

А. М. ЭЛЬБИРТ

(Баку)

ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ КОД — АНАЛОГ

Рассмотрены схемы трансформаторного преобразователя десятичного и двоичного кодов в синусно-косинусные напряжения переменного тока. Проведен анализ некоторых источников погрешностей преобразования. Даны рекомендации по компенсации погрешностей из-за потерь напряжения в обмотках трансформаторов преобразователя. Приведены примеры использования преобразователя для преобразования кода в угол поворота с дистанционной передачей угла.

При применении устройств информационно-вычислительной техники в системах управления возникает необходимость преобразования кодовой информации в угол поворота вала для управления объектами или индикационными устройствами. Преобразование и передача информации на удаленные объекты в ряде случаев производится по линии: цифровая вычислительная машина — преобразователь кода в угол поворота — датчик дистанционной следящей системы — канал связи — приемник дистанционной следящей системы — объект. В качестве датчиков и приемников дистанционных следящих систем обычно применяются синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ). Осуществление преобразования цифрового кода в напряжения переменного тока, пропорциональные синусу и косинусу цифрового кода, т. е. эквивалентные выходным напряжениям СКВТ — датчика, позволит сократить общий объем оборудования в линии связи. Целью настоящей работы является рассмотрение схем трансформаторных преобразователей двоичного и десятичного кодов в синусно-косинусные напряжения переменного тока, анализ схемы замещения и вывод формулы для определения погрешности из-за потерь напряжения в обмотках трансформаторов.

СХЕМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

На рис. 1 представлена схема трансформаторного цифро-аналогового преобразователя трехразрядных десятичных кодов в переменные напряжения, пропорциональные синусу и косинусу кода. Первый каскад преобразователя состоит из трансформатора Tr_1 и переключателя $П_1$. Трансформатор имеет две вторичные обмотки — синусную и косинусную. Синусная и косинусная обмотки имеют по десять выводов с коэффициентами трансформации $\sin n\alpha$ и $\cos n\alpha_0$ при $n=0 \div 9$ и $\alpha_0=36^\circ$.

