

15
Б-95

18.10.8
✓



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Ю.А. Бычков, Вя Чуи Бон, Е. Кац

1377

**О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА
"ВРЕМЕННОГО НОНИУСА"
ДЛЯ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ
БОЛЬШИХ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ**

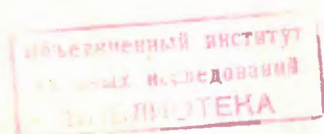
Дубна 1983

Ю.А. Бычков, Ви Чун Вон, Е. Кац

1377

2085/3 чф.

О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА
"ВРЕМЕННОГО НОНИУСА"
ДЛЯ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ
БОЛЬШИХ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ



Дубна 1963

В настоящее время импульсная электроника располагает значительным количеством методов для измерения временных интервалов ^{1,2/х/}. Однако если ограничить рассмотрение методов измерения диапазоном временных интервалов от 10^{-8} сек и выше, то почти все их можно объединить в две большие группы: 1/ осциллографические методы и 2/ методы измерительного счетчика.

Не описывая подробно осциллографический метод, можно отметить, что основными его недостатками являются: 1/ ограниченность диапазона измеряемых интервалов времени; 2/ неудобства при измерении интервалов времени между случайными импульсами, связанные с применением фотографирования или специальных "запоминающих" электронно-лучевых трубок; 3/ невозможность точного измерения больших временных интервалов при случайных процессах, когда измеряемый интервал не укладывается на развертке. В основном осциллографические методы применяются для измерения временных интервалов между периодическими импульсами. Промышленностью серийно выпускается ряд осциллографических приборов для измерения временных интервалов /ИВ-13М, ИВ-22 и др/.

Метод измерительного счетчика заключается в том, что импульс начала измеряемого интервала запускает генератор импульсов эталонной частоты, которые поступают в счетчик импульсов, а импульс конца измеряемого интервала прекращает счет и срывает колебания генератора эталонной частоты. Этот метод можно назвать методом прямого счета. Недостатком его является то, что точность его непосредственно ограничивается скоростью счета первых ячеек измерительного счетчика.

В настоящей статье рассматривается применение другого метода, так называемого метода "временного нониуса", который позволяет при ограниченной скорости счета счетных ячеек получить точность измерения большую, чем в методе прямого счета.

1. Метод "временного нониуса"

Метод "временного нониуса" аналогичен методу измерения линейных отрезков или дуг с применением нониусной шкалы, например с помощью штангенциркуля. Этот метод, еще известный под названием метода "счетного нониуса", был предложен относительно давно и применялся различными авторами для измерения временных интервалов ^{3-6,13/}.

Сущность метода "временного нониуса" заключается в следующем /рис. 1/. Импульс начала измеряемого интервала времени t_0 /импульс I/ запускает основной генератор Γ_0 с эталонным периодом T_0 , импульсы от которого считаются счетчиком "Грубо"; импульс конца измеряемого интервала времени /импульс II / запускает нониусный

^{х/} В дальнейшем изложении под "временным интервалом" будем понимать время между следующими друг за другом периодическими или случайными электрическими импульсами.

генератор Гн с периодом Тн, близким к периоду Т0, импульсы от которого поступают в нониусный счетчик "Точно". Первым импульсом СИ-1 нониусного генератора /или непосредственно импульсом П / прекращается счет основного счетчика "Грубо". Одновременно с этим импульсы от обоих генераторов с периодом Т0 и Тн поступают на схему совпадений СС, которая фиксирует первое совпадение. Импульс совпадения СИ-2 прекращает счет нониусного счетчика "Точно", и схема возвращается в исходное состояние. Хотя метод в принципе несложен, однако в имеющейся литературе он проанализирован недостаточно полно. Так, в работе /13/, являющейся наиболее фундаментальной в этой области, дается математический анализ процесса совпадения во временном нониусе в предположении, что форма импульсов совпадения близка к синусоидальной. Поэтому представляет интерес проведение обобщенного анализа метода "временного нониуса".

Соотношения параметров для метода "временного нониуса" могут быть выведены из рисунка 2. Из него следуют два случая:

$$\begin{aligned} n T_0 &= T'_H + \Delta t & /1/ \\ n T_0 &= T''_H - \Delta t & /2/ \end{aligned}$$

В общем виде

$$n T_0 = T_H \pm \Delta t & /3/$$

Здесь

n - целое число; T_0 - период колебаний основного генератора, являющийся ценой деления шкалы счетчика "Грубо"; Δt - цена деления шкалы "временного нониуса" /счетчика "Точно"/; T_H - период колебания нониусного генератора Гн. Из того же рисунка следует, что число N периодов T_H до первого совпадения при одновременном запуске обоих генераторов будет

$$N = \frac{T_0}{\Delta t} & /4/$$

В обоих случаях /1/, /2/ измеряемый интервал времени t_u определяется как сумма двух величин t_0 и t_H /рис. 3а,б/, т.е.

$$t_u = t_0 + t_H & /5/$$

Из рисунка 3 очевидно, что

$$t_0 = (M - 1) T_0 & /6/$$

где M - показание основного счетчика "Грубо".

Для определения значения t_H в /5/ рассмотрим два случая.

1 -й случай: $n T_0 = T_H + \Delta t$

Из рисунка 3а следует, что после запуска нониусного генератора расстояние между его импульсами и соответствующими импульсами основного генератора постоянно сокращается, вплоть до совпадения, затем это расстояние опять увеличивается по закону "бегения" двух частот. Обозначим текущее значение этого временного интервала t_m .

