

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАМИ КРУГОВОГО И ПЛОСКОГО ОТРАЖАТЕЛЕЙ АНТЕННЫ ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ

Г. С. Голубчин

Излагается принцип управления элементами кругового и плоского отражателей антенны переменного профиля на примере радиотелескопа РАТАН-600, дается обоснование выбора способа управления и преобразования угла поворота вала в цифровой код. Описывается структура управления круговым и плоским отражателями и определяется ожидаемая ошибка выставления координат.

A control principle for circular and flat elements of a variable profile antenna upon the pattern of the Radio Telescope RATAN-600 is stated. The choice of a mode of control and translation of the angle of rotation of the shaft into a digital code are grounded. The control structure of circular and flat reflectors is described, the expected error of fixing the coordinates is determined.

Введение

На примере радиотелескопа РАТАН-600 рассматривается только система управления круговым и плоским отражателями с помощью управляющей вычислительной машины, так как эта система управления составляет основную стоимость общей системы управления радиотелескопом РАТАН-600 и от ее выбора в большей мере зависит работа радиотелескопа в целом.

Круговой отражатель [1] состоит из 895 одинаковых, механически не связанных между собой подвижных отражательных элементов. Вес подвижной части каждого элемента около 5 т. Каждый элемент кругового отражателя имеет три механически независимых перемещения:

- а) поступательное перемещение (радиальное) с пределом перемещения 0—1080 мм и точностью перемещения ± 0.1 мм;
- б) угломестное перемещение с пределом перемещения $-2-53^\circ$ и точностью ± 0.5 ;
- в) азимутальное перемещение в пределах $\pm 6^\circ$ с точностью $\pm 1'$.

Плоский отражатель состоит из 124 одинаковых элементов, которые имеют угломестное перемещение от 0° до 70° с точностью ± 0.75 .

Все перемещения элементов осуществляются с помощью унифицированных электрических приводов, последними кинематическими элементами которых является пара ходовой винт—гайка. Величины скоростей вращения ходовых винтов, количество оборотов их при максимальных перемещениях приведены в табл. 1.

В качестве электродвигателя установлен асинхронный электродвигатель 4АХ71А4 мощностью 0.55 квт со скоростью вращения 1370 об./мин.

ТАБЛИЦА 1

Перемещение кругового отражателя	Скорость вращения ходового винта, об./мин.	Максимальное число оборотов винта	Время максимальных перемещений, мин.
Радиальное	8.1	108	13.4
Угломестное	8.1	127.5	15.8
Азимутальное	8.1	66	8.15
Угломестное плоского отражателя	8.1	225	27.8

Для остановки привода применяется схема электрического двухступенчатого конденсаторного торможения. Среднеквадратическая величина выбега по ходовому винту после торможения равняется $3^{\circ}6$ [2].

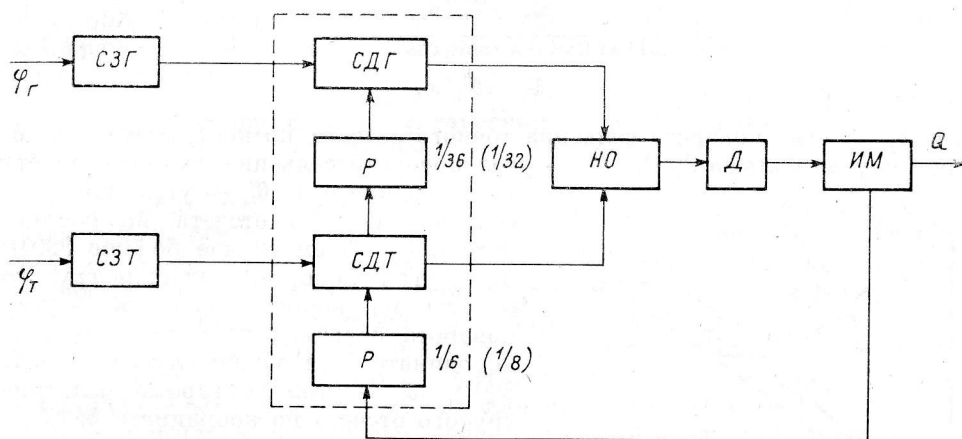


Рис. 1. Схема местного управления элементом отражателя.

СЗГ — сельсин—задатчик грубого отсчета; СДГ — сельсин—датчик грубого отсчета; СЗТ — сельсин—задатчик точного отсчета; СДТ — сельсин—датчик точного отсчета; Р — редуктор; НО — нуль-орган; Д — двигатель; ИМ — исполнительный механизм; θ — угол поворота ходового винта; φ_G — угол задания грубого отсчета; φ_T — угол задания точного отсчета.

В качестве пусковой аппаратуры применены контактные пускатели. Для местного управления применяется двухотсчетная сельсинная следящая система, работающая в трансформаторном режиме (рис. 1).

В качестве датчиков положения в местной системе управления используются бесконтактные сельсины БД-404А II класса, обладающие высокой надежностью. Каждый датчик положения связан по каналу точного отсчета с ходовым винтом передаточным числом 1 : 6 (понижающая передача) — для элементов кругового отражателя и 1 : 8 (понижающая передача) — для элементов плоского отражателя, сельсин грубого канала связан с сельсином точного канала передаточным числом 1 : 36 (32) (понижающая передача).