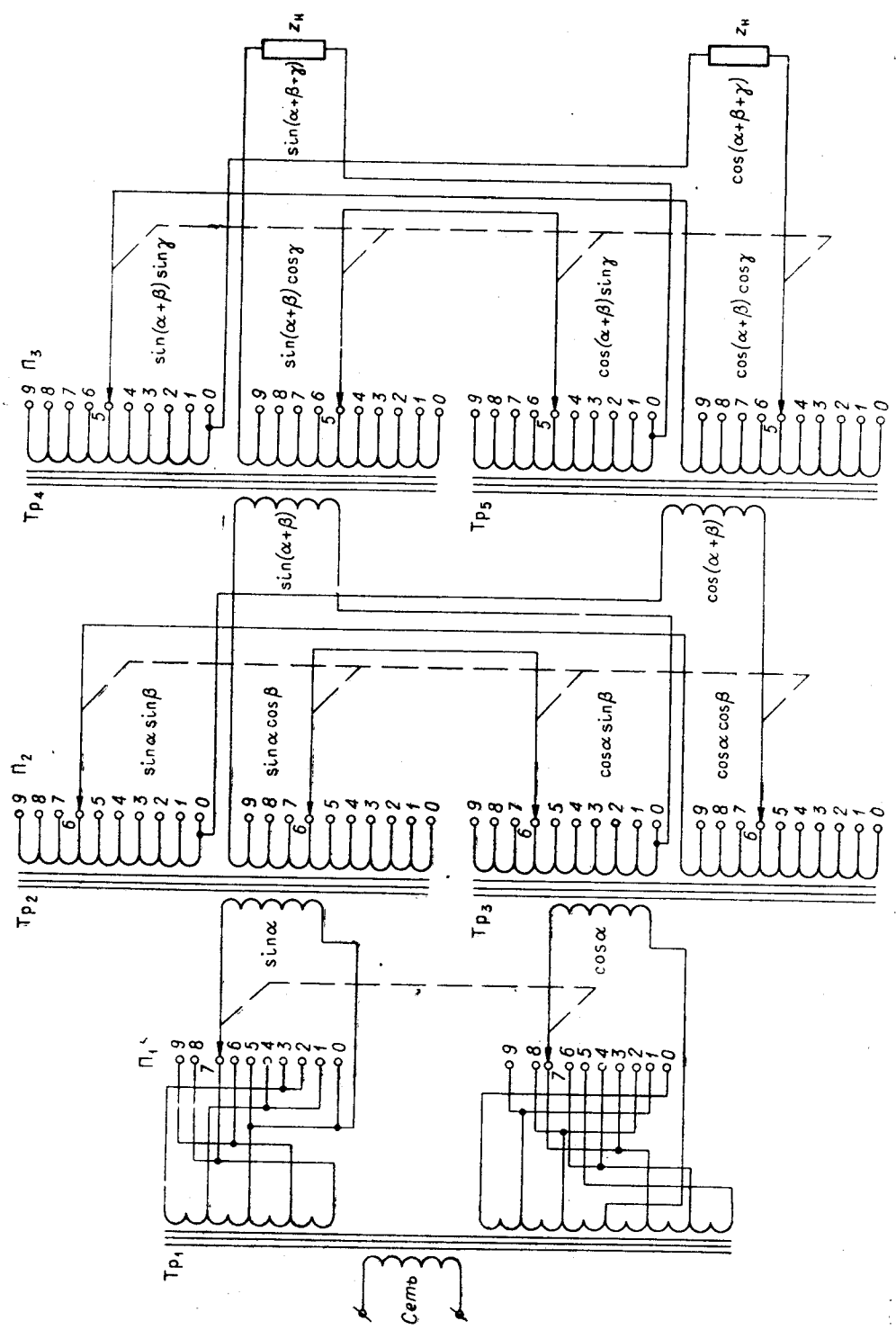


Рис. 1.

Переключатель отводов устанавливается в положение, соответствующее цифре в старшем разряде цифрового кода (n). Выходные напряжения трансформатора Tr_1 обозначим: $\sin \alpha = \sin n\alpha_0$; $\cos \alpha = \cos n\alpha_0$.

Если принять сетевое напряжение за единицу, то на трансформаторы второго каскада Tr_2 и Tr_3 подаются соответственно напряжения $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$.

Трансформаторы Tr_2 и Tr_3 имеют по две вторичные обмотки — синусную и косинусную, коэффициенты трансформации которых соответственно равны $\sin \beta = \sin m \frac{\alpha_0}{10}$, $\cos \beta = \cos m \frac{\alpha_0}{10}$ при $m=0 \div 9$.

Переключатель $П_2$ устанавливается в положение, соответствующее цифре среднего разряда (m). Вторичные обмотки трансформаторов Tr_2 и Tr_3 соединены таким образом, что на трансформатор Tr_4 третьего каскада подается $\sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta = \sin (\alpha + \beta) = \sin \left(n \frac{\alpha_0}{10} + m \frac{\alpha_0}{10} \right)$, а на трансформатор Tr_5 третьего каскада — $\sin \alpha \sin \beta - \cos \alpha \cos \beta = \cos (\alpha + \beta) = \cos \left(n \frac{\alpha_0}{10} + m \frac{\alpha_0}{10} \right)$.

Коэффициенты трансформации вторичных обмоток трансформаторов Tr_4 и Tr_5 равны $\sin \gamma = \sin k \frac{\alpha_0}{100}$ и $\cos \gamma = \cos k \frac{\alpha_0}{100}$ при $k=0 \div 9$. Переключатель $П_3$ устанавливается в положение, соответствующее цифре младшего разряда (k). На выходные клеммы преобразователя подаются напряжения:

