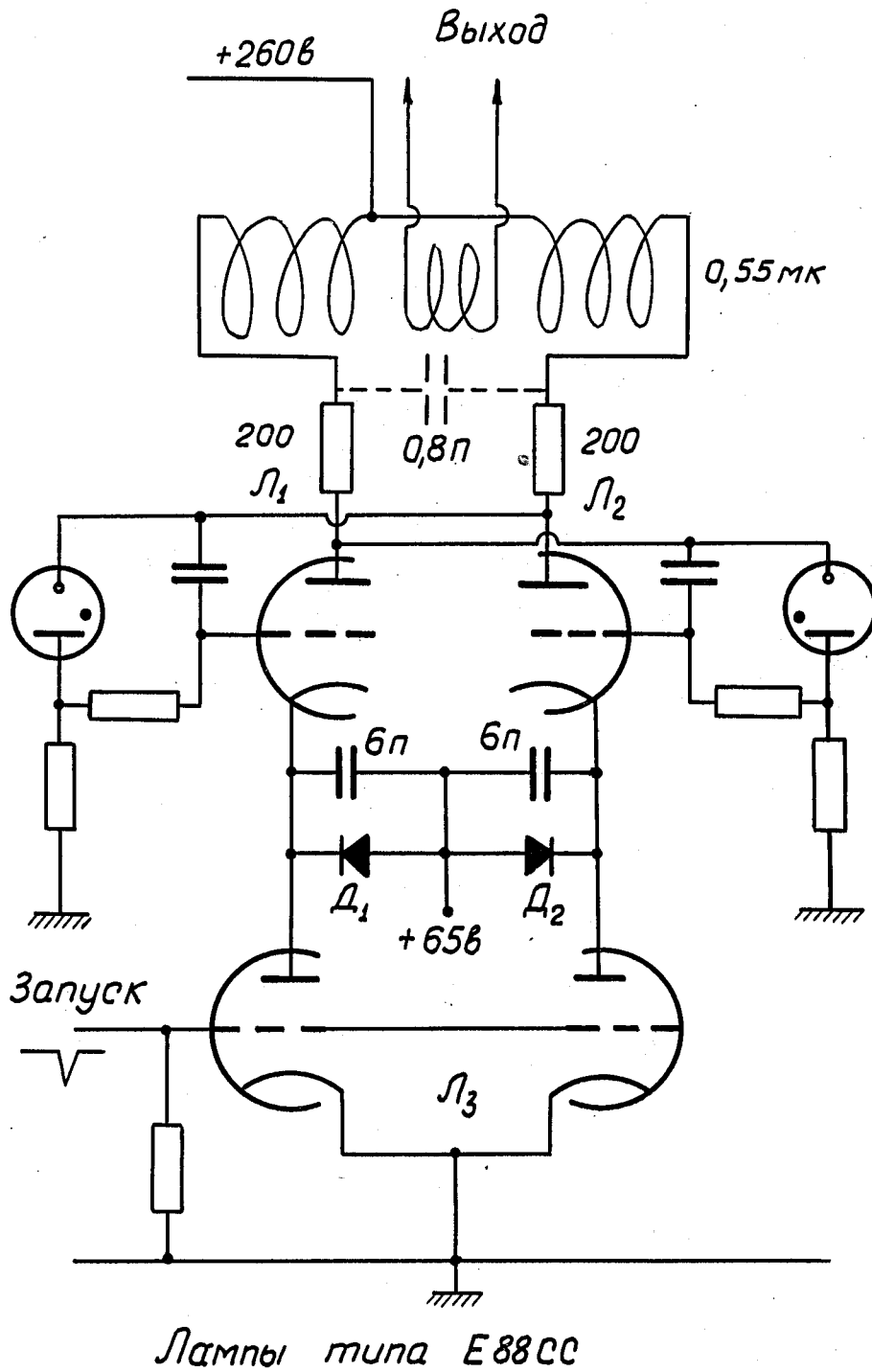


Рис. 5.

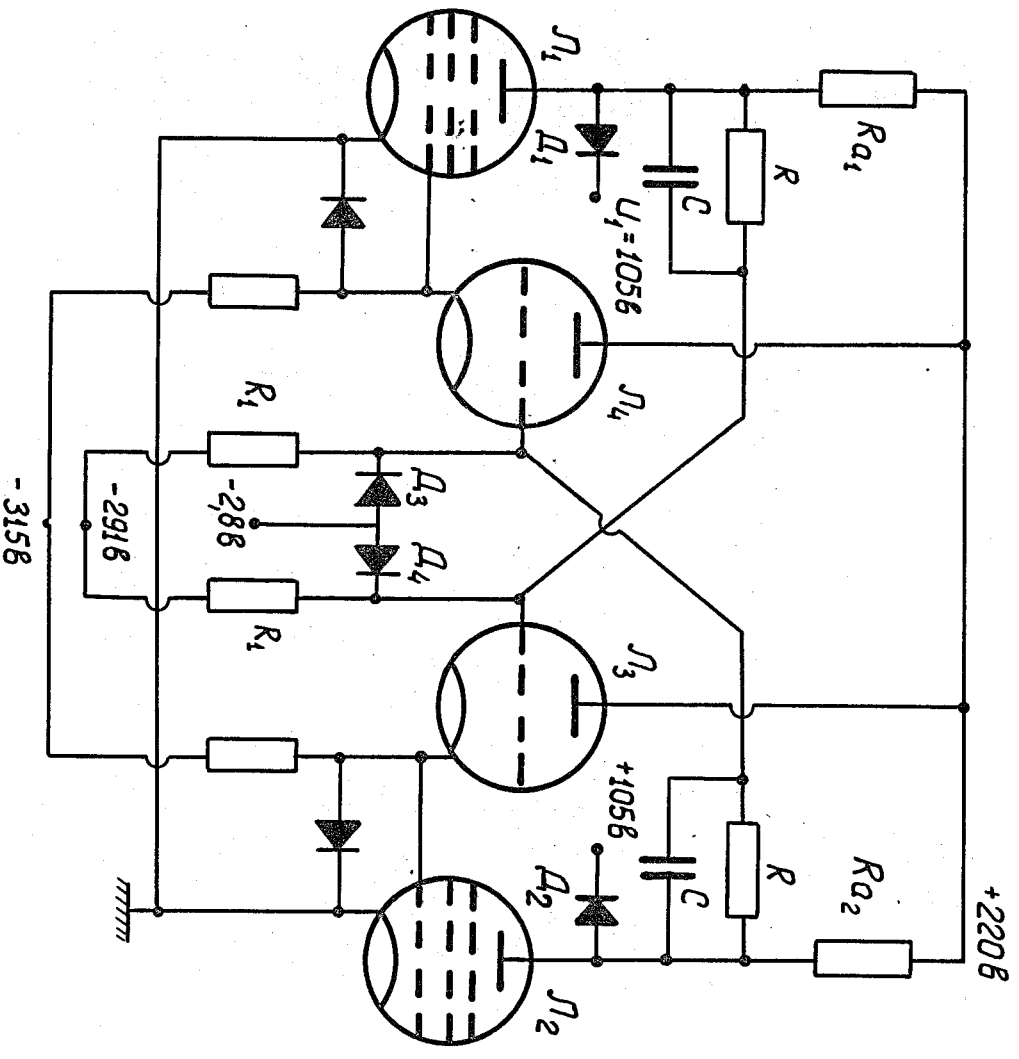


Рис. 6.

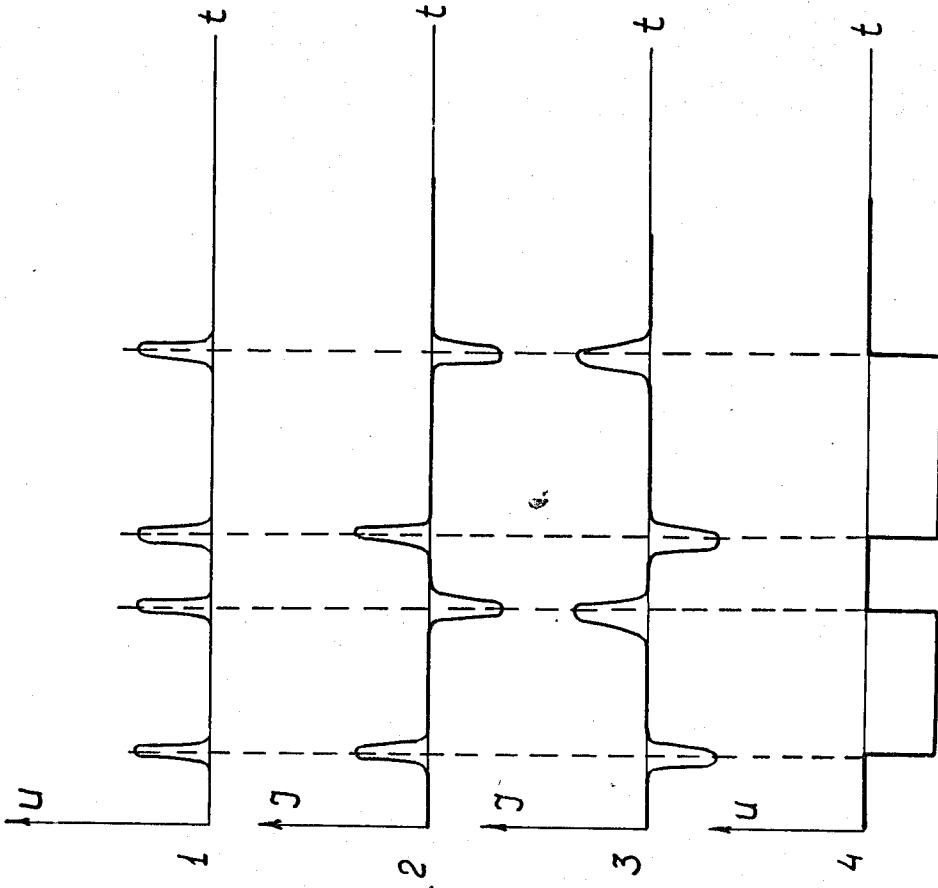
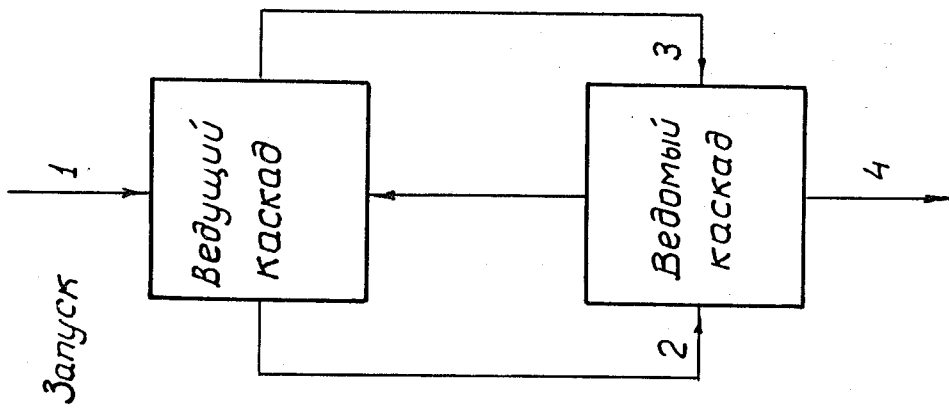
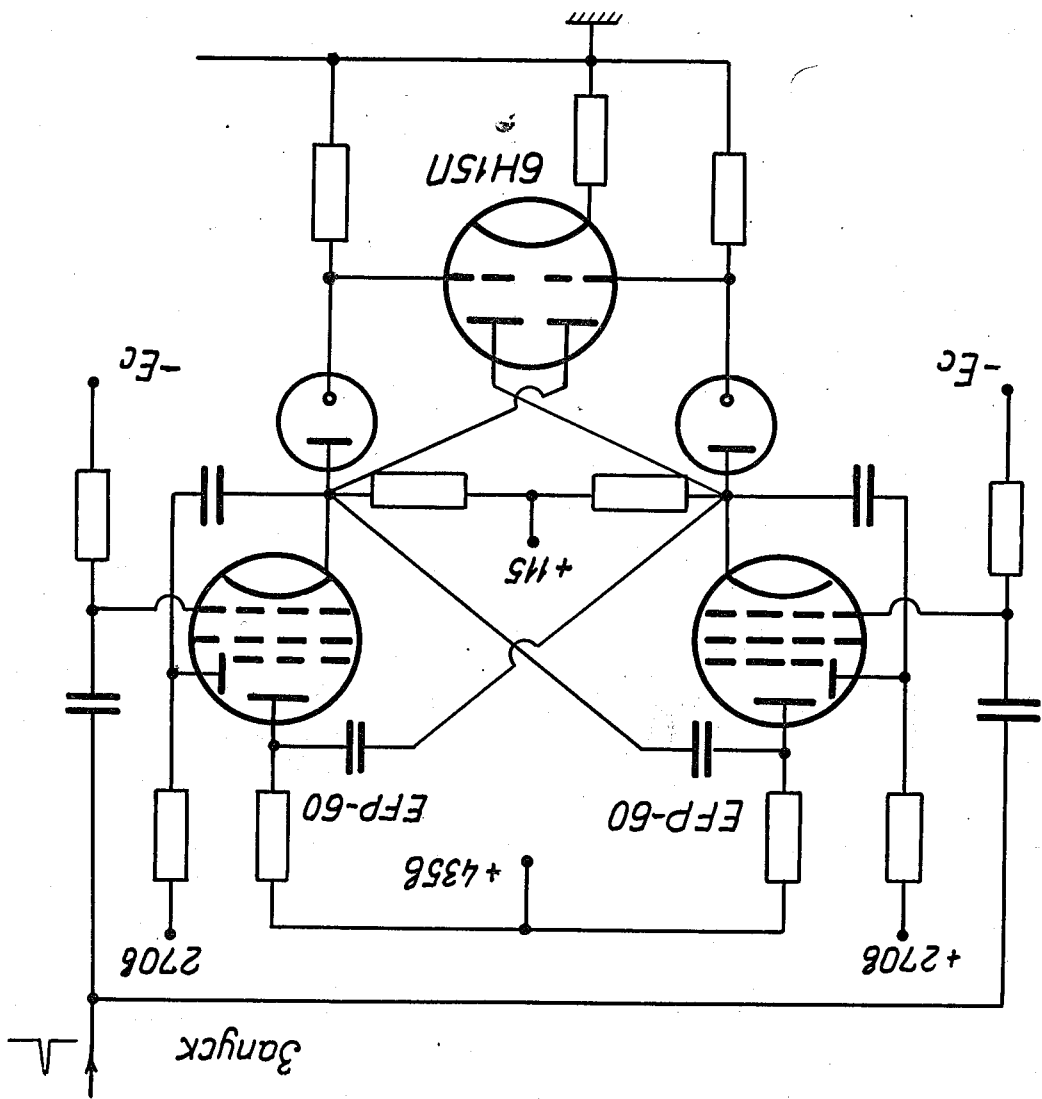