Тогда можно написать:

$$\begin{aligned} t_1 &= t_H, \\ t_2 &= t_H - \Delta t, \\ t_3 &= t_H - 2\Delta t, \\ \dots & \dots \\ t_m &= t_H - (m-1)\Delta t. \end{aligned}$$

При совпадении $t_m = 0$ и $t_H = (m-1)\Delta t$, /8/

где m - число импульсов нониусного генератора до первого совпадения, отсчитанное по шкале счетчика "Точно". Подставив в /5/ выражение /8/ и /8/, получим:

$$t_u = M T_0 + m \Delta t - (T_0 + \Delta t) & /9/$$

2 -й случай: $n T_0 = T_H - \Delta t$

Аналогично 1-му случаю можно показать /рис. 3б/, что

$$t_H = T_0 - (m-1)\Delta t & /10/$$

и измеряемый интервал времени будет

$$t_u = M T_0 - m \Delta t + \Delta t & /11/$$

Как видно из /9/ и /11/, отсчет измеряемого временного интервала по этим формулам неудобен из-за наличия постоянных, не зависящих от показания M и m , членов $(T_0 + \Delta t)$ и Δt , соответственно. Самым простым способом для исключения этих членов является введение постоянной линии задержки в тот или иной тракт / r'_3 или r''_3 на рисунке 1/, по которому проходит импульс начала или конца измеряемого интервала времени t_u . Место ввода задержки не зависит от того, вводим ли мы задержку до или после генераторов Γ_0 и Γ_H . Важно то, что импульсы должны задерживаться относительно друг друга до входа в схемы счетчиков и совпадений. Вопрос о том, в какой тракт ввести задержку относительно другого, зависит от рассматриваемого случая: в случае $n T_0 = T_H + \Delta t$ необходимо ввести задержку r'_3 , равную $T_0 + \Delta t$, в тракт импульса начала измеряемого интервала времени; в случае $n T_0 = T_H - \Delta t$ задержку r''_3 , равную Δt , необходимо ввести в тракт импульса конца измеряемого интервала времени. Таким образом, в обоих случаях после ввода задержки получим окончательные выражения для измеряемого временного интервала:

$$t_u = M T_0 + m \Delta t & /12/$$

$$t_u = M T_0 - m \Delta t & /13/$$

Из сказанного очевидно, что для уменьшения ошибки отсчета передний фронт стоп-импульса СИ-1 /рис. 1/ должен быть гораздо меньше Δt , что не всегда легко осуществить, особенно когда Δt мало. Эту трудность можно исключить, если импульс СИ-1 брать с выхода схемы совпадения СС, т.е. построить схему так, чтобы счет счетчиков "Грубо" и "Точно" прекращался одновременно. Тогда достаточно, чтобы передний фронт СИ-1 был меньше периода T_0 или T_H . В этом случае измеряемый интервал времени t_u будет /рис. 3а,б/ выражен:

$$t_u = (Q - 1) T_0 - (m - 1) T_H & /14/$$

где Q - полное показание счетчика "Грубо", сосчитанное до момента совпадения между импульсами основного и нониусного генераторов.

Подставим в /14/ значение общего случая: $n T_0 = T_H \pm \Delta t$. Тогда

$$t_u = (Q - m + n - 1) T_0 \pm (m - 1) \Delta t. \quad /15/$$

В частности, при $n = 1$:

$$t_u = (Q - m) T_0 \pm (m - 1) \Delta t. \quad /16/$$

Условием совпадения импульсов основного и нониусного генераторов является

$$\frac{\Delta t}{2} < \tau_u < \Delta t, \quad /17/$$

где τ_u - длительность импульсов совпадения. В случае, если $\tau_u < \frac{\Delta t}{2}$, вообще не произойдет совпадения в диапазоне от 1 до m периодов T_H , а в случае $\tau_u > \Delta t$ произойдет ложное преждевременное совпадение их. Как в том, так и в другом случае, это приведет к погрешности измерения больше Δt .

Параметры схемы "временного нониуса" выбираются по выражениям /3/ и /4/.

Для облегчения условий работы счетчика "Точно" лучше брать число n от 1 до нескольких целых единиц, а N в формуле $\Delta t = \frac{T_0}{N}$ должно быть таким, чтобы цена деления шкалы "Точно" Δt была удобна для отсчета.

Рассмотренный выше вариант метода "временного нониуса" предполагает наличие генератора ударного возбуждения Γ_0 . Это вызывает большие трудности при использовании кварца для стабилизации частоты. Для исключения этого недостатка может быть применена трехсчетчиковая система измерения временных интервалов на базе использования метода "временного нониуса" /13/. Блок-схема этой системы показана на рисунке 4а, а временная диаграмма - на рисунке 4б. Основной генератор работает в режиме непрерывных колебаний с периодом T_0 . Первый нониусный генератор Γ_{H1} запускается импульсом начала измеряемого интервала времени /импульс I на рисунке 4б/, подаваемым на ВХ1. Сформированные импульсы от генератора Γ_{H1} с периодом T_{H1} поступают одновременно в ключ, счетчик "Точно I" и схему совпадения СС1. Счетчик "Точно I" продолжает считать импульсы от Γ_{H1} до тех пор, пока схема совпадения СС1 не выдаст стоп-импульс. Импульс конца измеряемого интервала /импульс II на рисунке 4б/ поступает на ВХ II и запускает второй нониусный генератор Γ_{H2} . Дальнейшая работа схемы происходит аналогично изложенному ранее по рисунку 1.

Таким образом, назначение дополнительного нониусного генератора Γ_{H2} и счетчика "Точно I" заключается в том, чтобы сфазировать импульс начала измеряемого временного интервала с импульсами основного генератора эталонной частоты Γ_0 .