Точность выставления каждой координаты равна (по ходовому винту) $3^{\circ}6$ (среднеквадратическая ошибка) или $0^{\circ}6$ по шкале сельсина точного отсчета и соответственно $4^{\circ}8$ или $0^{\circ}8$ для плоского отражателя.

С помощью системы управления должны осуществляться два основных режима работы радиотелескопа по программе:

1. Установка элементов отражающей поверхности по заданным горизонтальным координатам объектов (h — угловая высота радиисточника с учетом рефракции и параллакса, A — азимут радиисточника)

в режиме прохождения, в том числе (в перспективе) из нескольких пунктов СССР.

В этом режиме выставляются 225 элементов кругового отражателя симметрично относительно одного из 12 фиксированных значений азимутов. Возможно одновременное выставление трех секторов по 225 элементов относительно трех различных азимутов.

Для установки каждого элемента кругового отражателя вычисляются три установочные координаты: l — радиальное перемещение, α — угломестное перемещение, β — азимутальное перемещение, которые потом пересчитываются по формулам (1)–(5)*:

$$\theta_{l_r}^0 = 6e, \quad (1)$$

$$\theta_{l_r}^0 = \theta_{l_r}^0/36, \quad (2)$$

$$\theta_{\alpha_r}^0 = 6 [10 \sqrt{45260 - 44740 \cos(20^\circ + \alpha)} - 569], \quad (3)$$

$$\theta_{\alpha_r}^0 = \theta_{\alpha_r}^0/36, \quad (4)$$

$$\theta_{\beta_r}^0 = 20 [10 \sqrt{19440 - 19410 \cos(28^\circ + \beta)} - 479], \quad (5)$$

$$\theta_{\beta_r}^0 = \theta_{\beta_r}^0/36, \quad (6)$$

где $\theta_{l_r}^0$ — угол поворота сельсина точного отсчета по координате l (в общем случае больше 360°), $\theta_{l_r}^0$ — угол поворота сельсина грубого отсчета по координате l , $\theta_{\alpha_r}^0$ — угол поворота сельсина точного отсчета по координате α (в общем случае больше 360°), $\theta_{\alpha_r}^0$ — угол поворота сельсина грубого отсчета по координате α , $\theta_{\beta_r}^0$ — угол поворота сельсина точного отсчета по координате β (в общем случае больше 360°), $\theta_{\beta_r}^0$ — угол поворота сельсина грубого отсчета по координате β .

2. Режим квазислежения (последовательная быстрая перестановка элементов по программе).

В режиме квазислежения одновременно работают 170 элементов кругового отражателя, которые выставляются по координатам l и β при $\alpha=0$, и плоский отражатель, элементы которого выставляются по одной координате $\alpha_{пл}$, одинаковой для всех элементов. Углы поворота сельсинов грубого и точного отсчетов $\theta_{\alpha_{пл}}^0$ по координате $\alpha_{пл}$ вычисляются согласно (7), (8):

$$\theta_{\alpha_{пл} T}^0 = 36 [\sqrt{9178085 - 9172772 \cdot \cos(16^\circ + \alpha_{пл})} - 673.5]/8, \quad (7)$$

$$\theta_{\alpha_{пл} T}^0 = \theta_{\alpha_{пл} T}^0/32. \quad (8)$$

Элементы кругового и плоского отражателей могут выставляться с точностью $\pm 0.1 \lambda$, где λ — длина волны, на которой происходит наблюдение. Временной режим работы двигателей виден из рис. 2. Здесь $t_{дв}$ — время движения элемента от нижнего отклонения допуска к верхнему отклонению со скоростью $n_{дв}/i_p$, где $n_{дв}$ — скорость двигателя, i_p — передаточное число силового редуктора, t_n — время, в течение которого элемент неподвижен.

$$t_{дв} = 0.2k_\lambda \lambda / V_{дв} - V_{щ}, \quad (9)$$

* Формулы (1), (3) и (5) выведены О. Н. Шиврисом.

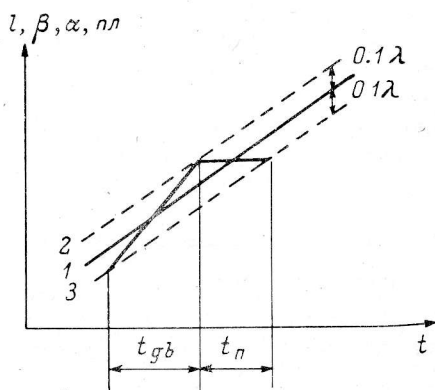


Рис. 2. Движение элемента отражателя в режиме квазислежения.

1 — график движения элемента отражателя (теоретический); 2 — возможная верхняя граница отклонения от графика; 3 — возможная нижняя граница отклонения от графика.

где $V_{дв}$ — реальная скорость элемента, $V_{ш}$ — теоретическая скорость элемента (зависит от наблюдаемого объекта), k_{λ} — коэффициент запаса по точности:

$$k_{\lambda} \leq 1, k_{\lambda} = a\lambda + b,$$

где a и b — для данной λ величины постоянные.

$$t_{ш} = 0.2 \cdot k_{\lambda} \lambda / V_{ш}. \quad (10)$$

В табл. 2 даны значения $t_{дв}$ и $t_{ш}$ в зависимости от λ (при $h=0$, $k_{\lambda}=1$), которых могут достигать отдельные элементы отражателя.

Условия эксплуатации радиотелескопа:

а) радиотелескоп эксплуатируется на открытом воздухе, б) высота над уровнем моря 950 м, в) относительная влажность 95%, г) суточный перепад температур 30° , д) сезонный перепад температур 60° , е) периметр антенны около 2 км.

