

## МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ЧАСЫ

Н. Г. Басов, И. Д. Мурин, А. П. Петров, А. М. Прохоров,  
И. В. Штраних

Дано краткое описание принципиальной схемы разработанных в фиане молекулярных часов, использующих молекулярный генератор на пучке молекул аммиака.

В Физическом институте имени П. Н. Лебедева была разработана теория и создан действующий макет молекулярного генератора, работающего на линии  $J=3, K=3$  пучка молекул  $\text{NH}_3$  (частота  $\sim 23870$  мГц) [1, 2]. В настоящее время показано [3], что за время  $\sim 20$  мин относительная стабильность частоты двух генераторов имеет порядок  $10^{-11}$ . Теоретическое рассмотрение [1, 2] и предварительные эксперименты показывают, что частота молекулярного генератора может быть настроена на частоту спектральной линии с точностью в  $10^{-20}$  гц, т. е. молекулярный генератор может служить абсолютным эталоном частоты (времени) с точностью порядка  $10^{-9}$ .

В настоящее время в двух лабораториях института (Лаборатории колебаний и Лаборатории атомного ядра) заканчивается работа по созданию часов на основе молекулярного генератора.

Разрабатываемый прибор позволит:

1. Измерять частоты в диапазоне  $10^4 \div 10^7$  гц с точностью до  $10^{-9}$  за время менее 100 сек. При измерении частот ниже  $10^4$  гц с точностью  $10^{-9}$  время измерения должно быть увеличено.

2. Измерять интервалы времени с точностью  $2 \cdot 10^{-7}$  сек.

3. Служить источником излучения частоты  $5 \cdot 10^5$  гц и кратных ей частот с абсолютной стабильностью  $10^{-9}$ .

Ввиду того, что мощность молекулярного генератора имеет величину  $10^{-9} \div 10^{-10}$  вт, и учитывая трудности усиления и непосредственного деления частоты 24000 мГц, мы остановились на схеме с использованием высокостабильного кварцевого генератора, частота которого контролируется частотой молекулярного генератора.

В настоящее время работа полностью не завершена, но осуществлен прибор с индикатором, непрерывно показывающим отклонение частоты кварцевого генератора от частоты молекулярного генератора. Эти часы в ближайшее время будут использованы для проверки кварцевых частот ГАИШ.

Данный прибор использует три молекулярных генератора, из которых два попеременно работают в схеме молекулярных часов, а третий является вспомогательным и служит для точной настройки частоты первых двух.

Коротко рассмотрим принципиальную схему молекулярных часов (рис. 1). Более подробное описание электронных схем было дано в докладах [4, 5].

Резонатором кварцевого генератора служит кварцевая линза с частотой  $5 \cdot 10^5$  гц и добротностью около  $10^7$ , изготовленная в НИИФТРИ.



Для сравнения частоты кварцевого и молекулярного генераторов частота первого умножается до частоты молекулярного генератора с помощью ламповых и кристаллических умножителей [4].

Колебания одного из трех молекулярных генераторов  $f_{\text{мг}}$  и умноженная частота кварцевого генератора  $n f_{\text{кв}}$  вместе со вспомогательной частотой клистронного генератора  $f_{\text{кл}}$ , используемого в качестве гетеродина, подаются на смеситель. Последний выделяет разностные частоты  $f_{\text{мг}} - f_{\text{кл}}$  и  $n f_{\text{кв}} - f_{\text{кл}}$ . После усиления и вторичного детектирования отбирается разностная частота  $F_p = |f_{\text{мг}} - n f_{\text{кв}}| \approx 130 \text{ кгц}$ .

Частота  $F_p$  сравнивается с частотой вспомогательного генератора  $F_{\text{кв}} = 130 \text{ кгц}$ . Сравнивающее устройство вырабатывает напряжение, пропорциональное разности частот  $|F_p - F_{\text{кв}}|$  с учетом знака. Одновременно самописец и счетчики „поправок“ регистрируют отклонение частоты кварцевого генератора от частоты молекулярного генератора. Если выходное напряжение сравнивающего устройства подается на схему автоподстройки кварца, то частота кварцевого генератора должна лежать в пределах  $5 \cdot 10^5 \pm 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ гц}$ , т. е. стабильность такого генератора имеет величину  $\sim 10^{-9}$ . При этом долговременная стабильность частоты вспомогательного кварцевого генератора  $F_{\text{кв}}$  должна быть не хуже  $10^{-5}$ , а для чувствительности сравнивающего устройства должно выполняться условие  $|F_p - F_{\text{кв}}| \leq 24 \text{ гц}$ .

Мгновенное значение и скорость изменения частоты кварцевого генератора могут быть определены с помощью самописца и счетчиков „поправок“.

В качестве измерителя частоты и интервалов времени прибор работает следующим образом.