$$\begin{aligned} \sin (\alpha + \beta) \cos \gamma + \cos (\alpha + \beta) \sin \gamma &= \sin (\alpha + \beta + \gamma) = \\ &= \sin \left(n \frac{\alpha_0}{10} + m \frac{\alpha_0}{10} + k \frac{\alpha_0}{100} \right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sin (\alpha + \beta) \sin \gamma - \cos (\alpha + \beta) \cos \gamma &= \cos (\alpha + \beta + \gamma) = \\ &= \cos \left(n \frac{\alpha_0}{10} + m \frac{\alpha_0}{10} + k \frac{\alpha_0}{100} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Рассмотрение формул (1) и (2) показывает, что выходные напряжения преобразователя пропорциональны синусу и косинусу угла, заданного тремя десятичными разрядами (n, m, k) цифрового кода. Вес разряда по отношению к выходным данным зависит от выбора величины α_0 . На рис. 1 приведена схема преобразователя при $\alpha_0 = 36^\circ$. Цифровой код является аргументом синусных и косинусных выходных напряжений, и изменение кода от 000 до 999 соответствует изменению аргумента от 0 до $359,64^\circ$. Схема преобразователя рис. 1 может найти применение при ручном вводе кода и вводе кода с перфокарт [1].

Построение схемы преобразователя может меняться в зависимости от основания и числа разрядов кода, группировки разрядов кода по каскадам, веса старшего разряда кода. Применение двоичного кода в качестве входного параметра дает возможность значительно упростить схему преобразователя. На рис. 2 приведена схема преобразователя на 10 двоичных разрядов при весе старшего разряда 180° .

Преобразователь вырабатывает напряжения, пропорциональные синусу и косинусу углов от 0 до 90° . Диапазон от 0 до 360° получается с помощью переключателя квадрантов $П_7$. Переключатель $П_7$ управляется двумя старшими разрядами кода (9 и 10). Разряды кода 7 и 8 управляют переключателем первого каскада $П_1$. Степень первого каскада равна весу седьмого разряда кода $22,5^\circ$. Разряды кода 5 и 6

управляют переключателем второго каскада Π_2 . Ступень второго каскада равна весу пятого разряда кода $5,625^\circ$. Для упрощения третьего каскада использованы соотношения $\sin \gamma \approx \gamma$ и $\cos \gamma \approx 1$ при $\gamma \rightarrow 0$.

Косинусная обмотка выполняется без отводов с коэффициентом трансформации, равным единице. Выработка синусных напряжений производится с помощью суммирования напряжений четырех вторичных

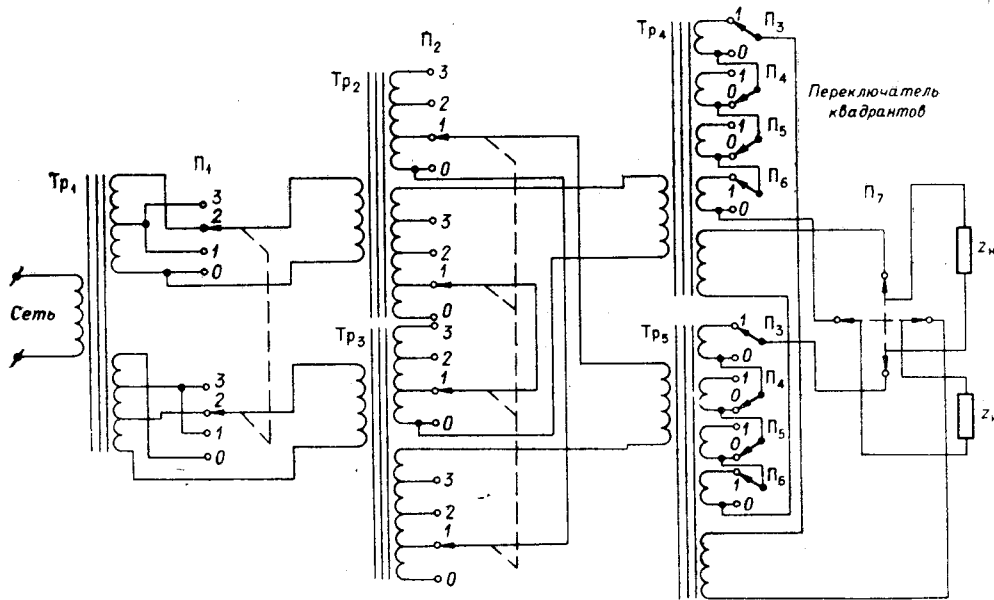


Рис. 2.

обмоток. Подключение обмоток для суммирования осуществляется переключателями Π_3 — Π_6 , управляемыми четырьмя младшими разрядами кодов. Коэффициенты трансформации обмоток равны весам соответствующих разрядов, выраженным в радианах.