Рис. 7.

Рис. 8.



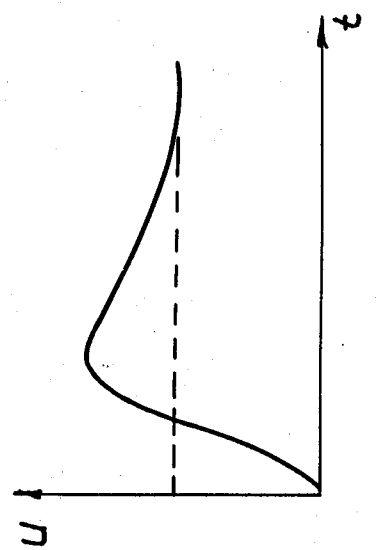
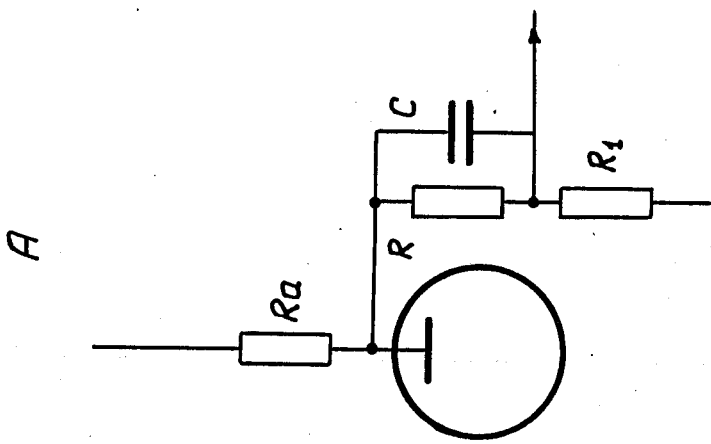
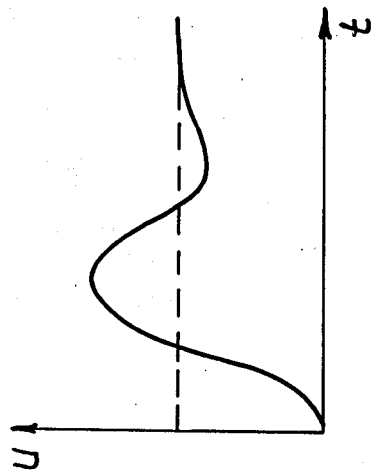
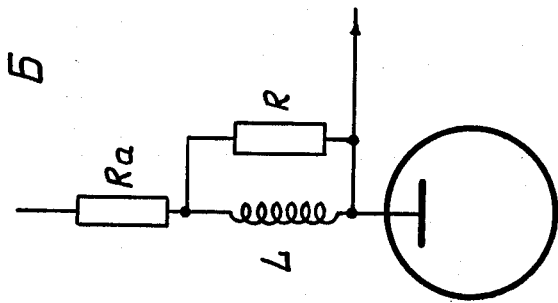
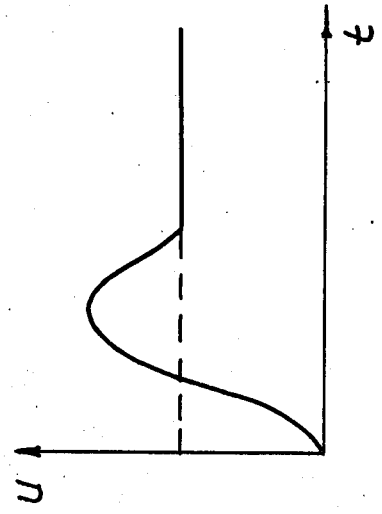
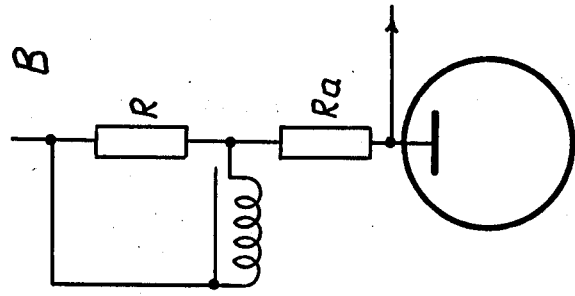
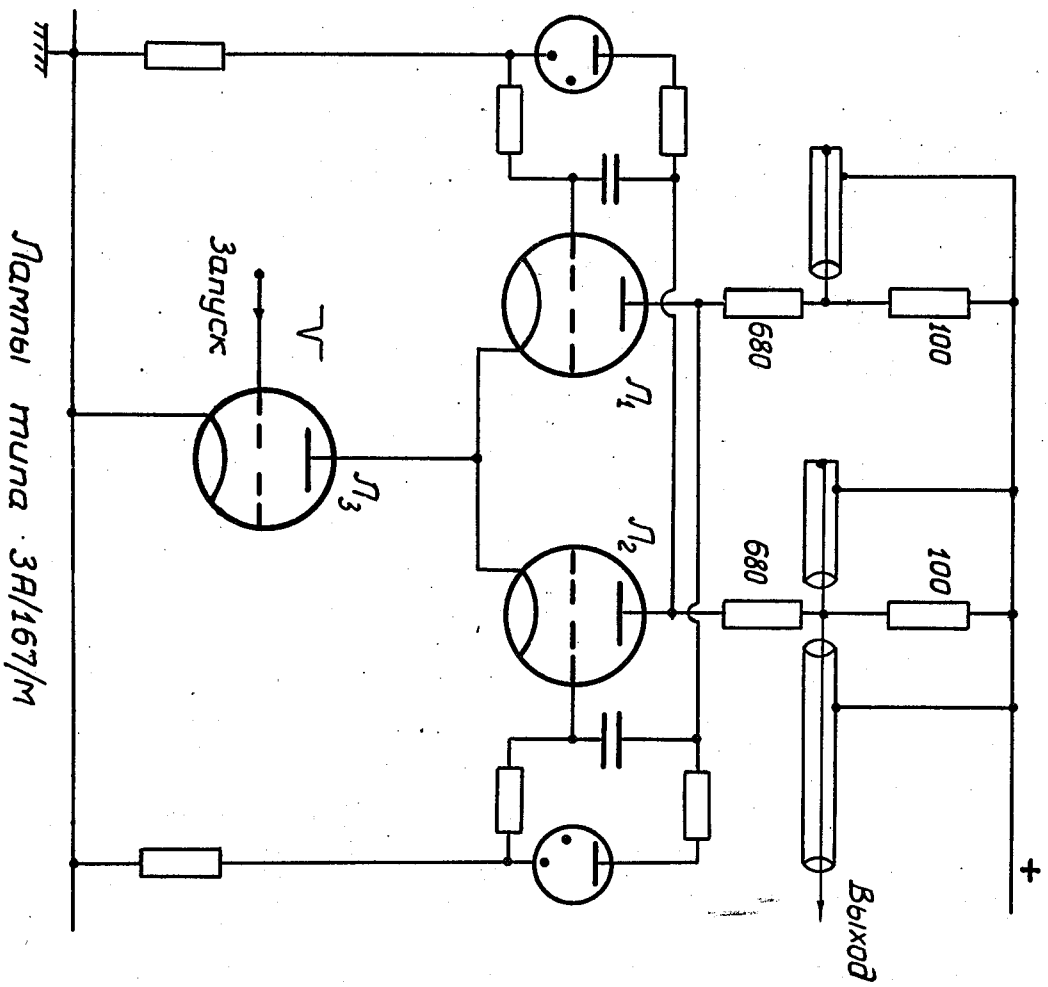


Рис. 9.



Самый мунд 3A/167/m

Рис. 10.

