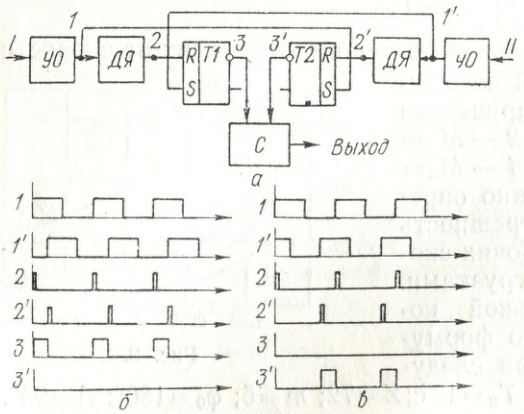
ющие переходам через нуль второго напряжения. Если остроконечный импульс второго канала опережает прямоугольный импульс первого канала, в диапазоне 0 — +180° длительность импульсов на коллекторе триггера пропорциональна фазе. Когда фаза изменит знак, в диапазоне 0 — —180° состояние триггера не изменяется. Для перекрытия диапазона ±180° схема должна состоять из двух триггеров, включенных как показано на рисунке. Чтобы объединить выходы в схеме суммирования С, преобразуют полярность импульсов одного из триггеров. Выходной сигнал схемы представляет собой импульсную последовательность, длительность импульсов в которой пропорциональна абсолютной величине, а полярность соответствует знаку фазового сдвига.




Рассмотренную схему можно использовать как фазовый нуль-орган. При этом наличие импульсов на коллекторе одного из триггеров свидетельствует об определенном знаке фазы. Основное преимущество нуль-органа — высокое быстродействие, практически равное периоду входных сигналов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полулях К. С. Электронные измерительные приборы. М., «Высшая школа», 1966. 400 с.
2. Мирский Г. Я. Радиоэлектронные измерения. М., «Энергия», 1969. 528 с.

УДК 681.325

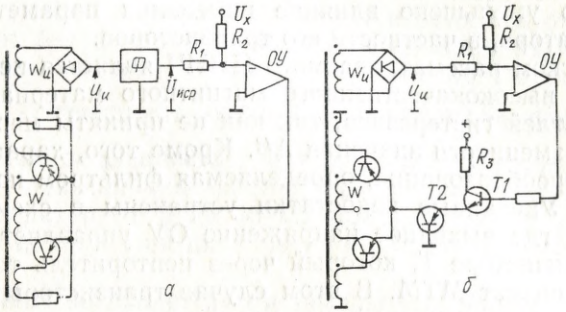
*П. БРЕТШНАЙДЕР,*
*В. У. КИЗИЛОВ,* канд. техн. наук

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ В ЧАСТОТУ

Несмотря на высокую линейность зависимости частоты колебаний от напряжения питания, простоту и надежность схемы, магнитно-транзисторный мультивибратор с магнитной обратной связью (МТМ), так называемый мультивибратор Роера, не нашел промышленного применения в качестве измерительного преобразователя напряжения в частоту (ИПНЧ). Это объясняется тем, что в известной схеме МТМ [1] невозможно обеспечить простую и независимую настройку начального и конечного значений диапазона

изменения частоты, высокое входное сопротивление и требуемую стабильность функции преобразования (ФП).

Известно большое количество работ, в которых решаются частные задачи улучшения тех или иных метрологических свойств МТМ. Предложено множество способов повышения линейности




и расширения динамического диапазона преобразования введением смещения базовых цепей [2], отрицательной обратной связи по току в эмиттерные цепи [3] или нелинейного базового сопротивления [4]. В статье [5] рассмотрено влияние изменения сопротивления нагрузки на значение частоты и показано, как его можно снизить путем подбора соответствующего режима. Высокой стабильности ФП достигают стабилизацией пределов перемагничивания сердечника МТМ [6]. Метрологические свойства ИПНЧ на основе МТМ существенно улучшены в работе [7], где дополнительно введен операционный усилитель (ОУ), через который осуществляется питание МТМ (рисунок, позиция *а*). На входе усилителя напряжение входного сигнала $U_x$ сравнивается с выпрямленным и сглаженным с помощью фильтра $Ф$ напряжением обмотки $w_и$ МТМ. Если коэффициент усиления ОУ большой, то

$$\frac{U_x}{R_2} + \frac{U_{иср}}{R_1} = 0. \qquad (1)$$

Здесь $U_{и\,ср}$ — среднее значение напряжения обмотки $w_и$,

$$U_{и\,ср} = \frac{w_и S}{T} \int_0^T \left|\frac{dB}{dt}\right| dt = 2w_и S f \Delta B, \qquad (2)$$

где $S$ — активное сечение сердечника; $T$ — период колебаний; $\Delta B$ — максимальное изменение индукции в сердечнике; $f$ — выходная частота.

При неизменном значении $\Delta B$ частота в установившемся режиме пропорциональна напряжению входного сигнала:

$$f = \frac{R_1 U_x}{2R_2 w_и S \Delta B}. \qquad (3)$$

В данной схеме высокое значение входного сопротивления $R_2$, независимая и простая настройка начального и конечного значений диапазона изменения частоты достигаются введением смещения на входе ОУ. Отметим, что в отличие от простого подключения предварительного усилителя к МТМ в схеме (рисунок, позиция *а*) существенно уменьшено влияние изменения параметров самого мультивибратора, в частности его транзисторов.