**1-й метод измерения частоты.** Частота кварцевого генератора ( $f_{\text{кв}} = 5 \cdot 10^5 \text{ гц}$ ) умножается до частоты  $5 \cdot 10^6 \text{ гц}^*$ . Эта частота затем понижается блокинг-генераторами делителя частоты 1 до величины  $10 \text{ кгц}$ , причем производится фазировка выходных сигналов относительно исходных, высокочастотных [6]. Выходные сигналы поступают на делитель частоты 2, выполненный на декатронах, и связанную с ним схему управления. Схема управления генерирует два импульса напряжения, временной интервал между которыми соответствует заранее выбранному времени измерения ( $0,1 - 1000 \text{ сек}$ ) с точностью  $10^{-8} \text{ сек}$ . Импульсы от схемы управления управляют работой схем пропускания двух счетных каналов, на вход которых поступают предварительно сформированные импульсы напряжения неизвестной частоты  $f_x$  (1-й канал) и контрольной частоты  $F_p$ ,  $5 \cdot 10^5 \text{ гц}$  и т. д. (2-й канал).

В течение времени измерения схемы пропускания открыты и импульсы неизвестной и контрольной частот фиксируются счетными декадами 1-го и 2-го каналов соответственно. Каждая счетная декада соединена с дешифратором, который переводит состояние декад в статический код телеграфного аппарата (телетайпа) типа РТА-50 или СТ-35. По окончании измерения телетайп с помощью шагового искателя поочередно „опрашивает“ каждую декаду и печатывает цифрами количество набранных импульсов на бумажной ленте или рулоне бумаги.

Время, за которое неизвестная частота может быть измерена с точностью  $\sim 10^{-9}$ , зависит в этом случае от ее значения, так как для определения неизвестной частоты с точностью до единицы

\* Частота  $f_{\text{кв}} = 5 \cdot 10^5 \text{ гц}$  выбрана из-за удобства ее умножения до частоты спектральной линии  $\text{NH}_3$  ( $23870 \text{ мгц}$ ). Однако для уменьшения времени измерения частот и для увеличения точности измерения интервалов времени частота  $f_{\text{кв}}$  умножена в 10 раз.

девятого знака счетные декады 1-го канала должны зарегистрировать около  $10^9$  периодов измеряемой частоты.

**2-й метод измерения частоты.** На делитель частоты 2 подаются сформированные импульсы неизвестной частоты, и схема управления открывает схемы пропускания на время, соответствующее  $10^2$ ,  $10^3$  и т. д. вплоть до  $10^7$  периодов неизвестной частоты. При этом 2-й счетный канал фиксирует периоды неизвестной частоты, а 1-й—периоды стандартной частоты  $5 \cdot 10^6$  *гц*. Значение периода неизвестной частоты может быть найдено из выражения

$$T_x = \left( \frac{n_1}{n_2} 2 \cdot 10^{-7} \pm \frac{2 \cdot 10^{-7}}{n_2} \pm \frac{\Delta T_x}{n_2} \right) \text{ сек},$$

где  $n_1$ —число отсчетов 1-го канала,  $n_2$ —число отсчетов 2-го канала,  $\Delta T_x$ —неточность фиксации фазы сигналов неизвестной частоты, соответствующих моментам открытия и закрытия схем пропускания.

Если время измерения составляет  $\sim 100$  *сек*, а  $\Delta T_x < 10^{-7}$  *сек*, что легко выполнимо для  $f_x > 10^4$  *гц*, то точность измерения частоты в данном случае не хуже  $3 \cdot 10^{-9}$ .

**3-й метод измерения частоты.** Время измерения при сохранении точности  $10^{-9}$  может быть также понижено введением специального фазирующего устройства. В этом случае моменты открытия и закрытия схем пропускания совпадают с моментами совмещения фаз измеряемой частоты и частоты кварцевого генератора с точностью, определяемой разрешающей способностью схемы фазировки. Подробнее этот вопрос рассмотрен в работе [6].

Если частота кварцевого генератора не стабилизирована молекулярным генератором, то измерение частоты производится первым методом. При этом в течение времени измерения фиксируются как импульсы неизвестной частоты (1-й канал), так и разностная частота  $F_p = |f_{\text{мг}} - n f_{\text{кв}}|$  (2-й канал). Точность измерения частоты имеет ту же величину, как и при наличии обратной связи [6].

**Измерение интервалов времени.** При измерении интервалов времени работой схемы пропускания управляют импульсы, соответствующие началу и концу измеряемого промежутка времени. Один из счетных каналов фиксирует умноженную частоту кварцевого генератора 5 *мгц*. Абсолютная точность измерения не превосходит  $2 \cdot 10^{-7}$  *сек*.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Г. Басов и А. М. Прохоров, УФН, 57, 485 (1955).
2. Н. Г. Басов, Диссертация, ФИАН, 1956; РТЭ, 1, 752 (1956); ПТЭ, 1, 71 (1957); ПТЭ, 1, 77 (1957).
3. Н. Г. Басов и А. П. Петров, РТЭ, 3, 298 (1958).
4. В. В. Никитин, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, 1, 1, 190 (1958).
5. И. Д. Мурин, Доклад на конференции по радиоэлектронике. Саратов, 1957.
6. А. Е. Воронков, Л. Н. Кораблев, И. Д. Мурин, И. В. Штраних, Быстродействующий многоканальный амплитудный анализатор. Институт научнотехнической информации Гостехники и АН СССР, 1957.

Физический институт имени  
П. Н. Лебедева АН СССР

Поступила в редакцию  
25 ноября 1957 г.