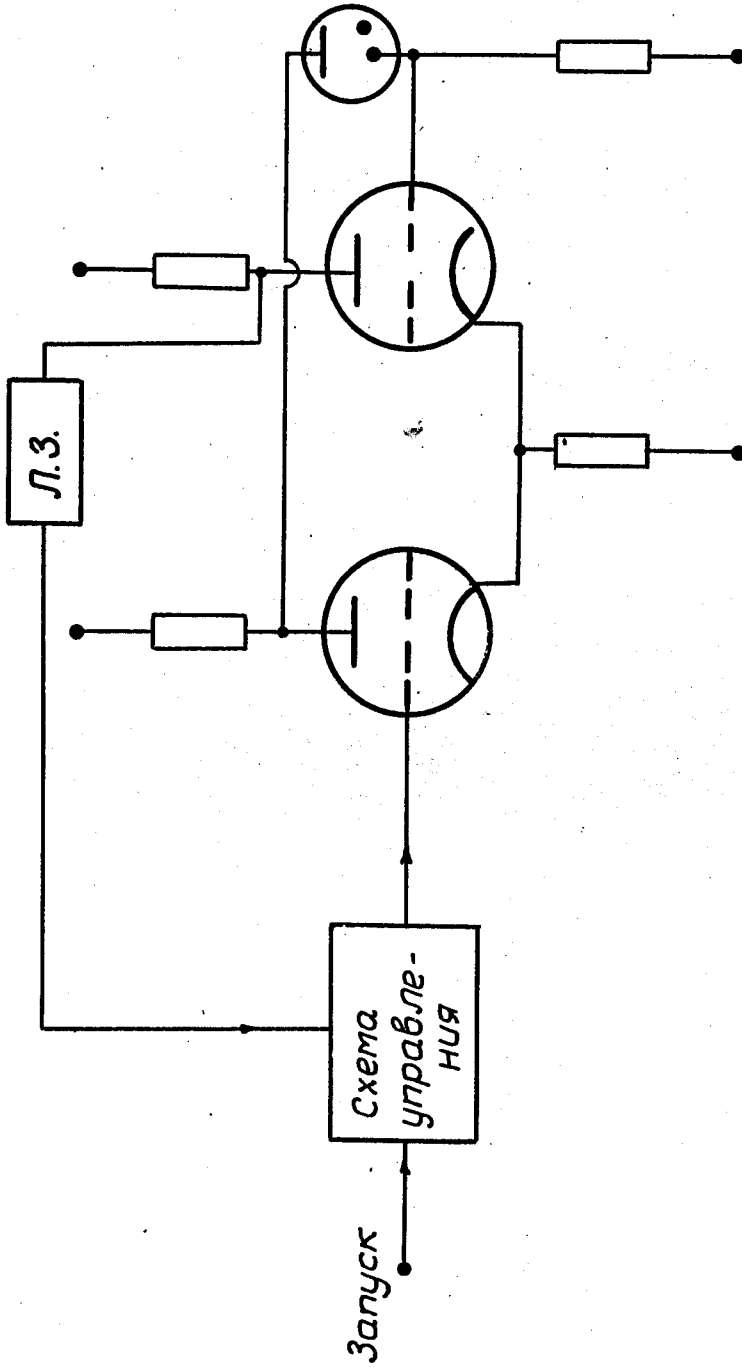
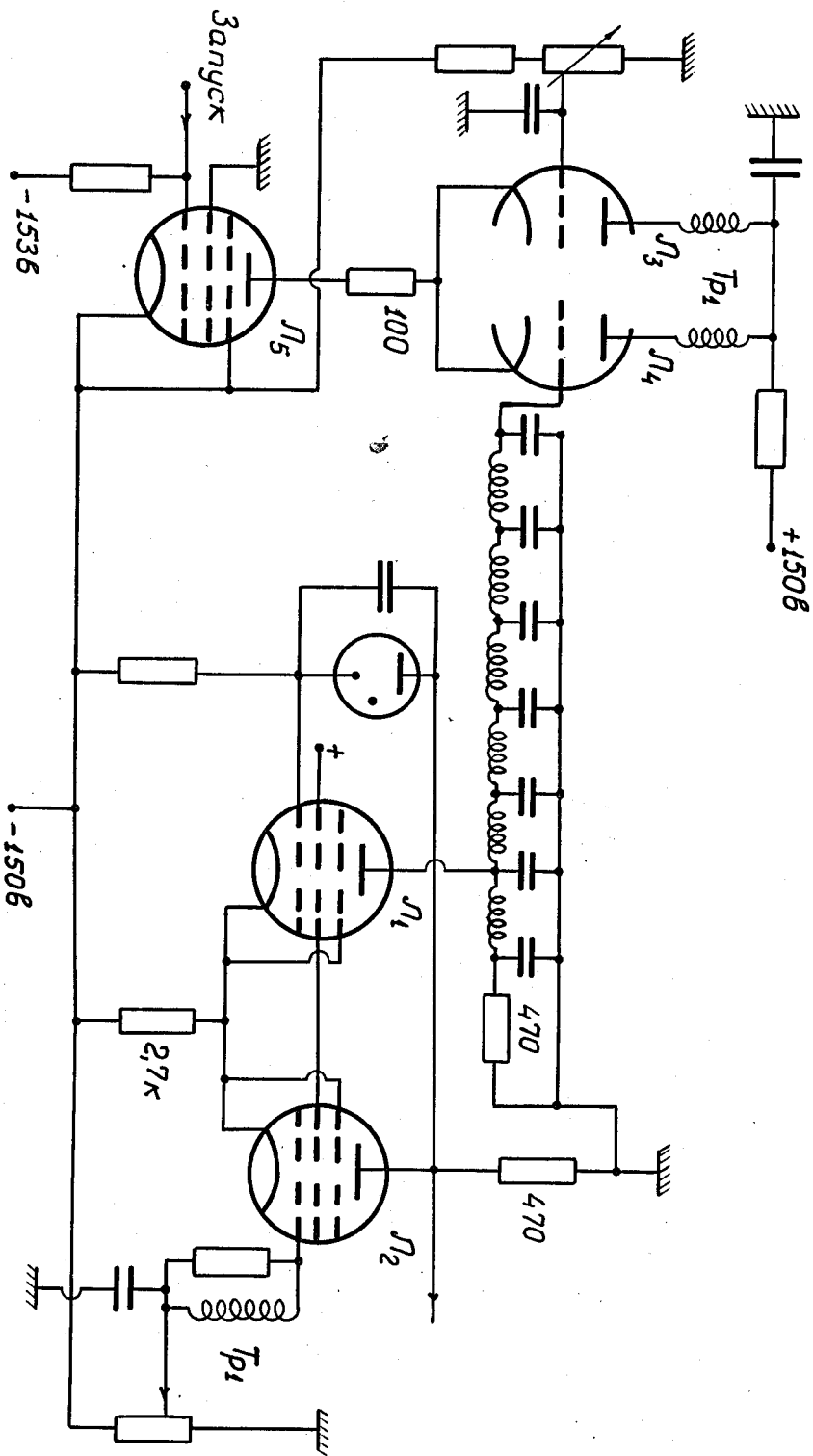


Рис. 11.



N_1, N_2, N_5 мунa E180F
 N_3, N_4 мунa E88CC

Рис.12.

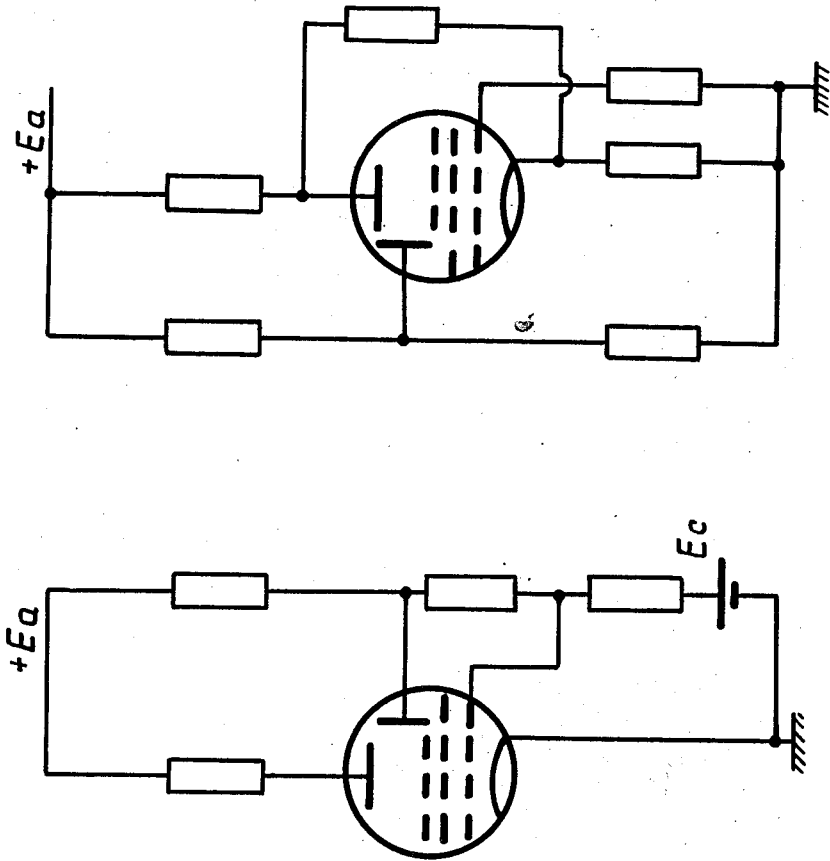


Рис. 13.

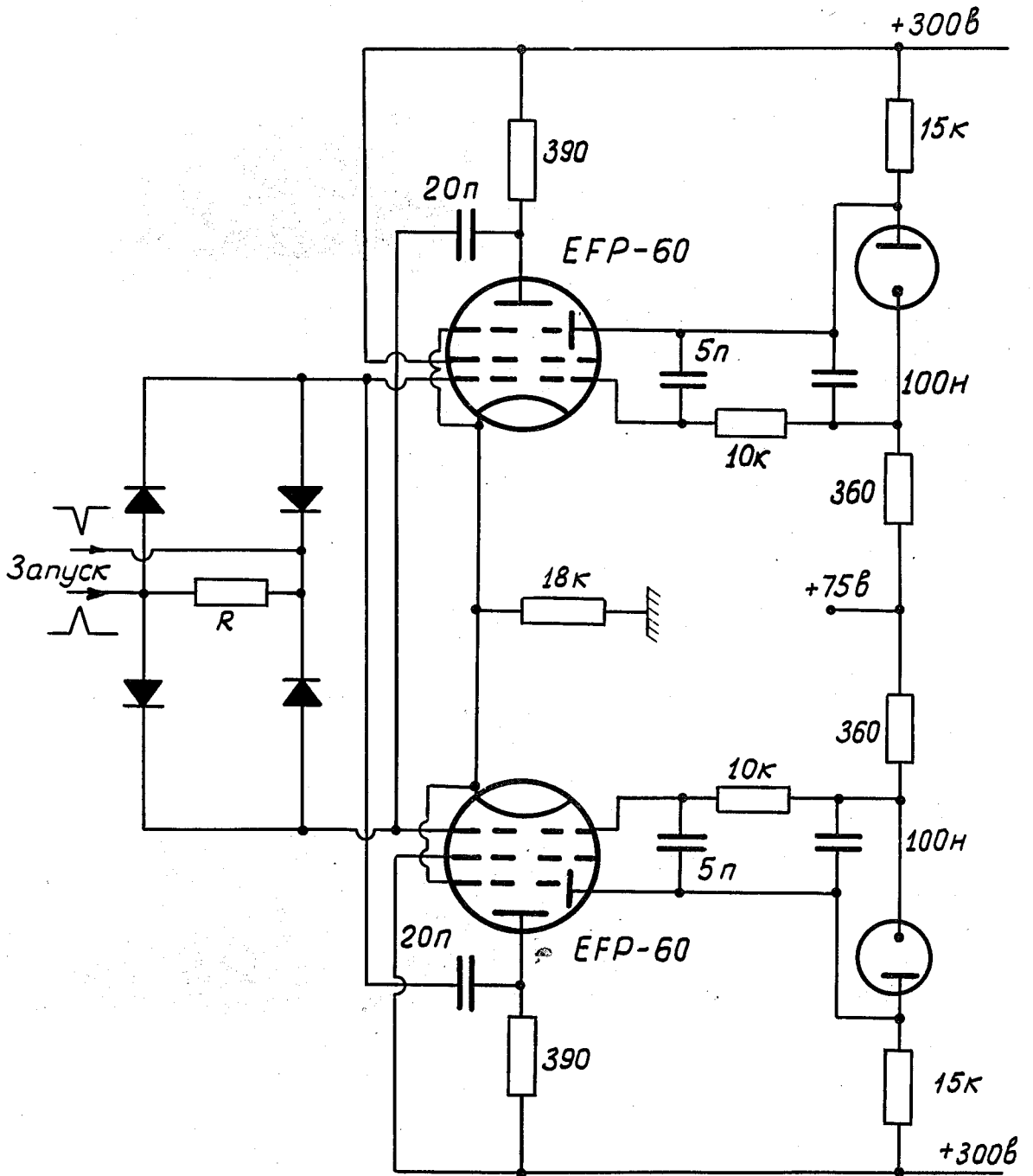


Рис.14.