Временная диаграмма /рис. 4б/ составлена для случая, когда

$$n T_0 = T_H + \Delta t \text{ при } T_{H1} = T_{H2} = T_H \text{ и } n = 1.$$

Из рисунка 4б

$$t_u = t_{H1} + t_0 + t_{H2} \quad /18/$$

Так как

$$\left. \begin{aligned} t_{H1} &= T_0 - (S - 1) \Delta t, \\ t_0 &= (M - 1) T_0, \\ t_{H2} &= (m - 1) \Delta t; \end{aligned} \right\}$$

где S - показание счетчика "Точно I", M и m - показания счетчиков "Грубо" и "Точно II", соответственно, то

$$t_u = M T_0 + (m - S) \Delta t. \quad /20/$$

Если в этой системе /рис. 4а/ стоп-импульс для остановки счетчика "Грубо" брать с выхода схемы совпадения СС2, то из диаграммы /рис. 4б/ очевидно, что

$$t_u = (Q - 1) T_0 + t_{H1} - (m - 1) T_{H2}. \quad /21/$$

Подставив в /21/ значение t_{H1} из /18/ и учитывая, что $T_{H2} = n T_0 - \Delta t$ при $n = 1$, получим:

$$t_u = (Q - m + 1) T_0 + (m - S) \Delta t, \quad /22/$$

где Q - полное показание счетчика "Грубо". Нетрудно показать, что в случае $n T_0 = T_H - \Delta t$ при $T_{H1} = T_{H2} = T_H$ и $n = 1$ выражения в /20/ и /22/ будут соответственно

$$t_u = M T_0 + (S - m) \Delta t, \quad /23/$$

$$t_u = (Q - m + 1) T_0 + (S - m) \Delta t. \quad /24/$$

Погрешности при измерении методом "временного нониуса" определяются следующими факторами: а/ основной погрешностью, равной $\pm \Delta t$; б/ нестабильностью и неточностью частот эталонного и нониусного генераторов; в/ непостоянством порогов срабатывания схем и неточностью задержки, вводимой в систему; г/ конечной величиной и разбросом длительности фронтов импульсов; д/ разрешающей способностью схем совпадения. При нормальной работе измерительного прибора сумма погрешностей должна быть меньше или, в крайнем случае, равна цене деления Δt нониусного счетчика.

2. Экспериментальная часть

На основании вышеизложенного метода был разработан и изготовлен рабочий макет прибора для измерения временных интервалов в диапазоне от 5 до 1024 мксек. Параметры схемы следующие: $T_0 = 10^{-6}$ сек, $n = 1$, $N = 10$, и соответственно $\Delta t = 10^{-7}$ сек, $T_H = 9 \cdot 10^{-7}$ сек.

Блок-схема и принципиальная схема прибора показаны на рисунке 5 и на рисунках 6а, б, в. После нажатия кнопок в порядке: "Сброс" К3, "Сброс" К2 и "Пуск" К1 - открыты ключи КЛ1-1, КЛ1-2, КЛ11-2, а ключ КЛ11-1 заперт. В таком положении схема будет оставаться до тех пор, пока не поступит импульс начала измеряемого интервала времени на ВХ1.

Импульс со входа ВХ1 /рис. 5/ поступает на ограничитель-инвертор ОИИ /Триоды T_4 и T_2 на рисунке 6а/ и через переключатель полярности входных импульсов ПК1 отпертый ключ КЛ1-1 / T_3 / запускает схему задержки СЗ1 / T_5 , T_6 , T_7 /.

Схема задержки СЗ1 вырабатывает отрицательный импульс длительностью около $3 \cdot 10^{-8}$ сек с крутыми фронтами. Этот импульс подается на дифференцирующую цепочку $R_1 C_1$. Отрицательный импульс на выходе цепочки, соответствующий переднему фронту выходного сигнала СЗ1, усиливается усилителем У1-1 / T_7, T_8 / и подается на блокинг-генератор БГ1 / T_{23} /. Положительный импульс, соответствующий заднему фронту выходного импульса СЗ1, подается на триггер управления ТУ2, и ключ КЛ1-1 запирается, а КЛ1-1 отпирается, подготовив таким образом схему к приему импульса конца измеряемого интервала времени. Стандартный по форме и по амплитуде сигнал на выходе БГ1 через эмиттерный повторитель (T_{24}) запускает основной генератор ударного возбуждения эталонной частоты с кварцевой стабилизацией ГУВ1 (T_{25}) на частоте $f_0 = 1$ мГц ± 50 Гц. Синусоидальные затухающие колебания от этого генератора в дальнейшем усиливаются усилителем У1-2 (T_{26}, T_{27}, T_{28}) и формируются схемой ФС1 (T_{29}, T_{30}), с выхода которой снимаются импульсы с длительностью $\sim 75 \cdot 10^{-8}$ сек с фронтом 10^{-8} сек по условию /17/. Эти импульсы запускают счетчик "Грубо" через отпертую схему быстрого ключа КЛ1-2 (T_{34}). Импульсы, запускающие счетчик "Грубо", параллельно подаются на один из входов схемы совпадений СС /диоды Д2Б в базе T_{31} /.