Недостатком рассматриваемого ИПНЧ является необходимость применения высококачественного магнитного материала с прямоугольной петлей гистерезиса, так как не приняты меры для обеспечения неизменности значения $\Delta B$. Кроме того, характерна инерционность преобразования, определяемая фильтром на выходе выпрямителя. Указанные недостатки устранены в схеме (рисунок, позиция *б*), где выходное напряжение ОУ управляет источником тока на транзисторе $T$, который через повторитель тока на транзисторе $T2$ питает МТМ. В этом случае транзисторы МТМ работают в ненасыщенном режиме, что позволяет получить быстрое переключение и исключить фильтр на выходе выпрямителя. В результате на входе ОУ мгновенные значения напряжения сигнала сравниваются с выпрямленным напряжением обмотки $u_и$ и в любой момент времени

$$\frac{u_x(t)}{R^2} = \frac{u_и(t)}{R_1} = \frac{w_и S}{R_1}\frac{dB}{dt}. \qquad (4)$$

Частота колебаний МТМ для произвольного цикла $T_n$ находится из соотношения

$$\frac{1}{T_n}\int_{t}^{t+T_n} u_x(t)\,dt = U_x(T_n) = \frac{2R_2 w_и S \Delta B}{R_1} f_n, \qquad (5)$$

где значение $\Delta B$ определено намагничивающим током, который фиксируется сопротивлением $R_3$.

Из выражения (5) и схемы (рисунок, позиция *б*) следует, что преобразование напряжения в частоту осуществляется с запаздыванием не более чем на полуцикл колебаний МТМ, а влияние параметров элементов на $\Delta B$ значительно уменьшено по сравнению со схемой (рисунок, позиция *а*). Анализ статических погрешностей схемы (рисунок, позиция *б*) показал, что основной фактор, ограничивающий точность ИПНЧ, — температурный коэффициент индукции насыщения $ТКB_S$, который для разных материалов находится в пределах 0,1—1%/10° С. С этой точки зрения наиболее подходящим является сплав 65НП, у которого не только низкое значение $ТКB_S$, но и малые потери на перемагничивание и высокая прямоугольность петли гистерезиса. Хорошие результаты получены на более дешевой стали ХВП, у которой $ТКB_S$ = —0,12%/10° С. Выполненный по схеме (рисунок, позиция *б*) ИПНЧ удовлетворяет всем требованиям ГОСТ 16742—71 к ИП класса 0,1/0,05 с измене-

нием входного сигнала в диапазоне 8—24 Гц, что соответствует принятому в энергетике диапазону частотных систем телеизмерения. Входное сопротивление при управлении от источника напряжения составляет не менее 100 кОм, а при управлении от источника тока — не более 2 кОм. Сопротивление нагрузки при амплитуде напряжения на выходе 12 В может изменяться от 600 Ом до бесконечности без изменения частоты колебаний МТМ. Питание осуществляется от сети переменного тока 50 Гц напряжением 220 В $\frac{-10}{+15}$ %'. Погрешность нелинейности ИПНЧ не больше 0,06%. Дополнительная погрешность с изменением температуры на 10°С не превышает при наличии простой термокомпенсации 0,04%' в диапазоне температур от 5 до 50° С. Дополнительная погрешность от изменения напряжения питания на —15%' и на +10% не выше 0,05%'.

Схема ИПНЧ позволяет путем замены сердечника получить изменение частоты на выходе в любом нужном диапазоне, ограниченном сверху частотой 8—10 кГц при кратности изменения частоты до 10. При этом из-за увеличения погрешности на высоких частотах в МТМ целесообразно использовать сплав 65НП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Royer G. H. A Switching Transistor D. C. to A. C. Converter Having an Output Frequency Proportional to the D. C. Input Voltage. — «AIEE Transactions», 1955, vol. 74, p. 1.
2. Школьный В. А. Преобразование напряжения в частоту с высокой линейностью преобразования. — «Приборы и техника эксперимента», 1965, № 1, с. 209—210.
3. Баранов Л. А. К теории мультивибратора Роера. — «Тр. МИИТ. Вопросы автоматики, телемеханики и связи», 1968, вып. 285, с. 119—133.
4. Тимофеев Б. Б., Арутюнов Г. К. Использование мультивибратора Ройера в качестве преобразователя аналоговых величин в дискретные. — «Тр. Тбилис. НИИ приборов и средств автоматизации», 1962, т. 3, с. 59—67.
5. Синицкий Л. А., Школьный В. А. О стабильности частоты полупроводникового генератора колебаний прямоугольной формы. — «Радиотехника и электроника», 1963, т. 8, № 1, с. 84—89.
6. Липман А. А., Попов В. В. Магнитно-транзисторный преобразователь. Авт. свид. № 272686 от 31.01. 1969 г. — «Бюл. изобрет.», 1970, № 19, с. 122.
7. Price R. L. A Magnetic Feedback Modulator for Improved FM Carrier Recording. — «IEEE Transactions on Magnetics», 1965, vol. 1, p. 111—114.


УДК 681.2

*В. В. ОКОРОКОВ,* канд. техн. наук

## СТРУННЫЙ ГЕНЕРАТОР С ИСКЛЮЧЕНИЕМ АМПЛИТУДНОЙ ПОГРЕШНОСТИ

Частотная форма выходного сигнала и высокая точность струнных преобразователей широко применяются в системах измерения неэлектрических величин. Однако в ряде случаев * погрешность может достигать значительной величины из-за невозможности работы при малой амплитуде колебаний.