Схема преобразователя рис. 2 позволяет автоматизировать управление переключателями, а также выполнять их бесконтактными.

АНАЛИЗ СХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Анализ схемы преобразователя будет проведен по схеме рис. 1. Рассмотрим нагрузку трансформатора Tr_4 при различных положениях переключателя Π_3 . Пусть $\sin(\alpha + \beta) \sin \gamma$ — выходное напряжение синусной обмотки, а $\sin(\alpha + \beta) \cos \gamma$ — косинусной обмотки. Тогда ток через синусную обмотку будет равен току через нагрузочное сопротивление Z_n на косинусном выходе преобразователя $\frac{\cos(\alpha + \beta + \gamma)}{\sin(\alpha + \beta + \gamma)}$, а ток через косинусную обмотку синусного выхода — $\frac{\sin(\alpha + \beta + \gamma)}{Z_n}$. Отсюда нагрузка на синусную обмотку с учетом встречного включения обмоток трансформаторов Tr_4 и Tr_5 в этой цепи составляет

$$Z_{н.с} = - \frac{\sin(\alpha + \beta) \sin \gamma Z_n}{\cos(\alpha + \beta + \gamma)}, \quad (3)$$

а нагрузка на косинусную обмотку —

$$z_{н.к} = \frac{\sin(\alpha + \beta) \cos \gamma z_n}{\sin(\alpha + \beta + \gamma)}. \quad (4)$$

Нагрузка трансформатора Tr_4 , приведенная к первичной обмотке, равна

$$z'_n = \frac{\frac{z_{н.с}}{\sin^2 \gamma} \frac{z_{н.к}}{\cos^2 \gamma}}{\frac{z_{н.с}}{\sin^2 \gamma} + \frac{z_{н.к}}{\cos^2 \gamma}} = \frac{z_{н.с} z_{н.к}}{z_{н.с} \cos^2 \gamma + z_{н.к} \sin^2 \gamma}. \quad (5)$$

Подставив в (5) выражения для $z_{н.с}$ и $z_{н.к}$ из (3) и (4), после необходимых преобразований получим $z'_n = z_n$.

Путем аналогичных расчетов можно показать, что постоянство приведенной нагрузки при любых положениях переключателей соблюдается для всех трансформаторов преобразователя код — аналог.

Благодаря постоянству нагрузок трансформаторов схема преобразователя позволяет получить большую точность преобразования.

Рассмотрим схему замещения преобразователя (рис. 3), в которой для трансформаторов приняты Т-образные схемы замещения. Примем, что $|z_n| \ll |z_0|$; $|z_{1,2,3}| \ll |z_n|$. Обратимся к трансформатору Tr_1 . Общая нагрузка трансформатора, приведенная к первичной обмотке,

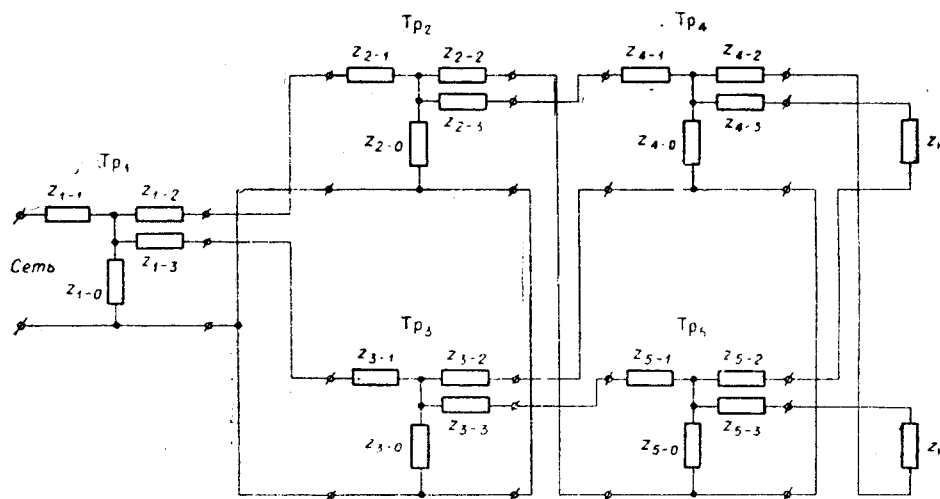


Рис. 3.