Счетчик "Грубо" /рис. 7/ состоит из 10 бинарных ячеек с общим коэффициентом пересчета 1024. Ячейки двух типов - быстрые /I/ и медленные /II/. Быстрая ячейка /I/ способна считать импульсы со скоростью до $5 \cdot 10^6$ имп/сек. Счетчик "Грубо" будет считать до тех пор, пока не поступит импульс конца измеряемого интервала времени на вход ВХ II /рис. 5а/. Последний импульс через ограничитель - инвертор ОИИ1 (T_9, T_{10}), отпертый ключ КЛ1-1 (T_{11}), запускает схему задержки СЗ11 (T_{12}, T_{13}, T_{14}). Блок СЗ11 вырабатывает импульс, аналогичный импульсу на выходе блока СЗ1. Этот импульс подается на дифференцирующую цепочку $R_2 C_2$. Отрицательный импульс на выходе цепочки, соответствующий переднему фронту выходного импульса СЗ11, усиливается усилителем У1-1 (T_{15}) и подается на триггер управления ТУ3 (T_{35}, T_{37}). Последний в свою очередь запускает LC-генератор ударного возбуждения /12/ ГУВ11 (T_{38}, T_{39}) с частотой $f_H = 1,11$ мГц ± 1100 Гц. Эта синусоида формируется в схеме ФС11 (T_{40}, T_{41}) и запускает через отпертый ключ КЛ1-2 /Диод Д1В, T_{45} / счетчик "Точно".

Положительный импульс на выходе цепочки $R_2 C_2$, соответствующий заднему фронту выходного сигнала СЗ11, подается на триггер управления ТУ1 (T_{19}, T_{20}) и запирает ключ КЛ1-1, блокируя дальнейшее прохождение импульсов.

Счетчик "Точно" собран из четырех двоичных пересчетных ячеек с неоновой индикацией /рис. 7/. Первый импульс от ГУВ11 через фазоинвертор /в блок-схеме не показан/ (T_{42}) и триггер управления ТУ4 (T_{32}, T_{33}) запирает ключ КЛ1-2 /диод Д1В и T_{34} /, и счетчик "Грубо" прекращает счет. Совпадение во времени импульсов от ГУВ1 и ГУВ11 фиксируется схемой совпадения СС, импульс от которой закрывает ключ КЛ1-2 /диод Д1В и T_{45} / и останавливает счетчик "Точно". На осциллограмме /рис. 8/ показаны серии импульсов генераторов ГУВ1 и ГУВ11, а также импульсы совпадения. Измеряемый интервал времени отсчитывается по суммарным показаниям счетчиков. На этом цикл измерения заканчивается, и нажатием кнопок сброса КЗ и К2 прибор

в целом возвращается в исходное состояние.

Измеритель обеспечивает точность $\pm 0,2$ мксек по всему диапазону при температуре, не превышающей $+38^\circ\text{C}$. Имеются два входа: ВХ1 и ВХ11 - для импульсов начала и конца измеряемого интервала времени, соответственно. В случае общего входа достаточно их соединить параллельно. Входные импульсы любой полярности, произвольной длительности в случае раздельного входа и не более 3 мксек - в случае общего. Крутизна переднего фронта входных импульсов - не менее $3 \cdot 10^8$ в/сек. Питание измерителя осуществляется от сети переменного тока 50 Гц, с напряжением $220 \text{ В} \pm 10\%$ /рис. 9/. Потребляемая мощность равна 24 ватт.

В ы в о д ы

1. На основании анализа метода "временного нониуса" получены расчетные соотношения для определения основных параметров измерительного счетчика.

2. Применение метода "временного нониуса" при измерении временных интервалов позволяет повысить точность измерения, по крайней мере, на порядок и выше без увеличения частоты счета пересчетных схем.

3. Повышение точности измерения происходит за счет улучшения разрешения схем совпадения импульсов основного и нониусного отсчетных генераторов. При существующем в настоящее время уровне техники схем совпадения /разрешение до $10^{-9} - 10^{-10}$ сек/ это не представляет серьезных затруднений.

4. Ввод задержек в соответствующие тракты позволяет сделать удобным отсчеты шкалам измерительных счетчиков.

5. Применение трехсчетчиковой системы исключает необходимость ударного возбуждения генератора эталонной частоты и позволяет перейти к генератору незатухающих колебаний с кварцевой стабилизацией. Это расширяет диапазон измеряемых интервалов времени и повышает точность измерения.

6. В макетном образце измерительного счетчика при измерении интервалов времени от 5 до 1024 мксек и скорости счета 10^8 имп/сек получена точность по всему диапазону $\pm 0,2$ мксек.

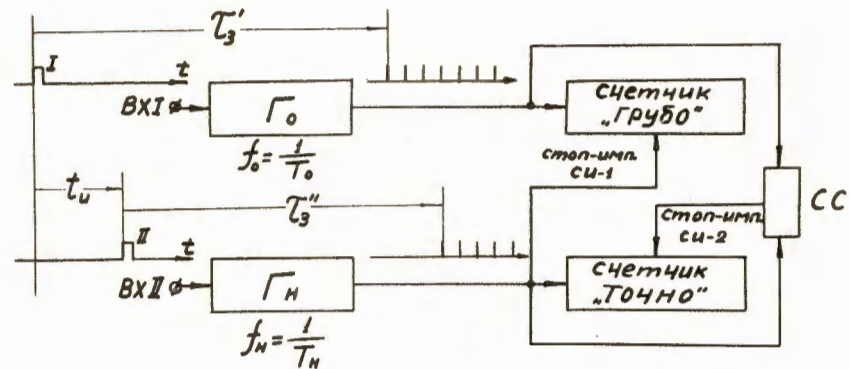
Л и т е р а т у р а

1. Ф. Термен, Дж. Петтит. Измерительная техника в электронике, перев. с англ. ИЛ, 1955.
2. Ламповые схемы для измерения времени, перев. с англ., т.1-2, "Советское радио", 1951.
3. Э.И. Гитис. Электрорадиоавтоматика. ГЭИ, 1959.
4. C. Cottini, E. Gatti. Nuovo Cimento, 4, 1550 (1956).
5. R.C. Chase, W.A. Higinbotham. Rev. Scient. Instruments, 28, 448 (1957).
6. А.А. Курашов и др. Атомная энергия, том 5, вып. 2 /1958/.
7. С.Д. Фанченко. ПТЭ, № 1 /1961/.