ТАБЛИЦА 2

λ , см	$t_{ш}$, сек.	$t_{дв}$, сек.
0.8	1.9	2.9
1	2.35	3.65
2	4.7	7.3
4	9.4	14.6
6	14.1	21.9
16	37.6	58.4
21	49.4	76.7

Выбор способа управления и преобразования угла поворота вала в код

Требования, предъявляемые по точности к приводу, условия эксплуатации и большое количество сельсинов-датчиков (около 5700), расположенных по периметру кругового отражателя (около двух километров), позволили сформулировать основные критерии, по которым осуществляется выбор схемы управления: а) высокая надежность, б) минимальное количество аппаратуры на периферии, в) простота обслуживания, г) невысокая стоимость, д) высокая информативность, е) малое количество коммутационных проводов, ж) высокая приемственность аппаратуры.

В сложных многосвязных системах используются управляющие вычислительные машины (УВМ) в режиме прямого цифрового многоканального регулирования при наличии высокой надежности и быстродействия или в режиме коррекции задания, когда имеется n_m регулирующих систем по количеству исполнительных механизмов. Принципиально эффективность первого способа управления выше второго, особенно для многосвязных систем, однако требования к надежности УВМ, работающих в режиме прямого цифрового многоканального управления, гораздо выше, чем к УВМ, корректирующей уставки задания отдельных регулирующих систем.

По зарубежным данным, УВМ, специально предназначенные для выполнения функций прямого цифрового регулирования, должны обеспечивать $K_r = 0.9995$, где K_r — коэффициент готовности — определяется наработкой на отказ и средним временем восстановления:

$$K_r = T_o / T_o + T_v, \quad (11)$$

где T_o — время наработки на отказ, T_v — время восстановления.

Возможно в дальнейшем уменьшение T_v за счет улучшения аппаратурного и программного контроля поиска неисправностей.

В работах [3—5] исследуется выбор способа управления регулируемыми органами в зависимости от стоимости аппаратуры управления, возможных потерь при отказах отдельных регулирующих систем и УВМ, количества регулирующих систем; определяется некоторое число n_m^* , колеблющееся от 50 до 100, при котором полные затраты при обоих способах управления одинаковы.

Таким образом, с точки зрения полных затрат в нашем случае рациональнее применить первый способ управления с помощью УВМ, однако, как показывают расчеты, быстрдействие существующих УВМ недостаточно для управления одновременно элементами кругового и плоского отражателей, поэтому более корректен вариант разбивки кругового отражателя на 4 сектора, по 225 элементов в каждом, и собственно плоский отражатель, который условно назовем также сектором. Каждый сектор управляется одним многоканальным регулятором, состоящим из арифметического устройства, блока управления и коммутатора каналов. Собственно УВМ предназначена для расчета уставок координат элементов, ввода этих уставок через буферную память в многоканальные регуляторы, организации радиотехнической и радиоастрономической юстировок, а также программного контроля системы.

Кроме того, информационно-аппаратурный критерий качества системы A значительно выше при первом способе управления, чем при втором:

$$A = C/N. \quad (12)$$

A характеризует количество информации, пропускаемое системой в единицу времени (C) на единицу оборудования (N).

В системе управления элементами кругового и плоского отражателей основным параметром, подлежащим дистанционной передаче и преобразованию, является параметр, представленный в виде угла поворота вала.

Применение каких-либо преобразователей «угол—код» непосредственного кодирования для поставленной цели практически невозможно, поскольку подобные устройства сложны и ненадежны, а также не обеспечивают преемственности с существующей местной системой управления.

Наиболее удачными следует признать различного вида электромеханические преобразователи перемещения, среди которых наиболее простыми, надежными и дешевыми являются в настоящее время бесконтактные сельсины, которые применяются в местной системе управления. Несмотря на обилие разнообразных устройств, вариантов и схем преобразования угловых величин с помощью сельсинов, принципиальных разновидностей их немного, так как принцип любого преобразователя перемещения электромеханического типа основан на измерении одного из параметров напряжения:

$$U = U_0 e^{j(\omega t + \varphi)}, \quad (13)$$

а именно: фазы φ — для переменного тока или амплитуды, U_0 — для постоянного или переменного тока (при использовании выпрямителей). В последнем случае устройства могут быть основаны на измерении абсолютного значения напряжения или отношения двух напряжений.

При амплитудно-замкнутой схеме преобразования электромеханические преобразователи имеют пространственную диаграмму, т. е. в реальной схеме машины присутствует пульсирующее поле [6]:

$$e_b = E e^{j(\theta + \theta_0)} e^{j(\omega t + \varphi)}, \quad (14)$$

где e_b — э. д. с. на одной из вторичных обмоток; E — амплитуда напряжения питания; θ — текущий угол поворота вектора в пространственной диаграмме; θ_0 — начальное значение угла поворота вектора в пространственной диаграмме; φ — сдвиг фазы относительно питающего напряжения в фазовой диаграмме.