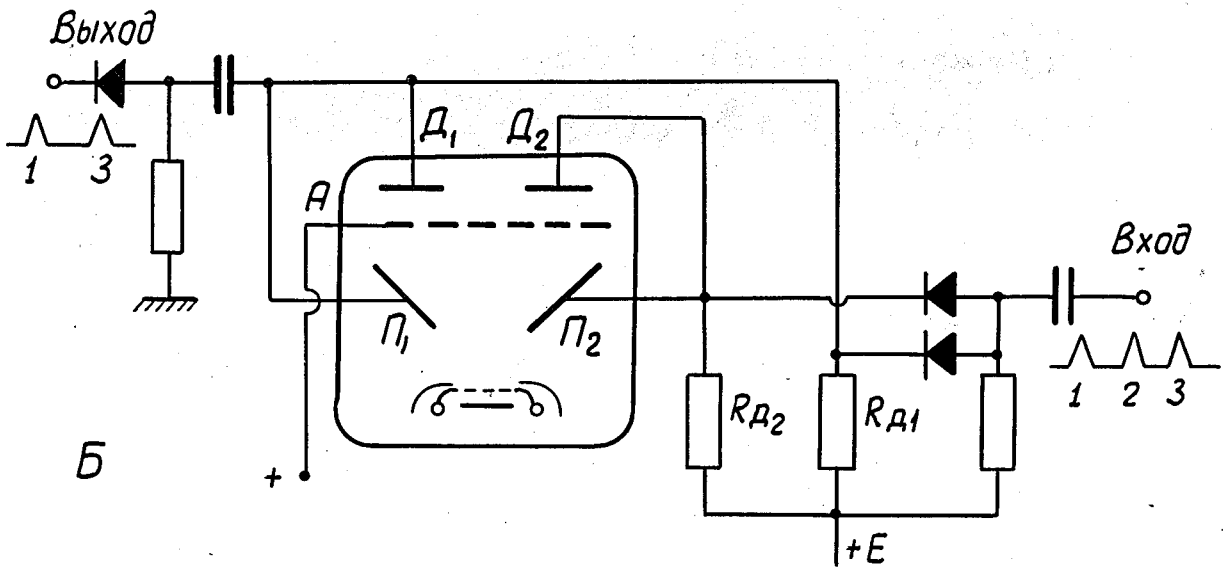
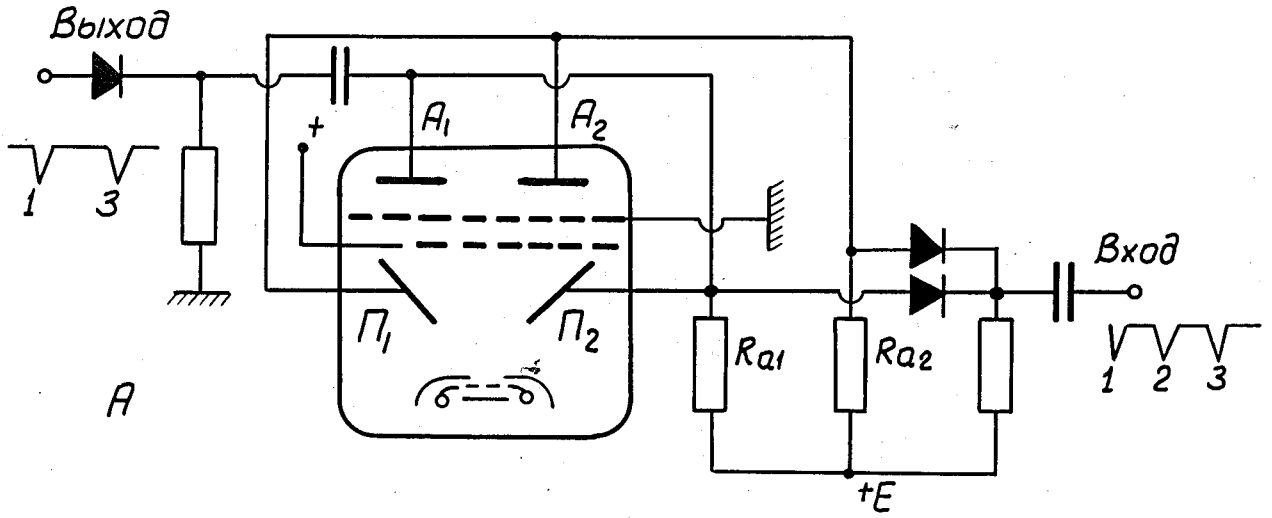


Рис.15.

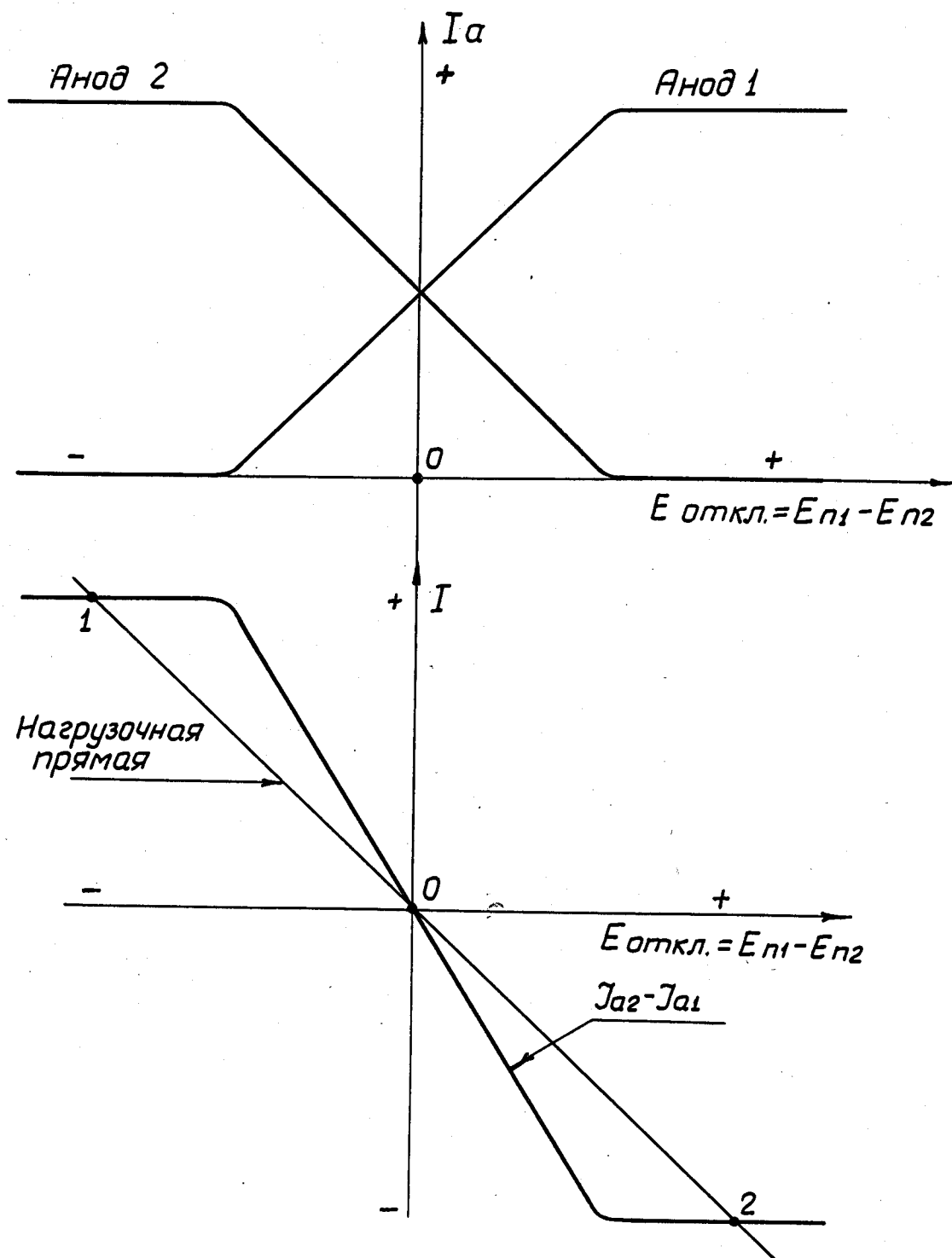


Рис. 16.