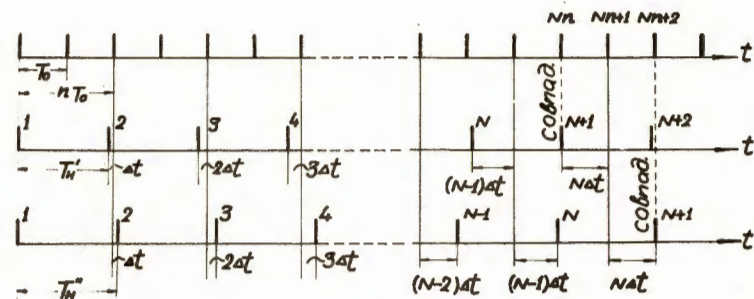
8. Генерирование электрических колебаний специальной формы. "Сов.радио", т.1, 1951.
 9. А.И. Пелых, А.В. Прокушкин. ПТЭ, № 4 /1961/.
 10. Д.П. Марковский. "Измерительная техника", № 6, 1961.
 11. Ю.М. Либин. ПТЭ, № 1, 1959.
 12. Г.И. Берестовский. "Радиотехника и электроника". Том 1V, вып. 6, стр. 1061 /1959/.
 13. R.G. Вагон. Proceedings of the IRE, 45, 21 (1957).
 14. А.Ф. Лиев. Схемы "преобразования" наносекундных интервалов времени /обзор/.

Препринт ОИЯИ 803, Дубна, 1961.

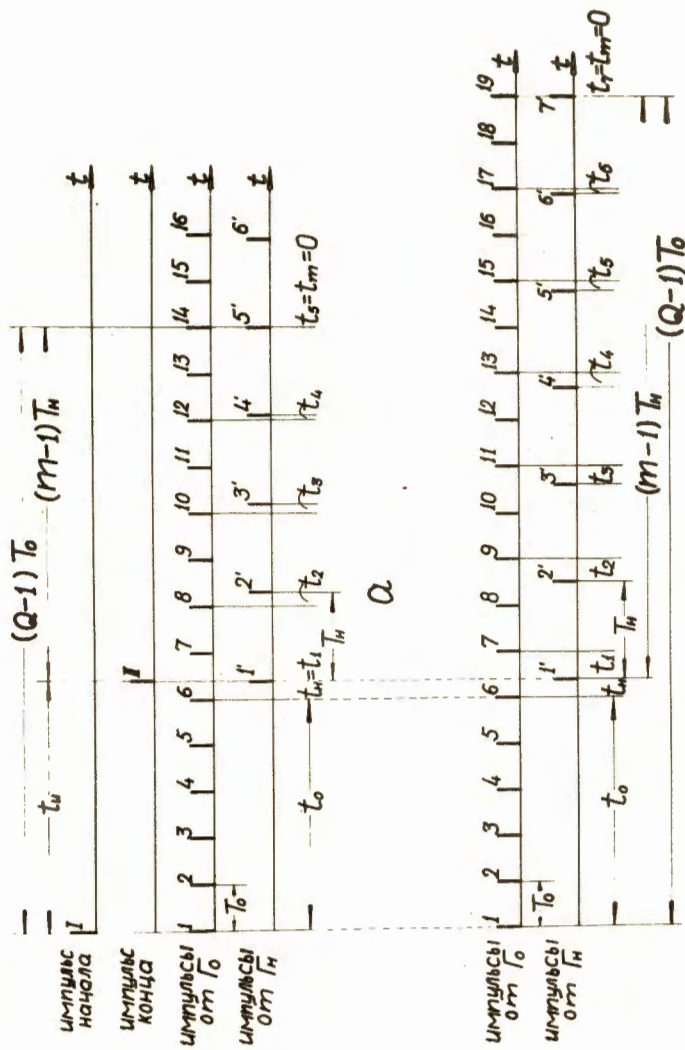
Рукопись поступила в издательский отдел
 28 июля 1963 г.



Р и с. 1. Блок-схема "временного гребня".



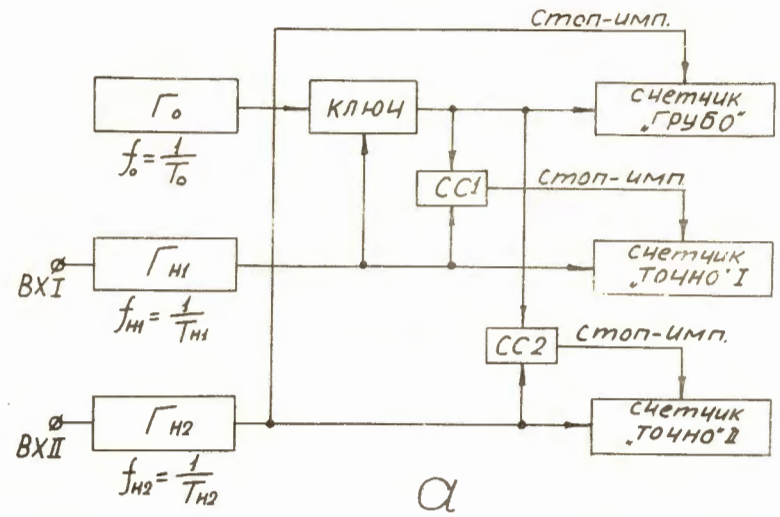
Р и с. 2. Диаграмма "временного гребня" при одновременном запуске генераторов Γ_0 и Γ_N .