При фазном преобразовании электромеханические преобразователи имеют фазовую диаграмму, т. е. в реальной схеме машины присутствует

бегущее магнитное поле, и любой вектор в такой диаграмме будет выражен формулой

$$e_B = E e^{j(\omega t + \varphi + \theta + \theta_0)}. \quad (15)$$

Из сравнения (14) и (15) видно, что в первом случае при амплитудно-замкнутой схеме преобразования основной ошибкой является ошибка в измерении амплитуды напряжения, а затем ошибка в изготовлении датчика; во втором случае при фазном преобразовании основными ошибками являются ошибки от неточного измерения момента времени t , нестабильности фазы φ и частоты ω , а также ошибки нечувствительности схемы измерения напряжения и погрешности от гармоник и самого датчика [7].

Кроме того, точность фазового метода преобразования зависит от медленного дрейфа фазы при изменении окружающих условий и быстрых флуктуаций фазы сельсина при работе [8]. Быстродействие преобразователей «угол—фаза—код» зависит от частоты питания (в нашем случае 50 гц), что не позволяет создать простых эффективных многоканальных преобразователей; в случае амплитудного преобразования быстродействие в основном зависит от элементной базы, на которой построен преобразователь.

Из сказанного выше следует, что в нашем случае эффективнее применять многоканальный преобразователь «угол—код» с амплитудной замкнутой схемой преобразования [8—11].

Для трехлучевого преобразователя типа сельсин

$$U_1 = i \cos \theta \sum_{k=1}^{\infty} U_k e^{j(k\omega t + \varphi_k)}, \quad (16)$$

$$U_2 = \cos(\theta - 120)^\circ \sum_{k=1}^{\infty} U_k e^{j(k\omega t + \varphi_k)}, \quad (17)$$

$$U_3 = \cos(\theta - 240)^\circ \sum_{k=1}^{\infty} U_k e^{j(k\omega t + \varphi_k)}, \quad (18)$$

где U_1, U_2, U_3 — напряжения во вторичных обмотках сельсина.

Разделив (16) на (17), после пересчета получим:

$$\theta = \arctg(1.15/k + 0.575), \quad (19)$$

где $k = \frac{U_1}{U_2}$.

Упростим (19), преобразуя трехлучевой преобразователь в двухлучевой с помощью трансформатора Скотта [12], тогда (16)—(18) преобразуются в два выражения:

$$U_1^* = \sin \theta \sum_{k=1}^{\infty} U_k^* e^{j(k\omega t + \varphi_k)}, \quad (20)$$

$$U_2^* = \cos \theta \sum_{k=1}^{\infty} U_k^* e^{j(k\omega t + \varphi_k)}, \quad (21)$$

и (19) будет выглядеть так:

$$\theta = \arctg k, \quad (22)$$

где $k = \frac{U_1^*}{U_2^*}$ — параметр, несущий информацию.

В многоканальном преобразователе «угол—амплитуда—код» важную роль играет принцип соединения датчиков положения с групповым преобразователем и их коммутация.

Если пойти по обычному пути, когда к групповому преобразователю подходит $3n_n$ вторичных проводов (n_n — количество датчиков положения) и имеется коммутатор переключения каналов вторичных цепей, то многоканальный преобразователь «угол—код» чрезвычайно усложнится из-за большого количества ключей коммутатора и высоких требований, предъявляемых к ним, так как здесь происходит коммутация напряжений, не-

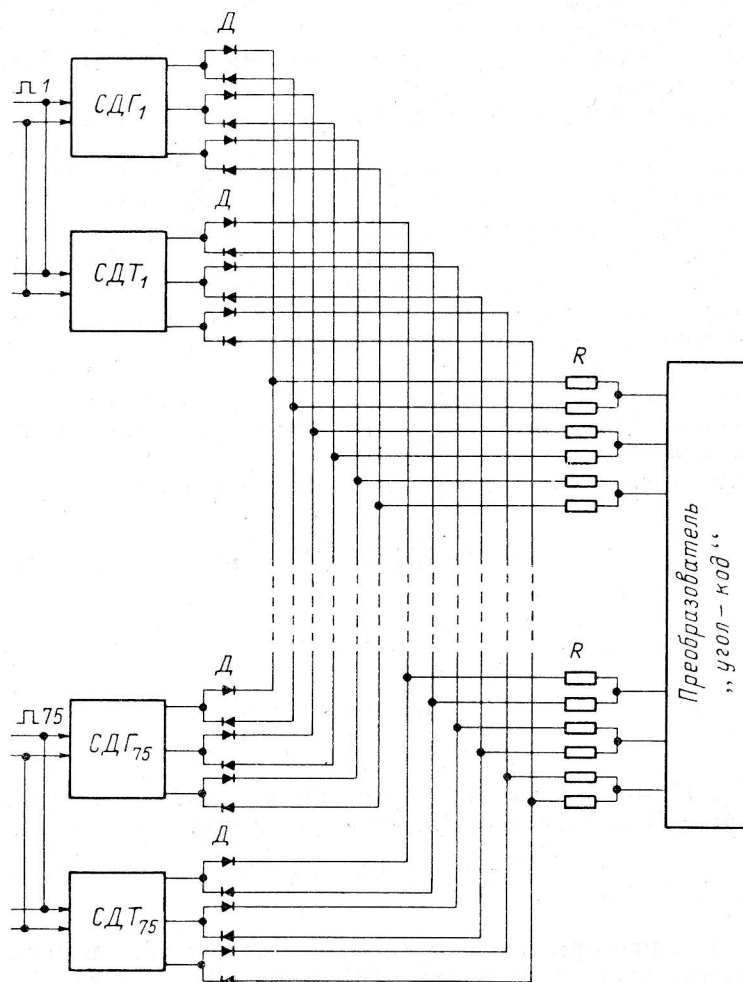


Рис. 3. Схема коммутации сельсинов—датчиков многоканального преобразователя «угол—код» с его аналого-цифровой частью. СДГ — сельсин—датчик грубого отсчета; СДТ — сельсин—датчик точного отсчета; Д — разделительный диод; R — развязывающее сопротивление.