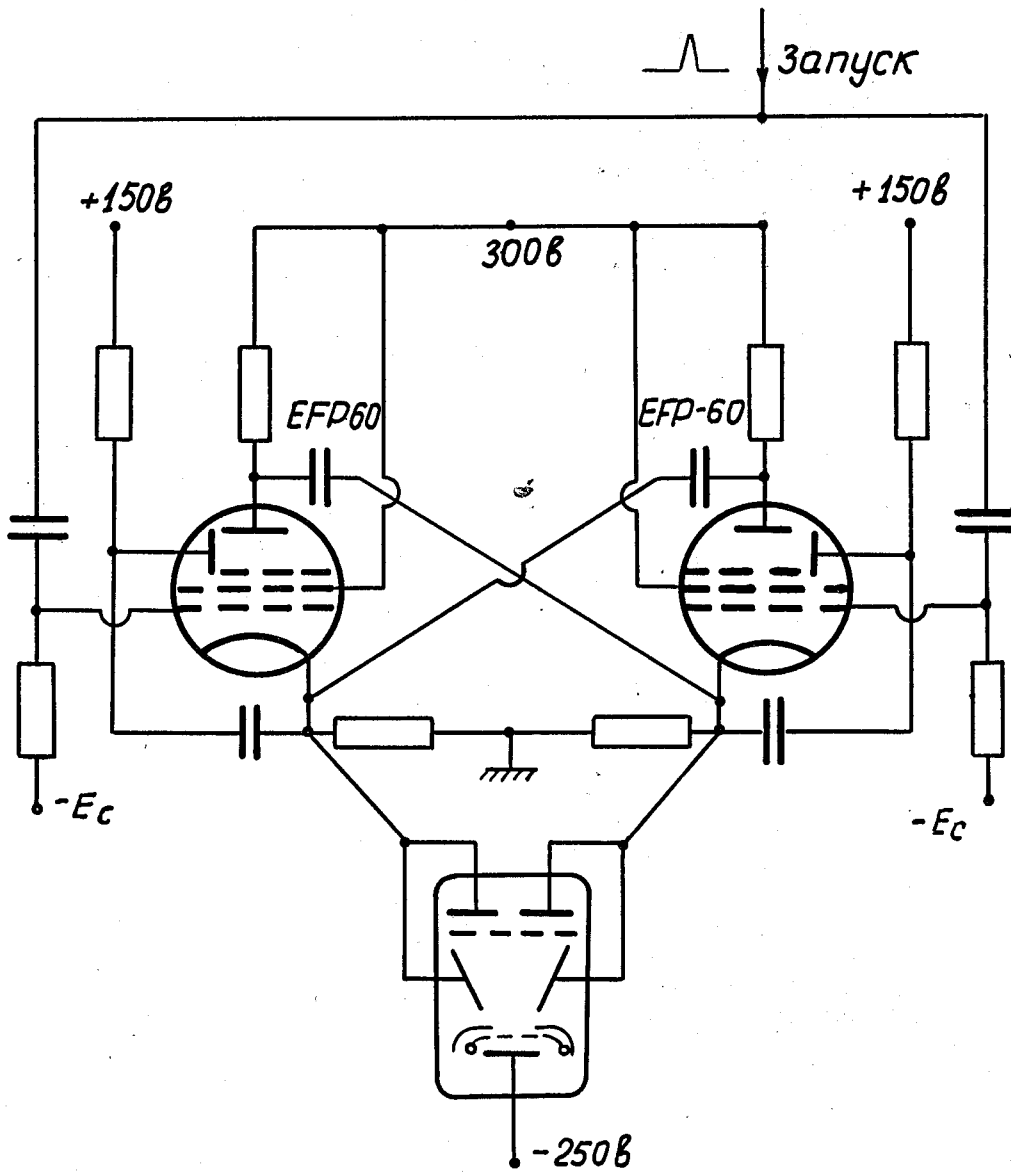


Рис. 17.

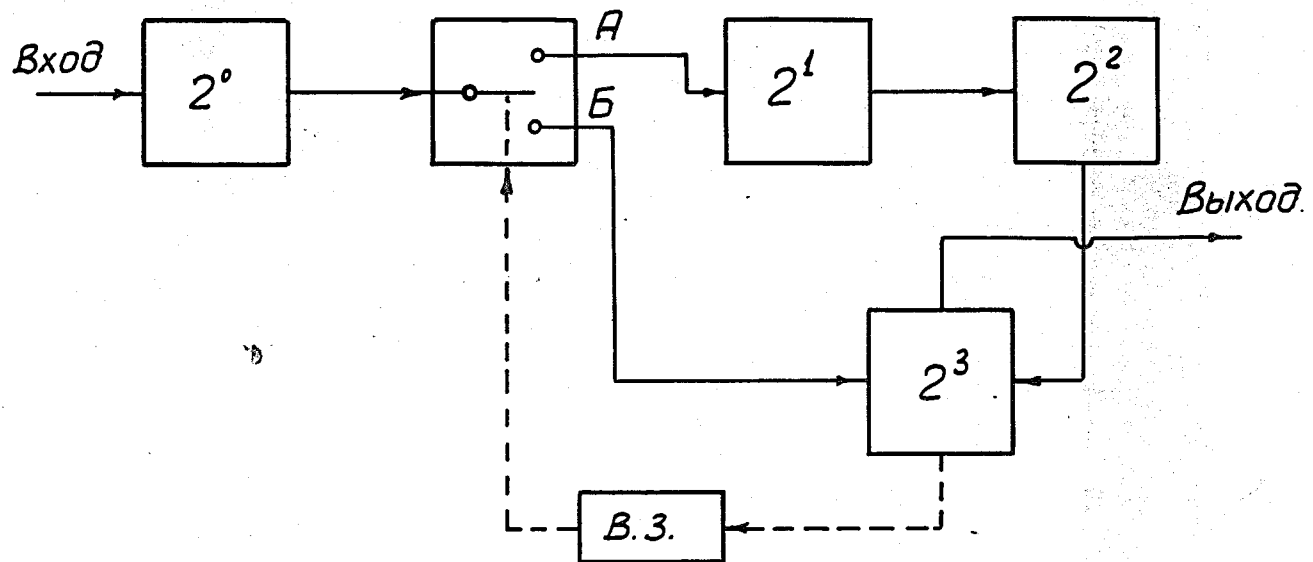


Рис. 18.

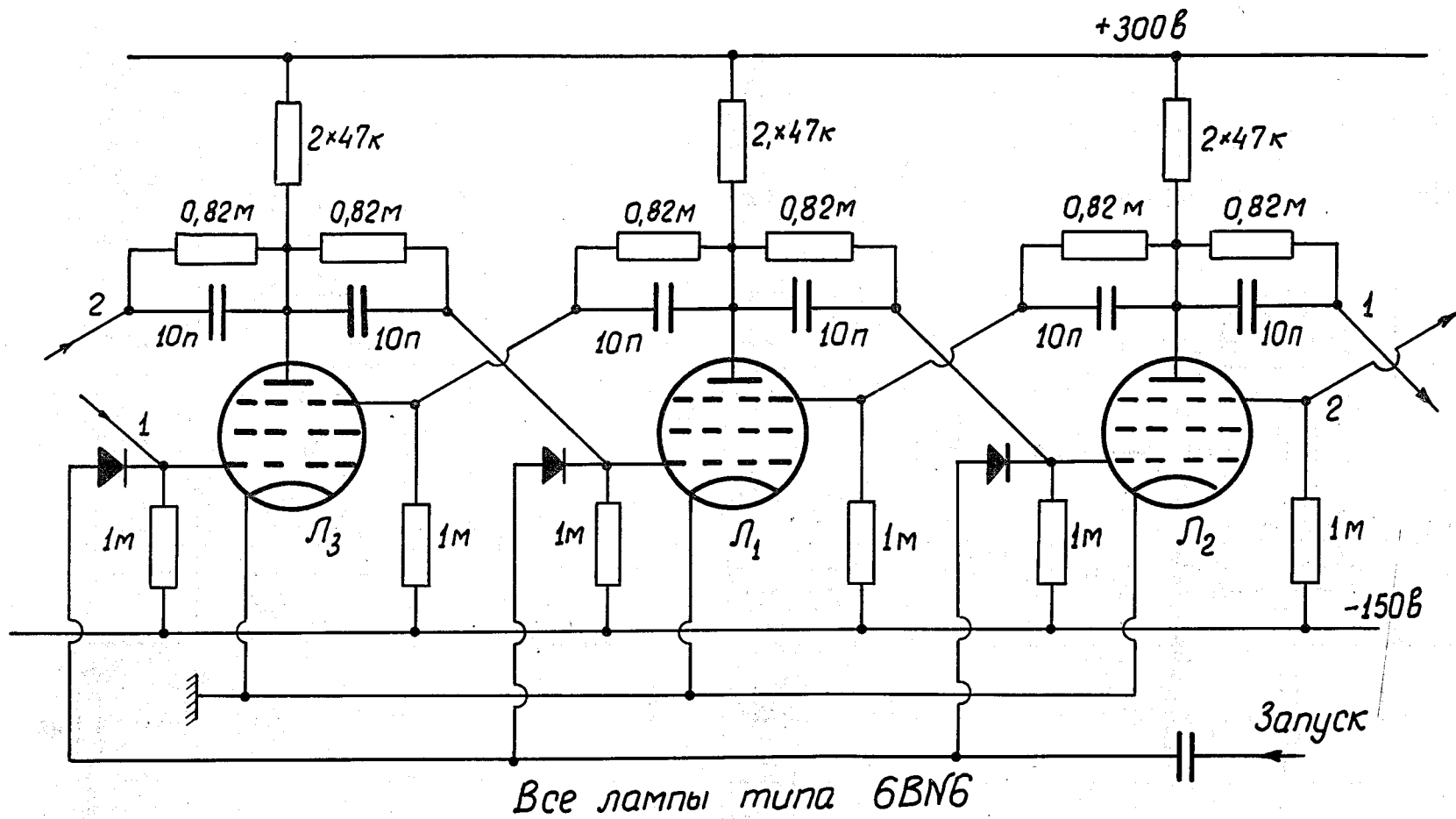


Рис. 19.

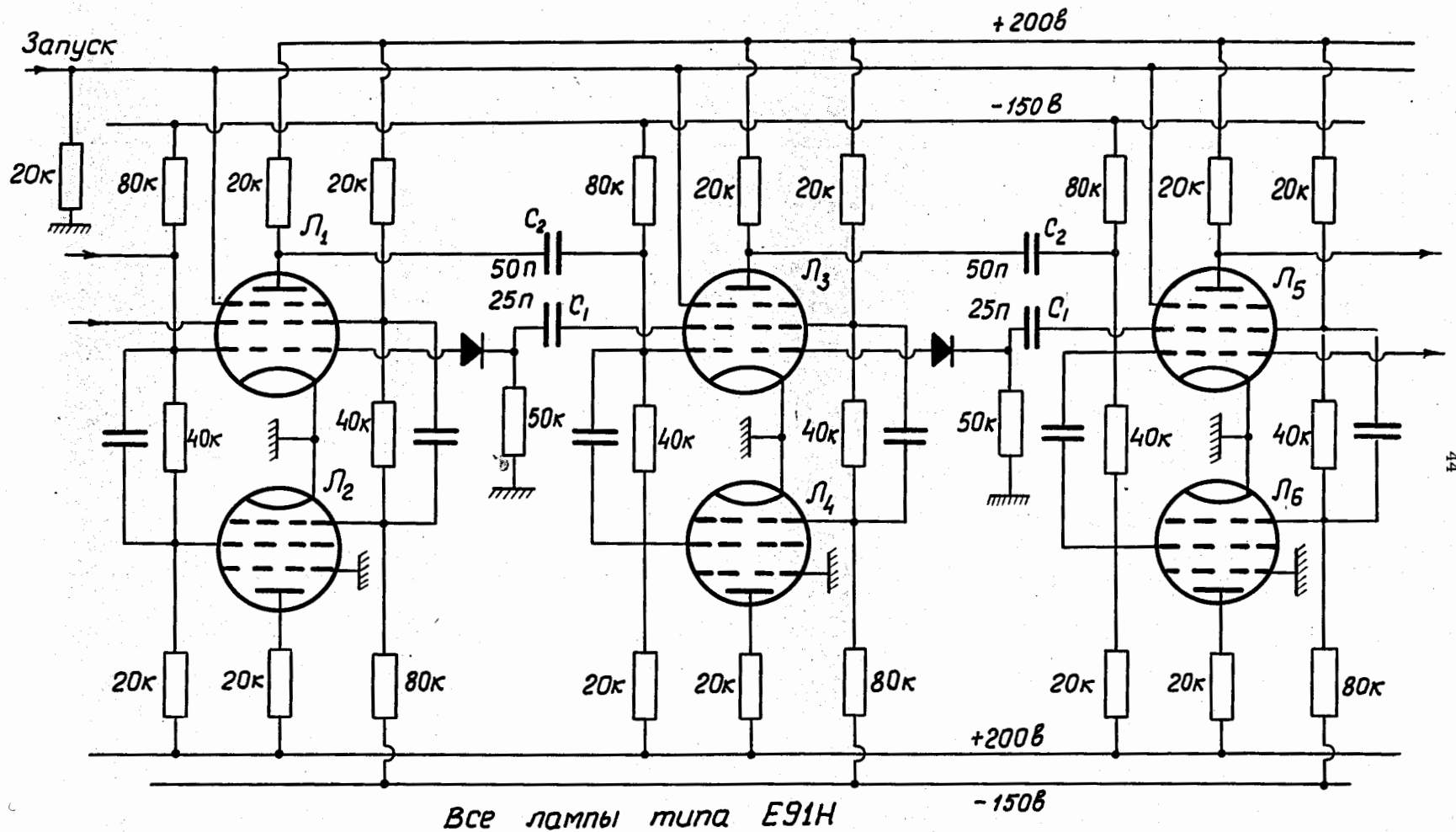


Рис. 20.