постоянна и равна z_n . В этом случае падение напряжения на сопротивлении z_{1-1} будет постоянно, т. е. произойдет некоторое изменение коэффициента трансформации, не сказывающееся на точности преобразований. Примем, что активное сопротивление обмоток пропорционально числу витков. Индуктивное сопротивление можно не учитывать, так как в маломощных трансформаторах оно мало по сравнению с активным [2]. Если сопротивление первичной обмотки равно $z_{1-2} = a$, то

сопротивления вторичных обмоток с учетом приведения составят:

$$z_{1-2} = \frac{a}{\sin \alpha}; \quad (6)$$

$$z_{1-3} = \frac{a}{\cos \alpha}. \quad (7)$$

Напряжение на первичной обмотке трансформатора Tr_2 с учетом (6) равно

$$U_2 = \frac{\sin \alpha \frac{z_H}{\sin^2 \alpha}}{\frac{z_H}{\sin^2 \alpha} + \frac{a}{\sin \alpha}} = \frac{\sin \alpha z_H}{z_H + a \sin \alpha}. \quad (8)$$

Напряжение на первичной обмотке трансформатора Tr_3 с учетом (7) определяется

$$U_3 = \frac{\cos \alpha \frac{z_H}{\cos^2 \alpha}}{\frac{z_H}{\cos^2 \alpha} + \frac{a}{\cos \alpha}} = \frac{\cos \alpha z_H}{z_H + a \cos \alpha}. \quad (9)$$

Погрешность трансформатора Tr_1 может быть охарактеризована погрешностью в выработке

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\operatorname{Re}(U_2)}{\operatorname{Re}(U_3)}.$$

Используя выражения из (8) и (9), получим

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \operatorname{tg} \alpha \frac{\operatorname{Re}\left(\frac{z_H}{z_H + a \sin \alpha}\right)}{\operatorname{Re}\left(\frac{z_H}{z_H + a \cos \alpha}\right)}.$$

Отсюда погрешность в выработке $\operatorname{tg} \alpha$ соответствует

$$\Delta \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \frac{a (\cos \alpha - \sin \alpha) \operatorname{Re}(z_H)}{(|z_H|)^2}. \quad (10)$$

Переходим к погрешности в аргументе:

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg} \operatorname{tg} \alpha_1;$$

$$d \alpha = \frac{d \operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}.$$

Принимая $d \operatorname{tg} \alpha = \Delta \operatorname{tg} \alpha$ и подставляя значение из (10), получим

$$d \alpha \approx \sin \alpha \cos \alpha (\cos \alpha - \sin \alpha) \frac{a \operatorname{Re}(z_H)}{(|z_H|)^2}. \quad (11)$$

Значение $d \alpha$ по формуле (1) имеет максимум при $\alpha = 22,5^\circ$ или для принятой дискретности переключений при $\alpha = 36^\circ$. Оценим порядок по-

грешности, считая нагрузку активной при значениях: $a = 10 \text{ ом}$; $z_n = 1000 \text{ ом}$. Отсюда по формуле (11) $da = 0,00105 \text{ рад} = 3,6'$.

Во втором и третьем каскадах преобразователя погрешность из-за сопротивления вторичных обмоток не будет иметь места, так как сопротивления в цепях выработки синусного и косинусного напряжений будут равны при любом положении переключателей:

$$z_{2-2} + z_{3-3} = z_{2-3} + z_{3-2}; \quad z_{4-2} + z_{5-3} = z_{4-3} + z_{5-2}.$$

Погрешность при этом условии будет возникать вследствие неидентичности трансформаторов Tr_2 и Tr_3 или Tr_3 и Tr_4 из-за погрешностей изготовления. В этом случае погрешность будет на порядок меньше определенной по формуле (11).

Погрешность в трансформаторе Tr_1 может быть скомпенсирована включением в отводы омических сопротивлений для выравнивания активных сопротивлений при различных положениях переключателя.