сущих информацию об угле поворота датчика [13], а также из-за большой их рассредоточенности. Поэтому было предложено установить коммутатор в первичных цепях датчиков и производить коммутацию напряжения питания датчиков, что значительно уменьшает количество ключей коммутатора и требования к ним.

Вторичные обмотки одноименных сельсинов—датчиков, входящих в один многоканальный преобразователь, с помощью разделительных диодов соединяются общими шинами, которые связаны с входом аналого-цифрового преобразователя «угол—код» через развязывающие сопротив-

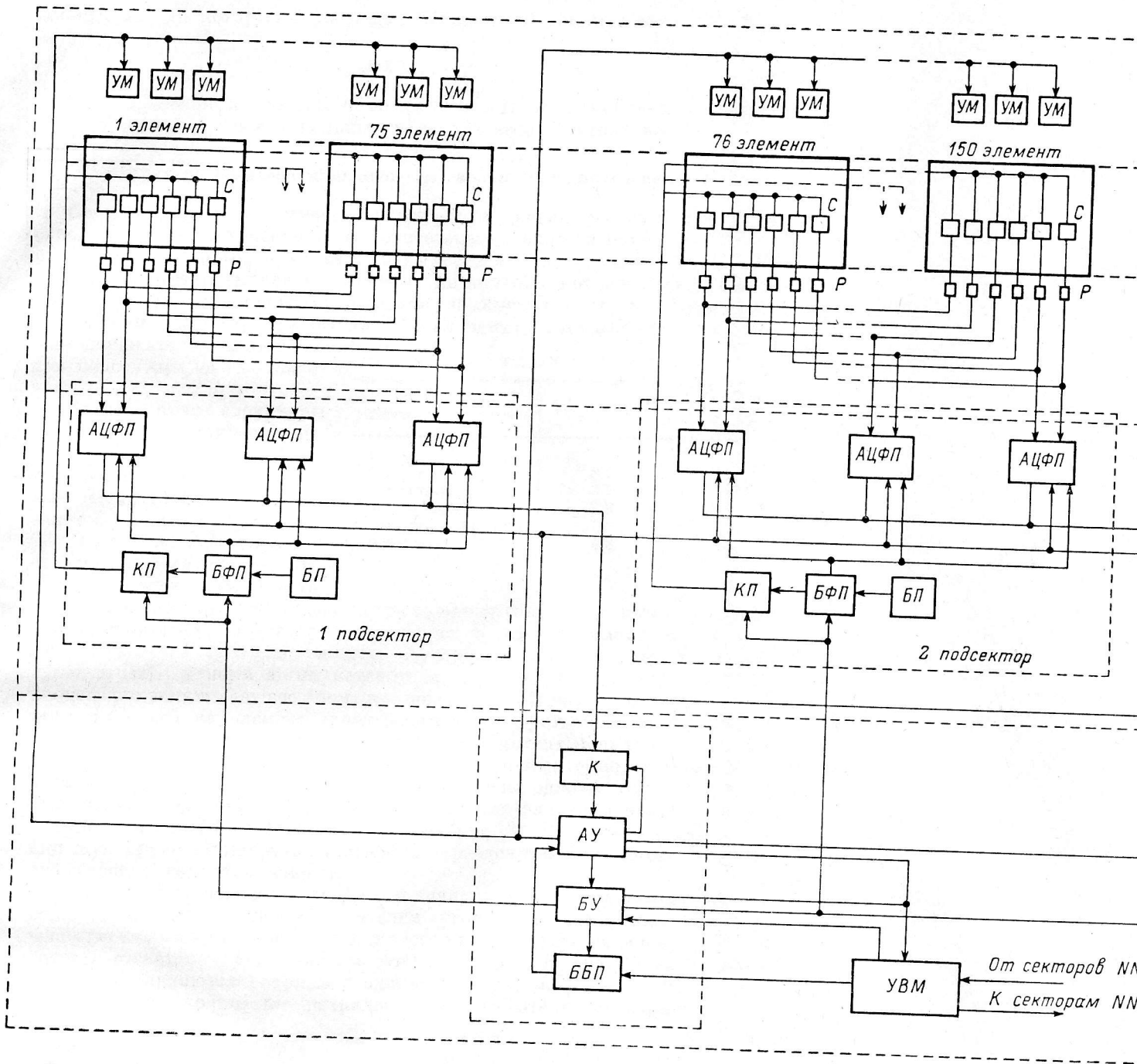
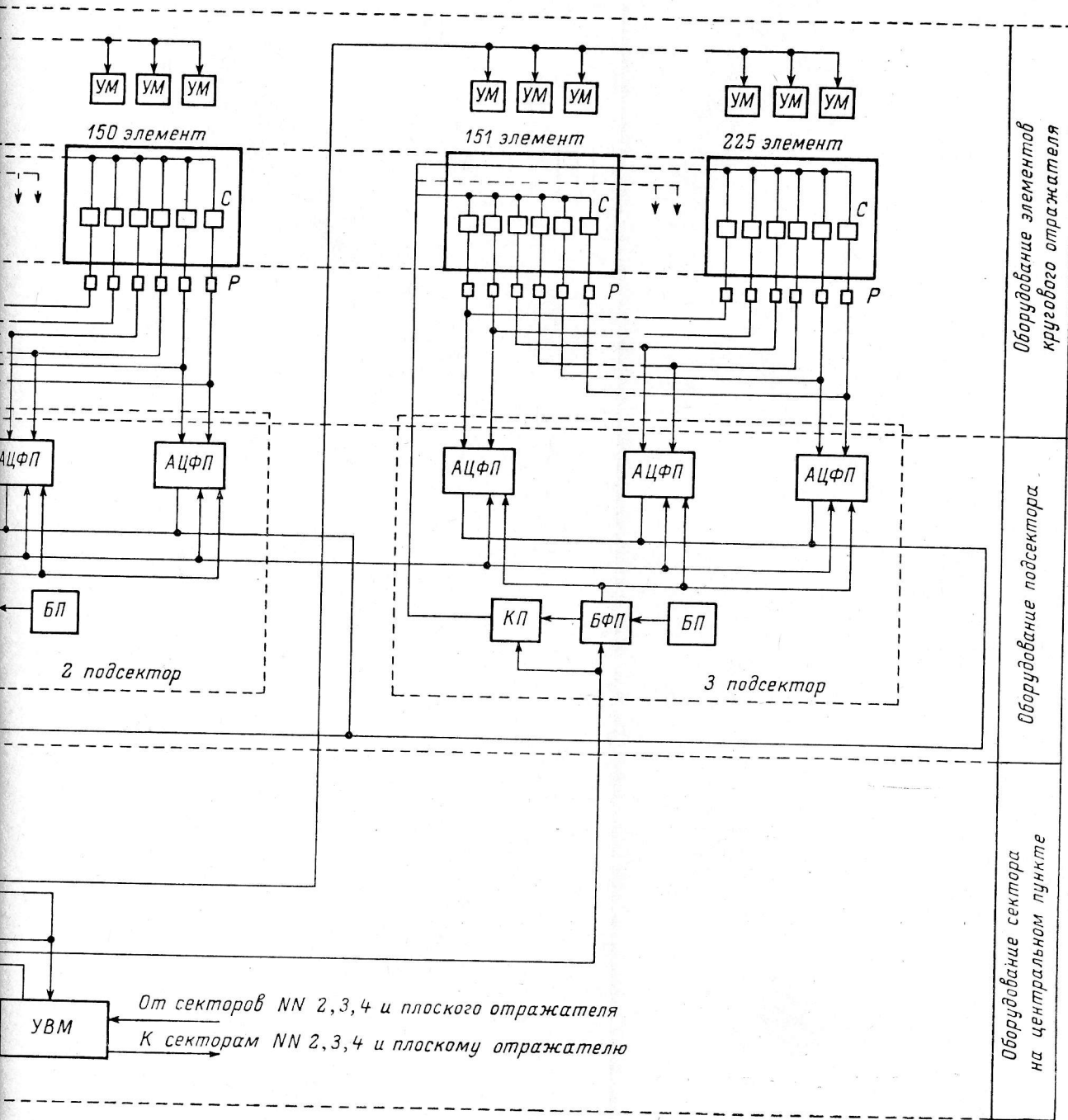