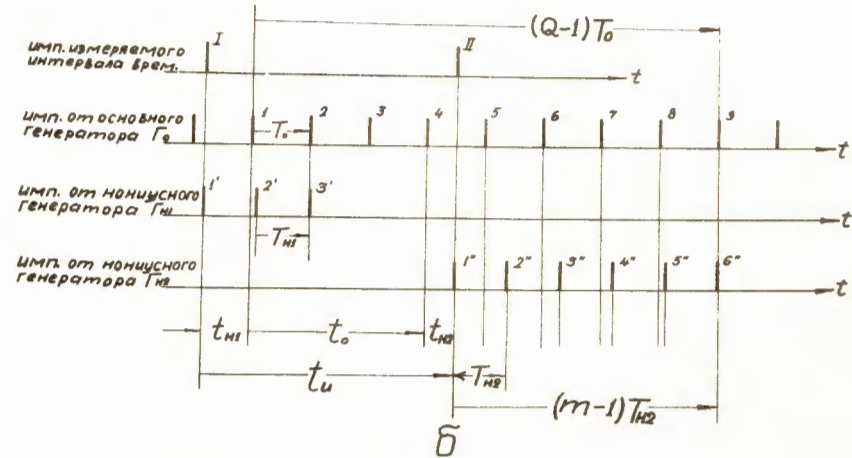
Р и с. 3. Диаграмма "временного нонууса":

а - в случае $nT_0 = T_H + \Delta t$;
 б - в случае $nT_0 = T_H - \Delta t$.

б



а



б

Р и с. 4. Блок-схема и диаграмма трехсчетчиковой системы измерения временного интервала.

Р и с. 5. Блок-схема измерителя временного интервала.

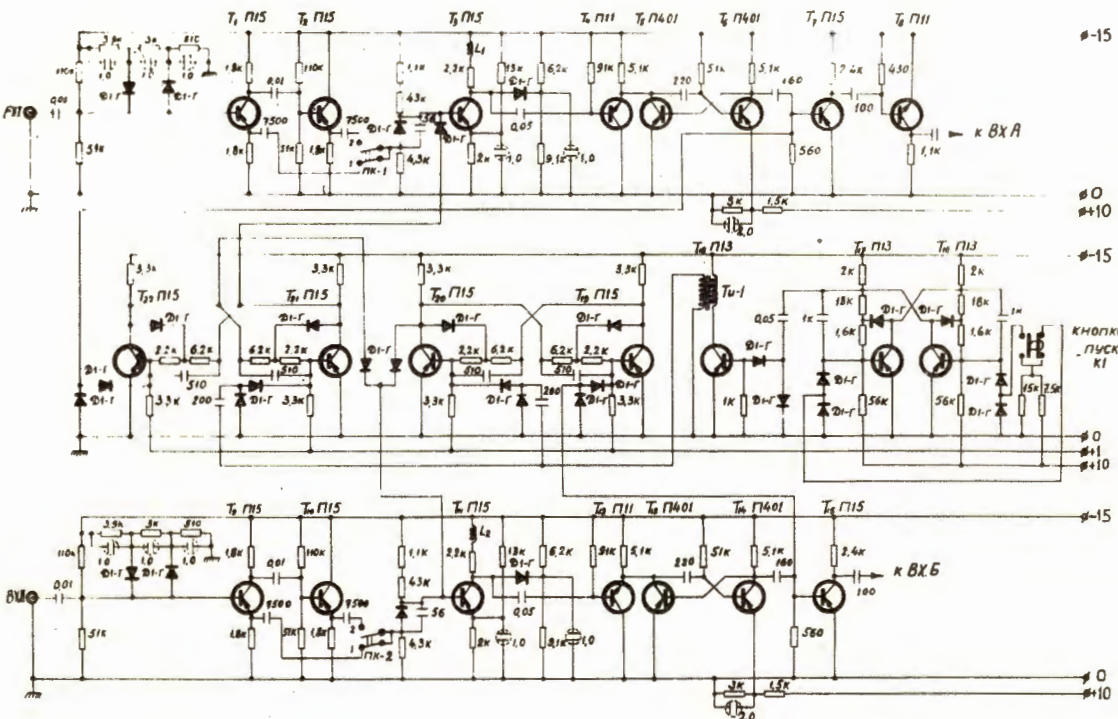
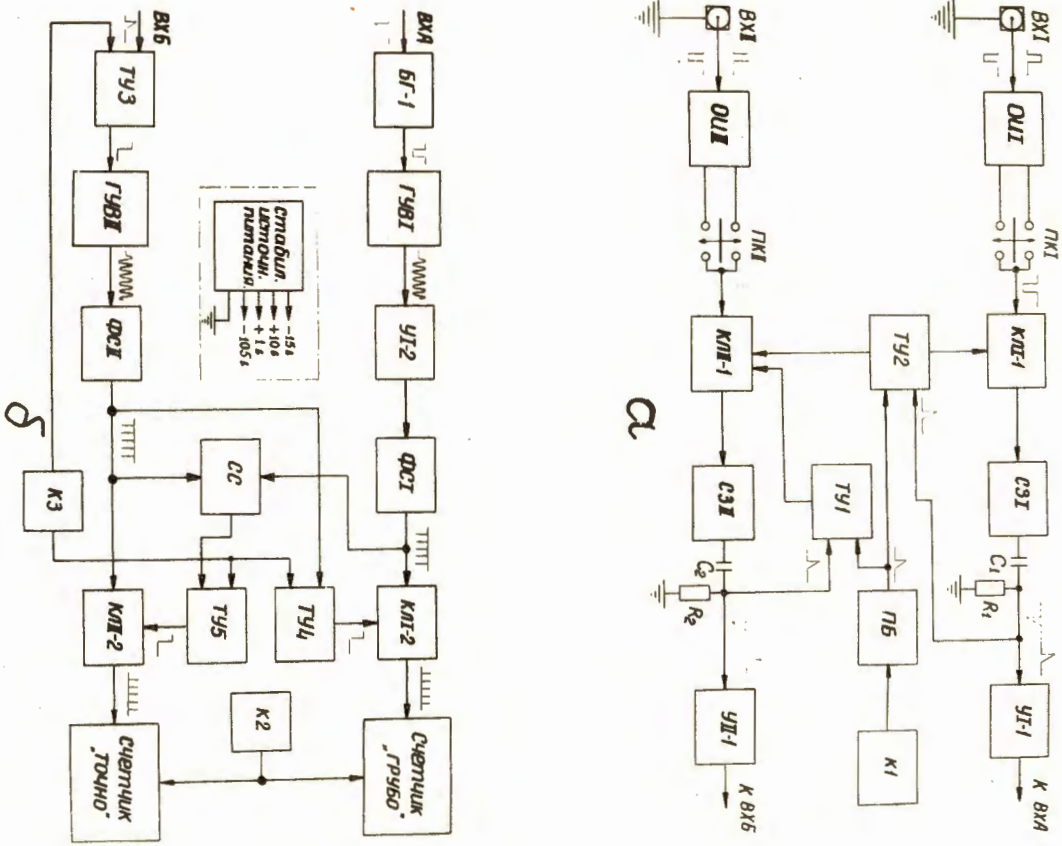