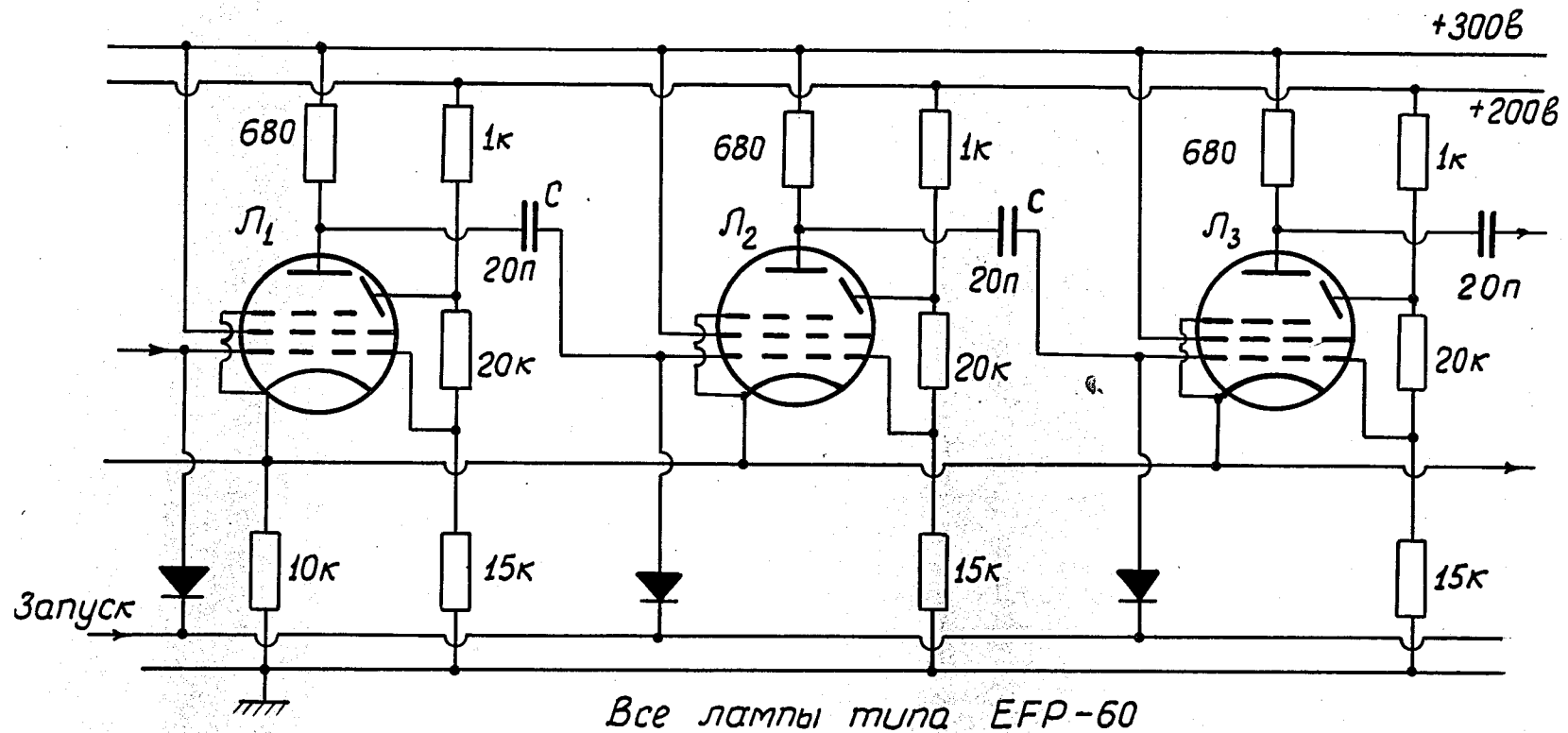
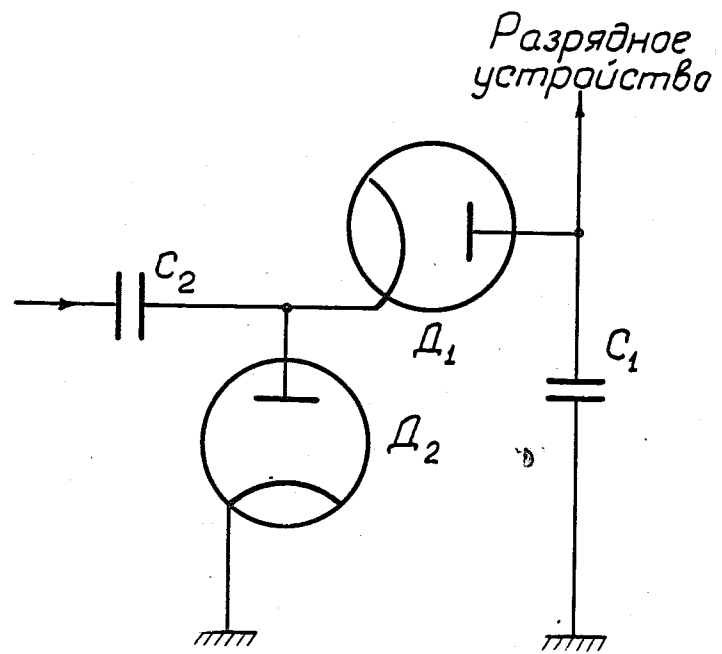
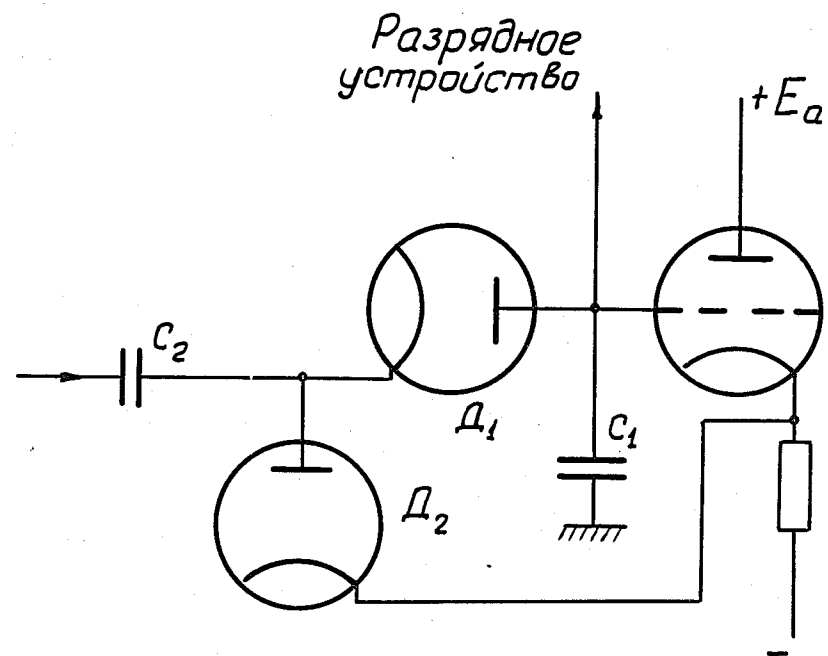


Рис. 21.



А



Б

Рис. 22.

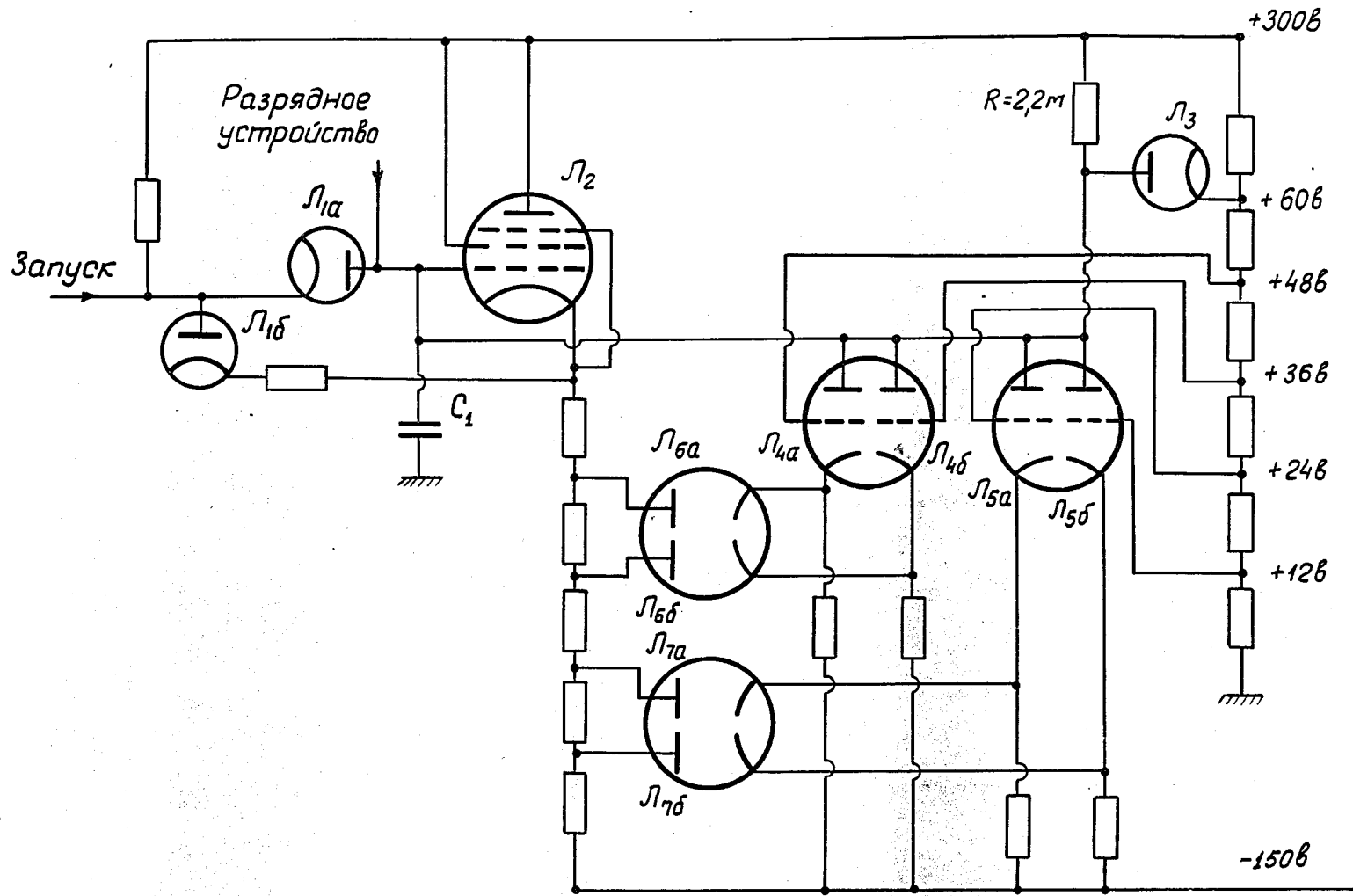


Рис. 23.