Рис. 4. Схема автоматизированного управления сект

С — сельсин-датчик; УМ — усилитель мощности; Р — развязка; АЦФП — многоканальный преобразователь «угол-код»; КП — коммутатор на питание подсектора; К — выходной коммутатор АУ; АУ — арифметическое устройство; БУ — блок управления; ББП — блок



атизированного управления сектором.

«угол-код»; КП — коммутатор каналов питания подсектора; БФП — блок формирования прямоугольных импульсов; БП — блок управления; БУ — блок управления; ББП — блок буферной памяти; УВМ — управляющая вычислительная машина.

ления (рис. 3), которые служат для исключения влияния шунтирующей нагрузки, равной

$$Z_{ш} = Z_c/n_n - 1, \quad (23)$$

где Z_c — импеданс вторичной обмотки сельсина, n_n — количество сельсинов, входящих в многоканальный преобразователь «угол—код».

Структура системы цифрового управления радиотелескопом

Система управления имеет двухъярусную, иерархическую структуру (рис. 4). Такое построение в настоящее время является наиболее распространенным. Первый ярус структуры состоит из четырех одинаковых замкнутых систем управления элементами кругового отражателя (225 элементов на каждую систему) и одной замкнутой системы управления элементами плоского отражателя (124 элемента). Каждый сектор кругового отражателя делится на три подсектора по 75 элементов.

Второй ярус структуры состоит из управляющей вычислительной машины «Электроника К-200» с собственным периферийным оборудованием.

Работа системы управления сектором кругового отражателя осуществляется следующим образом. Параллельно на три элемента (каждый из которых входит в свой подсектор) подается напряжение в виде прямоугольного импульса частотой $f_{ш}$ и скважностью $Q_{ш}$ при помощи коммутатора канала питания (КП) одноименного подсектора, который с частотой $f_n = 75 \cdot f_{ш}$ поочередно запитывает все элементы подсектора. При подаче прямоугольного импульса на элемент запитываются все шесть сельсинов данного элемента, на выходе которых во вторичных обмотках появляются три напряжения (16)—(18). Эти напряжения со вторичных обмоток сельсина—датчика СДГ и СДТ поступают на общие шины одноименных сельсинов подсектора раздельно во времени, так как все элементы подсектора запитываются последовательно—раздельно (рис. 3). Для исключения влияния шунтирующей нагрузки (23) служат разделительные диоды D и развязывающие сопротивления R .