Рис. 6а. Принципиальная схема измерителя временного интервала

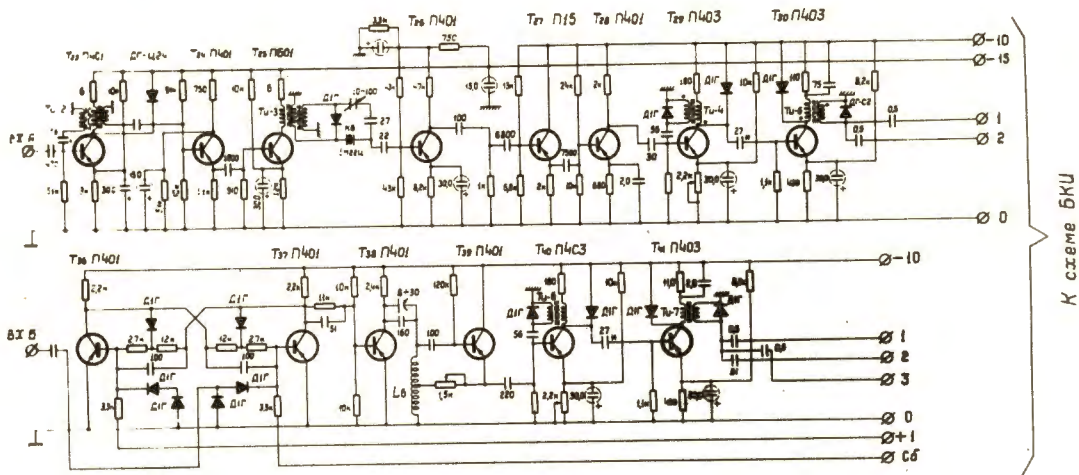


Рис. 86. Принципиальная схема измерителя временного интервала

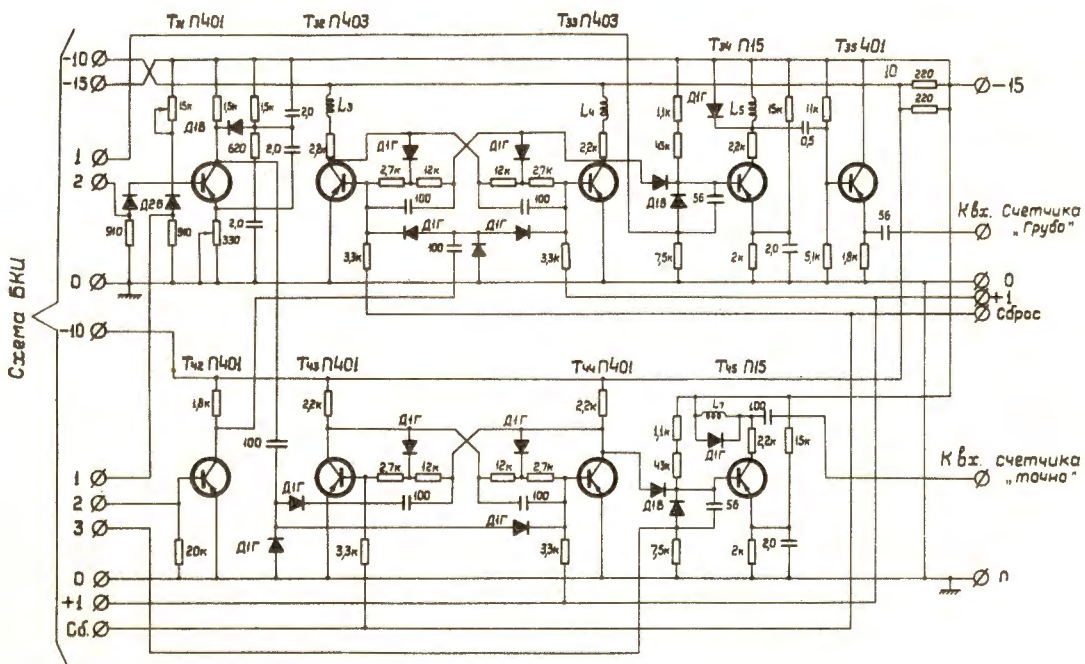
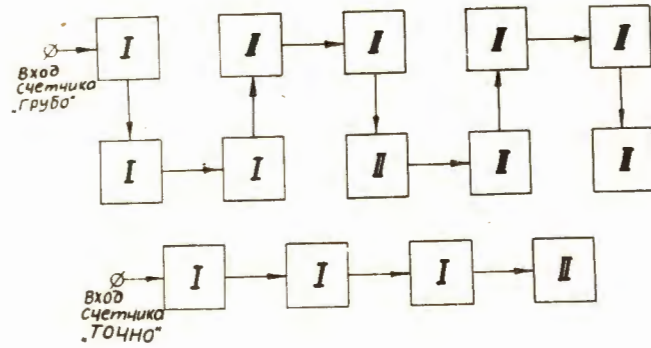
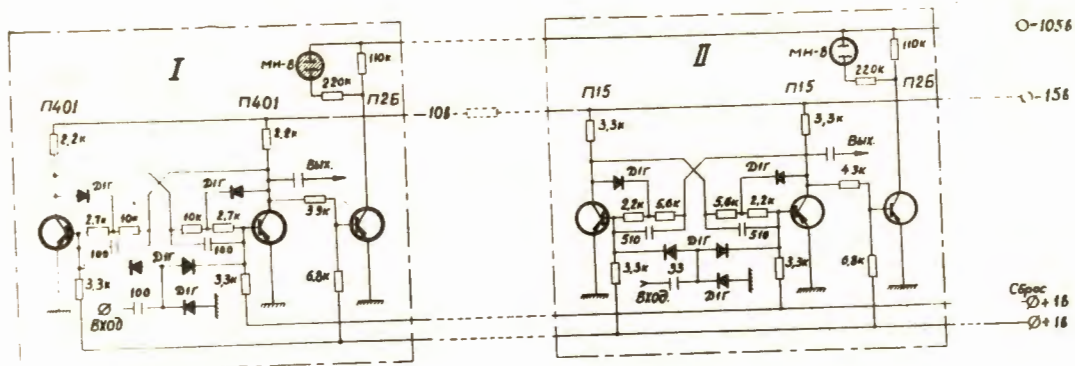