Другим методом компенсации погрешности может быть выполнение первого каскада из двух трансформаторов аналогично второму и третьему каскадам. Второй трансформатор — компенсационный — должен быть идентичным с трансформатором Tr_1 . Первичная обмотка компенсационного трансформатора замыкается, а синусная и косинусная обмотки через переключатель включаются последовательно с косинусной и синусной обмотками трансформатора Tr_1 (рис. 4).

Метод компенсации добавочными сопротивлениями не вызывает необходимости дополнительных переключений и может быть рекомендован при частоте сетевого напряжения ниже 500 гц. При частотах 500—1000 гц из-за увеличения индуктивного сопротивления обмоток трансформаторов необходимо применение компенсационного трансформатора. Приведенные методы компенсации уменьшают погрешность из-за потерь напряжения в обмотках трансформатора до величины менее 1'.

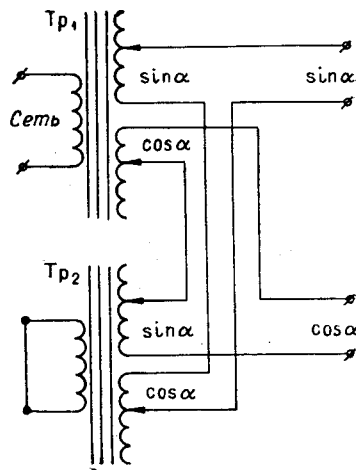


Рис. 4.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Преобразование код — угол поворота с дистанционной передачей угла на принимающий СКВТ. Выходные синусные и косинусные напряжения преобразователя подаются через линию связи на статорные обмотки СКВТ. Роторная обмотка СКВТ соединена с усилителем, который с помощью двигателя разворачивает ротор СКВТ таким образом, чтобы напряжение в роторной обмотке стремилось к нулю.

При этом угол поворота СКВТ соответствует заданному коду. Схема обеспечивает преобразование кода в угол поворота с одновременной дистанционной передачей угла без введения дополнительной следящей системы. Наличие в настоящее время высокоточных СКВТ с погрешностью в 1' позволяет получить высокую точность преобразования. Преобразование код — угол поворота может быть осуществлено по

двухотсчетной системе, что дает возможность увеличить разрядность преобразования.

Преобразование код — угол поворота с дистанционной передачей угла на принимающий сельсин. Выходные напряжения трансформаторного преобразователя $U_{\sin\alpha}$ и $U_{\cos\alpha}$ преобразуются с помощью схемы Скотта в фазные напряжения: $U_{\sin\alpha}$, $U_{\sin(\alpha+120^\circ)}$, $U_{\sin(\alpha+240^\circ)}$.

При подаче фазных напряжений сельсин развернется на угол α . Таким образом, схема обеспечивает преобразование код — угол поворота без применения следящей системы.

Программное управление производственными механизмами. В промышленности встречается необходимость в программированном вводе углов поворота в автоматическое устройство. Примером такой необходимости может являться программированная расточка отверстий на координатном станке. В этом случае координаты отверстий записываются на перфокарту. Перемещение перфокарты осуществляется после расточки очередного отверстия. Код, считанный с перфокарты, подается на трансформаторный преобразователь. Трансформаторный преобразователь с помощью дистанционной следящей системы управляет установкой нового значения координат.

ВЫВОДЫ

Трансформаторный преобразователь на 11 разрядов двоичного кода был испытан в макетном исполнении в интервале температур от 0 до 40°C и имел точность: а) в контактном варианте переключений 5—10'; б) в бесконтактном варианте переключений 10—20'.

Анализ схемы трансформаторного преобразователя показал, что она обладает высокой потенциальной точностью. Точность может быть повышена до 1' путем соответствующего подбора пар трансформаторов.

Применение трансформаторного преобразователя может быть рекомендовано в ряде практических схем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Х. Дж. Финден, Б. А. Хорлок. The Inductosyn and its Applications.— The Journal of British Institution of Radio Engineers, 1957, № 17, p. 369.
2. Р. Х. Бальян. Трансформаторы малой мощности. Л., Судпромгиз, 1961.

*Поступила в редакцию
4 апреля 1966 г.,
окончательный вариант —
22 июня 1966 г.*

A. M. El' birt

DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER USING TRANSFORMERS

Some transformer converters of decimal and of binary codes into a.-c. voltage are regarded. Error correction recommendations are given through analysis of some error origins.