Общие шины сельсинов грубого и точного отсчетов одного из перемещений соединяются с преобразователем «угол—код», где происходит получение двоичного кода, пропорционального углу поворота сельсина грубого и точного отсчетов, и согласование этих кодов в один код. Согласующими разрядами являются разряды с одинаковым весом.

Определим количество разрядов преобразователя по формуле

$$N = 3.32 \lg (360m/\Delta\varphi_{\text{винт}}), \quad (24)$$

где m — количество оборотов ходового винта, $\Delta\varphi_{\text{винт}}$ — допустимая ошибка, выраженная в углах поворота ходового винта.

Результаты вычислений сведены в табл. 3.

Принимаем для всех перемещений разрядность преобразователя «угол—код» равной 14. Передаточное число между грубой (ГО) и точной (ТО) ступенью отсчета должно быть равно 32 для удобства согласования. Одним из согласующих разрядов является старший, 9-й разряд ТО, другим 4-й разряд ГО. В алгоритме согласования используется информация о значе-

ТАБЛИЦА 3

Перемещение кругового отражателя	$\Delta\varphi_{\text{винт}}$, град.	Количество двоичных разрядов
Радиальное	3.6	14
Угломестное	3.6	14
Азимутальное	3.6	10
Угломестное плоского отражателя	4.8	14

нии 8-го разряда ТО. Преобразователь «угол—код» работает с частотой преобразования $f_{пр} = f_n = 75f_{ш}$. Информация из преобразователя «угол—код» по запросу входного коммутатора каналов арифметического устройства записывается в регистре арифметического устройства (АУ). В АУ код, полученный от преобразователя «угол—код», вычитается из кода соответствующей уставки; полученная разность сравнивается с заранее заданным числом, которое выбирается с учетом выбега привода и запаздывания системы управления. В зависимости от результата сравнения выдаются команды «вперед», «назад» и «стоп» в виде релейного сигнала, причем сигнал «стоп» соответствует отсутствию напряжения в управляющих цепях привода. Распределение команд по адресам производится с помощью выходного коммутатора АУ.

Уставка в АУ поступает одновременно с одноименной информацией в виде 14-разрядного двоичного кода от соответствующего преобразователя «угол—код» из буферного блока памяти сектора. Уставки в блок буферной памяти записываются из УВМ предварительно в случае режима прохождения или во время t_n (10) в случае режима квазислежения. Запись уставок в блок буферной памяти производится последовательно на весь сектор. Перед записью предыдущая информация стирается, а канал связи блока буферной памяти сектора с АУ блокируется с помощью УВМ до полного ввода информации. АУ работает с частотой выдачи управляющего сигнала $f_{АУ} = 9 \cdot f_n = 675 \cdot f_{ш}$.

Для синхронизации работы блоков системы управления сектором, подачи тактирующих импульсов и приведения системы в исходное положение служит блок управления, который включается и выключается по команде УВМ. Для получения текущей информации оператором по вызову нужно различать два случая: а) элементы отражателя находятся в движении, б) элементы отражателя стоят неподвижно.

В первом случае по команде УВМ включается блок управления сектором и с него считывается номер канала, который передается в УВМ. При совпадении номера считываемого канала с выбранным номером канала происходит считывание координаты щита с АУ сектора. В дальнейшем информация поступает на устройство наглядного отображения или на устройство цифропечати, или записывается на магнитную ленту. Во втором случае получение информации аналогично, только блокируется выход сигналов коррекции с АУ.

За критерий точности и устойчивости системы принимаем отношение максимальной скорости при программном перемещении к динамической ошибке перемещения. Принимаем динамическую ошибку перемещения равной среднеквадратической, т. е. равной $\Delta\varphi_{винт}$:

$$D = 360n/60\Delta\varphi_{винт} = 13.5 \text{ 1/сек.}, \quad (25)$$

где n — количество оборотов в минуту ходового винта.

Выбираем частоту измерения контролируемой величины $f_{ш} = 14$ ш. Интервал времени между двумя измерениями в одном канале $t_{ш} = 1/f_{ш} = 0.0715$ сек. Система управления плоским отражателем отличается от системы управления сектором лишь в количественном отношении.

Определение ожидаемой ошибки выставления координат

Ожидаемая среднеквадратическая ошибка выставления координат определяется следующей зависимостью:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2},^* \quad (26)$$

* Прочие ошибки из-за мелкомасштабности не учитываются.

где σ_1^2 — дисперсия ошибки сельсина—датчика, σ_2^2 — дисперсия ошибки собственно преобразователя «угол—код», σ_3^2 — дисперсия ошибки трансформатора Скотта, σ_4^2 — дисперсия ошибки устройства разделения каналов, σ_5^2 — дисперсия ошибки за счет линии связи.

Дисперсия ошибки сельсина—датчика БД-404А определяется следующим образом. Из паспортных данных берется максимальная ошибка сельсина—датчика БД-404А в трансформаторном режиме для II класса точности $\Delta_{\max} = 0.5^\circ$.