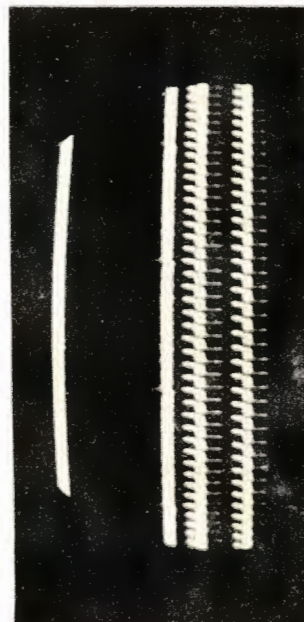


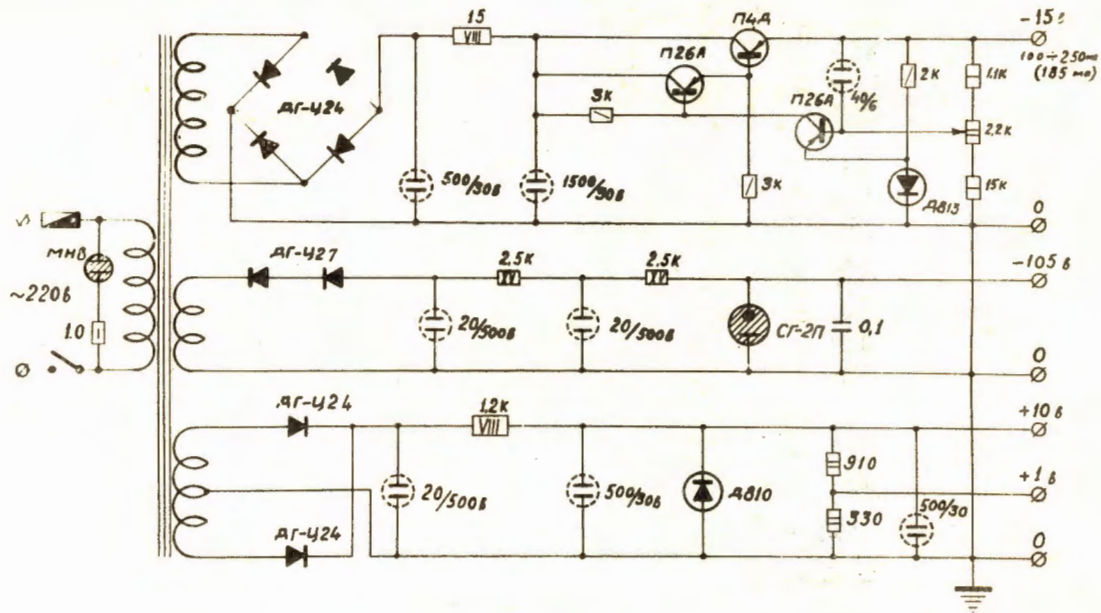
Рис. 86. Принципиальная схема измерителя временного интервала



Р и с. 7. Принципиальная схема и блок-схема счетчиков.

Р и с. 8. Осциллограмма "временного люксов",





Р и с. 9. Принципиальная схема источника питания.