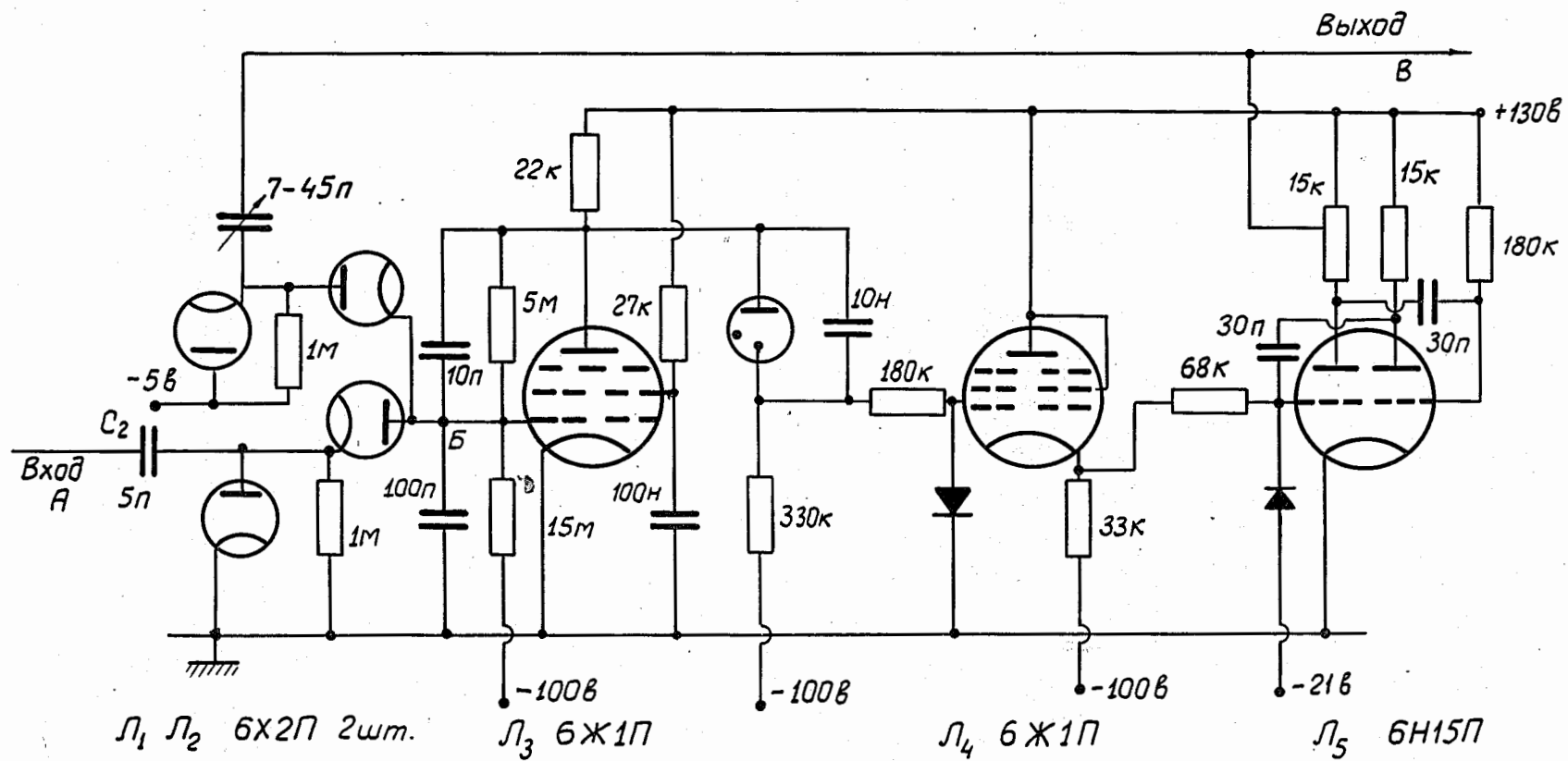


Рис. 24.

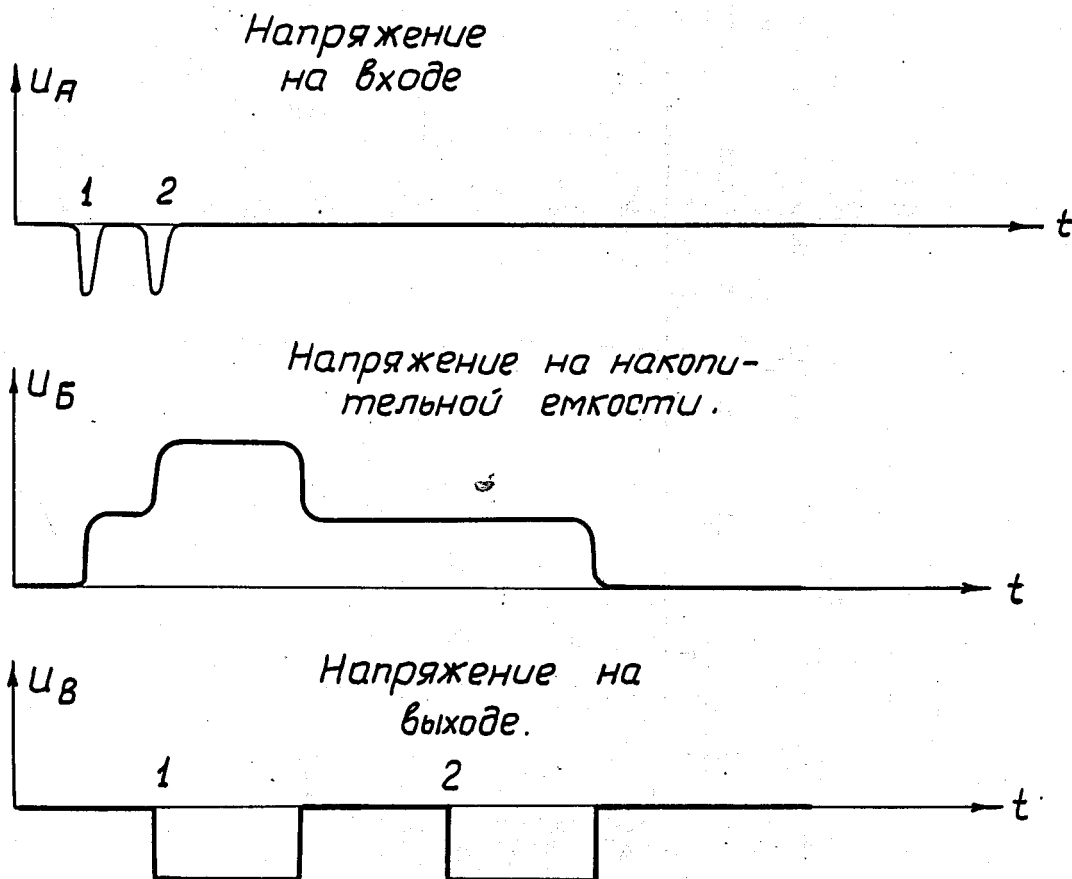


Рис. 25.

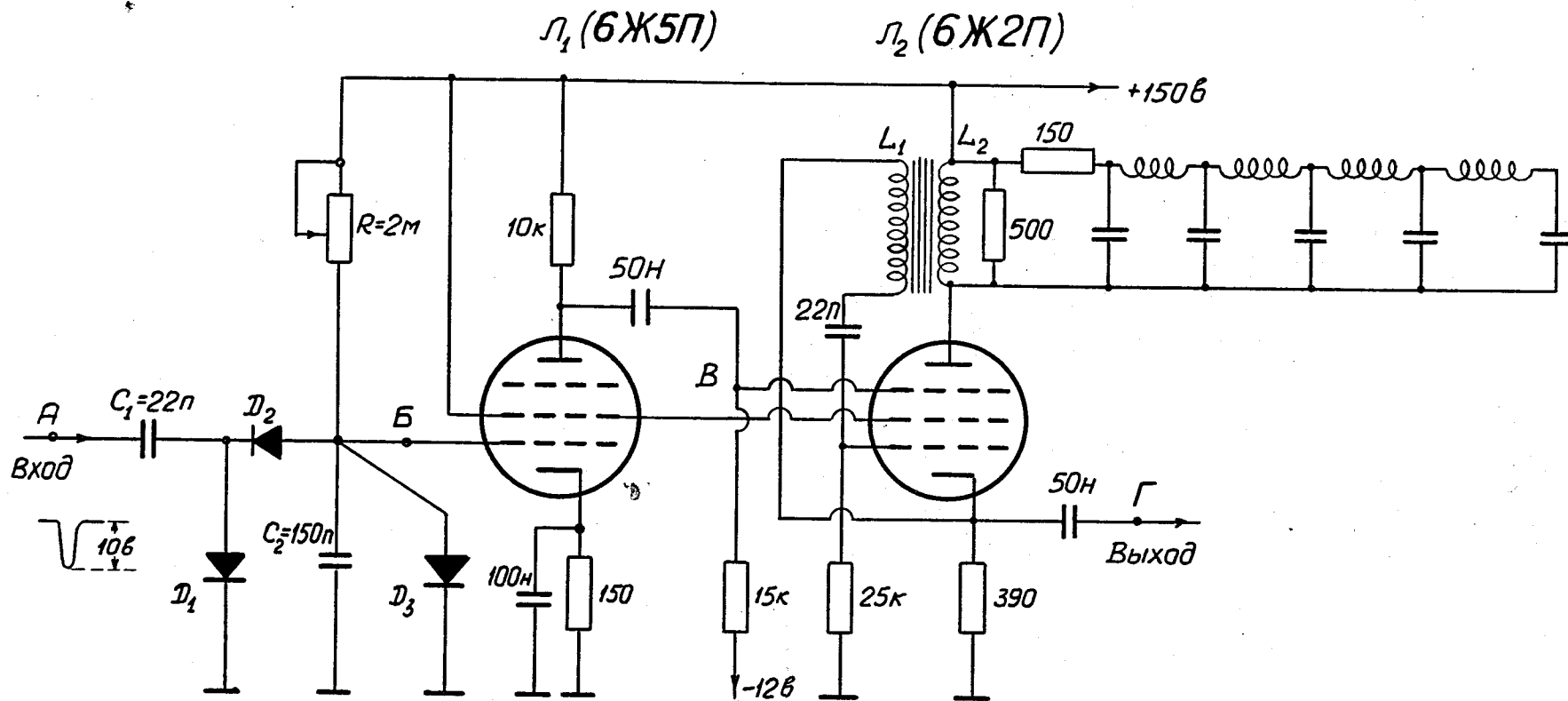


Рис. 26.