Считая закон распределения ошибок нормальным, определим дисперсию ошибки сельсина—датчика

$$\sigma_1^2 = (\Delta_{\max}/3)^2 = 0.03. \quad (27)$$

Дисперсия ошибки собственно преобразователя «угол—код» состоит из методической и инструментальной погрешностей [14—17]. Если выбрать инструментальную ошибку равной 0.2%, то дисперсия ошибки собственно преобразователя будет равна

$$\sigma_2^2 = \sigma_m^2 + \sigma_{ин}^2 = (\Delta_{кв}/\sqrt{3})^2 + (\Delta_{ин}/3)^2, \quad (28)$$

где σ_m — методическая среднеквадратическая погрешность, $\sigma_{ин}$ — инструментальная среднеквадратическая погрешность, $\Delta_{кв}$ — размерность младшего разряда преобразователя, $\Delta_{ин}$ — максимальная инструментальная ошибка.

В результате вычислений получим $\sigma_2^2 = 0.22$. Если совместим начало отсчета с серединой кванта и инструментальную ошибку примем равной 0.1%, то получим $\sigma_2^2 = 0.055$. Дисперсия ошибки трансформатора Скотта σ_3^2 зависит от степени несимметрии выходных напряжений при равных нагрузках. Из работы [12] степень несимметрии выходных напряжений при равных нагрузках $\delta_U = 0.28\%$, что соответствует максимальной погрешности $\Delta_{\theta_{т.с.|\theta=\pi/4}} = 0.1^\circ$.

Дисперсия ошибки трансформатора Скотта

$$\sigma_3^2 = (\Delta_{\theta_{т.с.|\theta=\pi/4}}/3)^2 = 0.0009. \quad (29)$$

Дисперсия ошибки устройства разделения каналов σ_4^2 в основном зависит от разброса прямого сопротивления диодов, так как развязывающие сопротивления ввиду их малого количества можно подобрать очень точно. Из опытных данных получено, что разброс прямого сопротивления у кремниевых диодов не превышает 15—20%, что соответствует максимальной ошибке угла поворота $\Delta\theta_p = 2'$, этой величиной можно пренебречь.

Дисперсия ошибки за счет линии связи σ_5^2 зависит главным образом от уровня наводок в контрольных проводах и изменения переднего фронта импульсов сигнала. Ошибка от уровня наводок в контрольных проводах должна быть незначительной за счет применения скруток по шесть проводов с последующим экранированием, тщательным заземлением и удалением от трасс силовых проводов. Кроме того, все контрольные провода в одной скрутке будут иметь одинаковую наводку, которая в основном компенсируется при амплитудном замкнутом методе преобразования «угол—код».

Ошибка от изменения переднего фронта импульса сигнала также будет незначительна, так как начало работы преобразователя «угол—код» сдвинуто на постоянную времени контрольного провода относительно начала импульса сигнала.

Примем максимальную ошибку за счет линии связи Δ_{\max_5} равной 0.25° , тогда

$$\sigma_5^2 = (\Delta_{\max_5}/3)^2 = 0.0694. \quad (30)$$

Дисперсия ошибки за счет линии связи σ_5^2 нуждается в экспериментальном подтверждении на месте монтажа. Таким образом, ожидаемая ошибка выставления координаты из (26) равна 0.566° , что не превосходит допустимой ошибки 0.6° . В результате проведенного эксперимента на приближенной модели преобразователя «угол—код» в лабораторных условиях найденная суммарная среднеквадратическая ошибка σ_2 равнялась $0.49 \pm 0.05^\circ$.

Литература

1. А. З. Амстиславский, А. И. Копылов, М. И. Просмушкин, Изв. Глав. астрон. абс. в Пулкове, № 188, 89, 1972.
2. Г. С. Голубчин, Изв. Глав. астрон. абс. в Пулкове, № 188, 97, 1972.
3. Автоматическое управление и вычислительная техника. В кн.: Надежность системы управления, вып. 7. М., «Машиностроение», 1967.
4. Вычислительная техника. Сб. ст. МВТУ им. Баумана, 5. М., 1966.
5. А. С. Вайродян. Надежность вычислительных машин. М., Изд. МИФИ, 1966.
6. В. А. Ацюковский. Емкостные преобразователи перемещения. М., «Энергия», 1966.
7. В. А. Ацюковский, Электричество, № 9, 43, 1971.
8. Р. Д. Бай, И. З. Бреслав и др. Управление следящими электроприводами с применением цифровых устройств. М., «Энергия», 1969.
9. Я. М. Великсон. Функциональный преобразователь угла поворота в цифровой код, Авторск. свид. № 206167. Бюлл. изобр., № 24, 1967.
10. Я. М. Великсон, В. В. Хиценко. Многоканальный преобразователь «угол—код», Авторск. свид. № 260979. Бюлл. изобр., № 4, 1970.
11. А. Г. Коганов. Устройство для преобразования величины угла в цифровой код. Авторск. свид. № 283701, Бюлл. изобр., № 31, 1970.
12. А. М. Бамдас, Б. В. Беляев, Электричество, № 19, 1935.
13. В. Ф. Арховский. Схемы переключения аналоговых сигналов. М., «Энергия», 1970.
14. В. П. Котельников. Измерительная техника, № 7, 1963.
15. Л. Ф. Куликовский. Автоматические информационно-измерительные приборы. М., «Энергия», 1966.
16. С. Ф. Маликов, И. И. Тюрин. Введение в метрологию. М., Стандартгиз, 1966.
17. Б. И. Швецкий. Электронные измерительные приборы с цифровым отсчетом. М., «Техника», 1964.