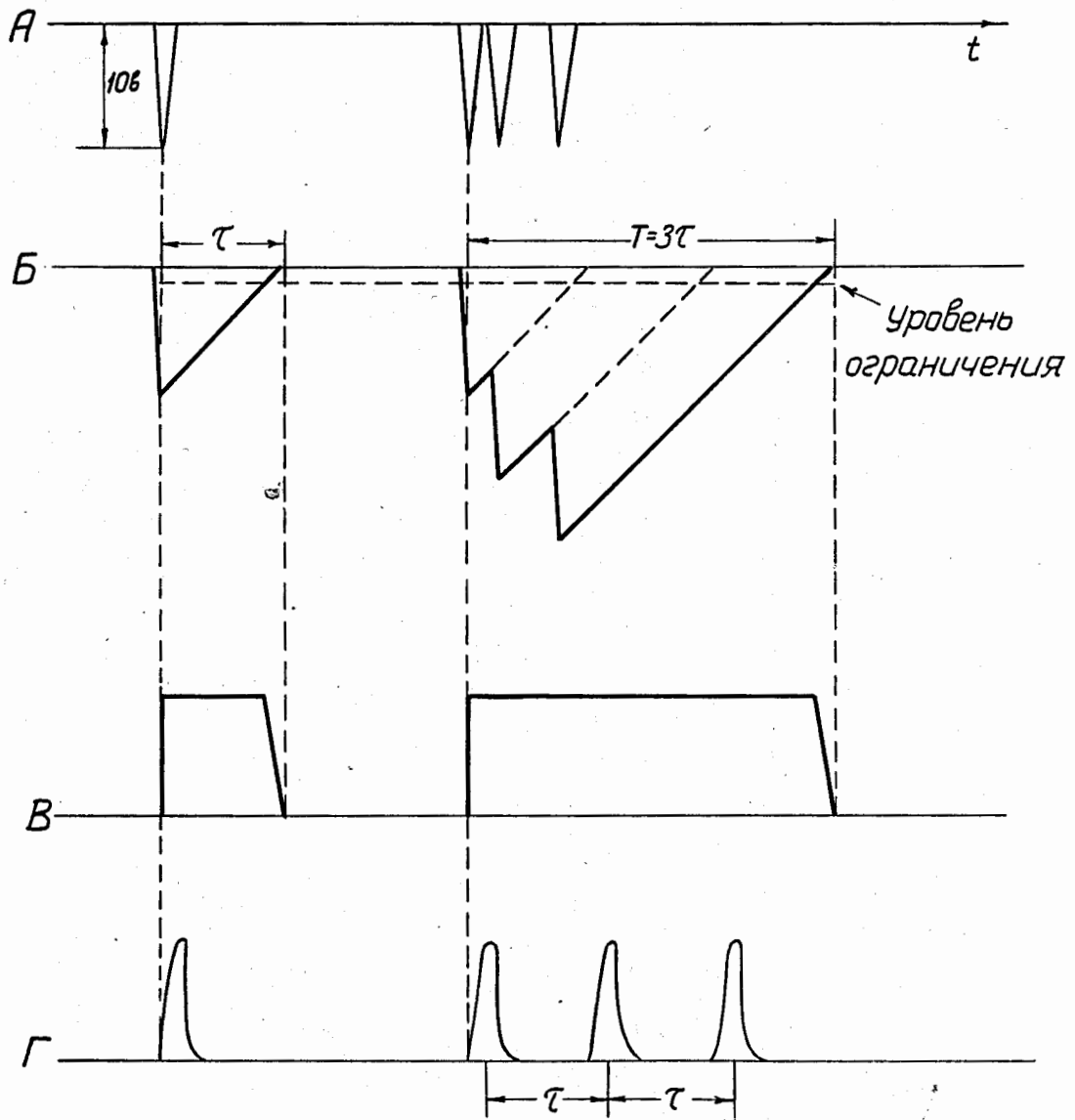


Рис. 27.

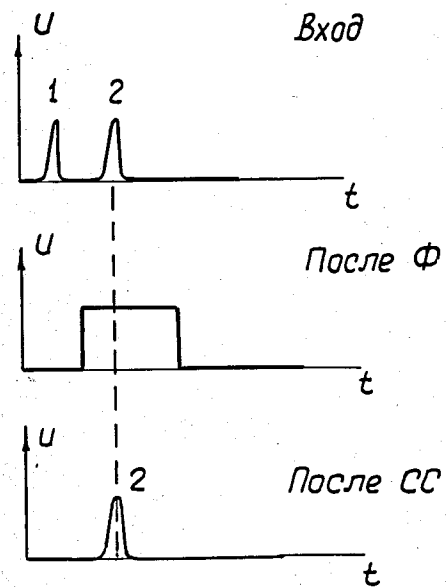
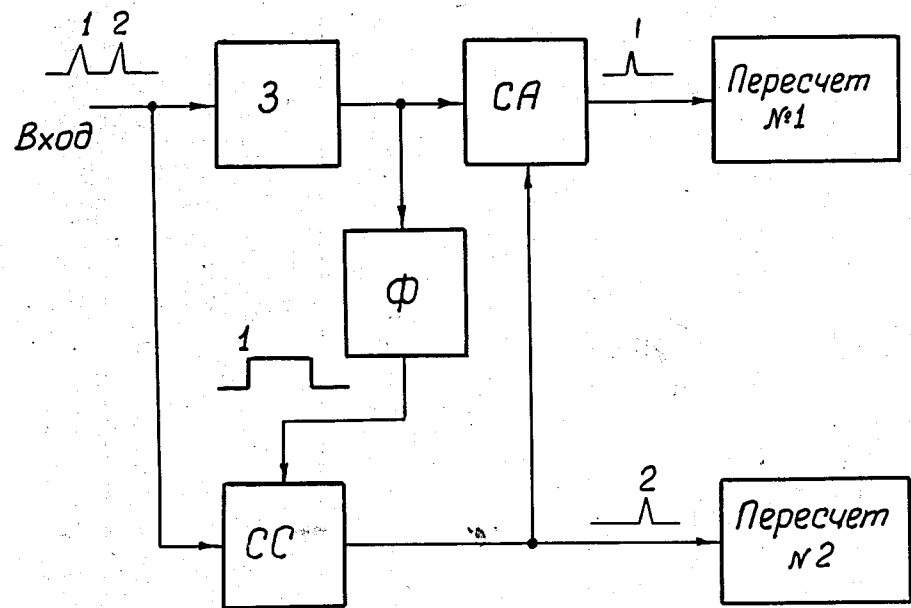


Рис. 28.

Л и т е р а т у р а

1. Eccles W.H., Jordan F.W., Radio Rev. 1, No. 3, 143 (1919).
2. Z. Bay, N.T. Grisamore, High Speed Flip-Flops for the Millimicrosecond Region. IRE Trans. EC-5 121 (1956).
3. V. Fitch, A High Resolution Scale-of-Four. Rev. Sci. Instr. 20, 942 (1949).
4. U. Pellegrini, B. Rispoli, Deux appareils démultiplicateurs d'impulsions a pouvoir resolutif eleve. 'Colloque International 'Electronique Nucleaire' Paris. Sept. 1958. p. 217.
5. M. Nakamura, Forty-Megacycle Scaler. Rev. Sci Instr. 28, 1015 (1957).
6. F.A.Muller, A. Fast Scaling Stage. Nucl. Instr. 4, 115 (1959).
7. Sessler W.M., Masket A.V., High Speed Electronic Scaler. Rev. Sci. Instr. 21, 494 (1950).
8. Генерирование электрических колебаний специальной формы /пер.с английско-го/. Изд. "Советское Радио", М.1951, т.11, стр.228.
9. H.K. Schoenwetter, Improved Fast Scaler. Rev. Sci. Instr. 24, 515 (1953).
10. E. Gatti, Review of Some Recent Contributions to Pulse Techniques in the Field of Classical Nuclear Electronics. Colloque International 'Electronique Nucleaire'. Paris, Sept. 1958. p. 273.
11. G.W. Hutchinson, W.H. Wells, D.H. White. Fast Scaling Circuits. Nucl. Instr. 4, 228 (1959).
12. B. Collinge, G.B. Huxtable. 20 Mc/s Scaling Circuit. Nucl. Instr. 3, 116 (1958).
13. J. Fisher, J. Marshall, A Ten Millimicrosecond Scaler. Proc. Natl. Electr. Conf. 9, 491 (1953).
14. W.E. Hostetler, H.J. Wolkstein, Low-Power Binary Counter. Tele-Tech and Electronic Ind. 15, No. 7, 48 (1956).
15. E. Baldinger, P. Santschi, P. Wehrli., High Speed Transistorized Scale-of-Two. Nucl. Instr. 4, 117 (1959).
16. M. Gettner, W. Selowe. 50-Mc Discriminator-Scaler. Rev. Sci. Instr. 30 942 (1959).
17. Л.А.Острепов, Г.Д.Латышев, В.Д.Леонов, Н.М.Ширшов. Быстродействующая пересчетная схема, ПТЭ, № 2, 72 (1956).
18. N.F. Moody, W.D. Howell, W.J. Battell, R.H. Taplin. A Comprehensive Counting System for Nuclear Physics Research. Rev. Sci. Instr. 22, 439 (1951).
19. R.G. Nordquist, Testing High Speed Digital Computer Circuits. Electronics 32, No 29, 50 (1959).
20. А.М.Бонч-Бруевич. Применение электронных ламп в экспериментальной физике; ГИТТЛ, М, 1955 стр. 510.
21. Н.Я.Матюхин, А.Б.Залкинд, Л.В.Иванов. Десятичные счетчики на кристаллических триодах, Сб."Полупроводниковые приборы и их применение" под ред. Я.А.Федотова, вып. 1, Изд. "Советское Радио", М. 1956, стр. 577.
22. Kemp. E.L., Gated Decade Counter Requires no Feedback. Electronics 26, No. 2, 145 (1953).
23. Wahl R., Journal de Physique et le Radium. 13, 670 (1952).
24. D.E. Cottrell, Binary- Decimal Counter Operates at 10 Mc. Electronics 30, No. 11, 186 (1957).
25. Ф.Я.Галкин, М.Н.Иванов. Десятичные пересчетные схемы /декады/. Известия ВУЗ'ов "Приборостроение", 2, № 4 91 /1959/.
26. В.Г.Зинов. Улучшение декадного пересчета на двоичных ячейках. ПТЭ, № 3, 135 /1959/.

27. Nelson E.C., Binary Coded Flip-Flop Counter.
Амер. патент. РЖ Электротехника № 24 /1959/, реф. 50249 П.
28. H. Beckwith, Flip-Flop Counter has Expanded Range. Electronics 28, No. 1, 149 (1955).
29. A.F. Fishmann, Difference Counters. Electronic Eng. 29, 546 (1957).
30. W. Gruhle., Schneller Ringzahler als elektronischer Schalter. Nucl. Instr. 3, 204 (1958).
31. И.Льюис, Ф.Уэлс. Миллимикросекундная импульсная техника /пер. с английского/ ИЛ Москва 1956, стр. 286.
32. R.L. Favre, Démultiplicateurs électroniques d'impulsions. Nucl. Instr. 1, 201 (1957).
33. R.E. Bell, The Resolver, a Circuit for Reducing the Counting Losses of a Scaler. Canad. J. Phys. 34, 563 (1956).
34. А.Е.Воронков, Л.Н.Кораблев, Н.Д.Мурин, Н.В.Штраних. Быстродействующий многоканальный амплитудный анализатор.
Изд.филиала ВИНТИ тема 41, Москва 1957, стр. 39.
35. G.W. Hutchinson, A Soft Valve Scaler for Intermittent Fast Counting. J. Sci. Instr. 34, 109 (1957)
36. R.L. Favre, Démultiplicateurs électroniques d'impulsions. Nucl. Instr. 1, 133 (1957).
R.L. Favre, Dispositif de réduction du temps de résolution des démultiplicateurs électroniques d'impulsion. Helv. Phys. Acta 27, 683 (1954).
37. В.Г.Зинов, С.В.Медведь. Схема для уменьшения числа пересчетов в пересчетных устройствах /в печати/.
38. Ю.К.Акимов. Регистрация просчетов в пересчетных схемах. ПТЭ, № 2, 113 (1959)