

ГЕЛНОТЕХНИКА

Я. Т. ШЕРМАЗАНЫН, Р. Բ. АПАРИСИ

ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ СЛЕЖЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ
ТЕПЛОСИЛОВОЙ СТАНЦИИ (СТС)*

В в е д е н и е

Идея создания СТС, основанная на механизмах азимутально-зенитального типа, стала практически осуществимой только благодаря применению современных средств автоматизации.

Задачу автоматического слежения всех 1293 единичных отражателей и парового котла СТС за кажущимся движением солнца по небосводу — движением сложным и меняющим свои параметры в течение дня и со дня на день — возможно решить двумя принципиально различными путями:

- а) непосредственным индивидуальным автоматическим слежением за солнцем элементов гелнотехнической схемы СТС,
- б) программированным, т. е. наперед заданным, автоматическим движением за солнцем тех же элементов.

Схемы автоматического слежения за солнцем элементов СТС должны обладать большой точностью работы, так как управляемые оптические системы единичных отражателей относятся к длиннофокусным.

Большое количество одновременно работающих автоматических систем требует повышенной надежности и долговечности работы схемы. Работа автоматики должна происходить на открытом воздухе при меняющемся воздействии ветра и температурных условий (от -30° до $+40^{\circ}$). Установки должны быть защищены от дождя и снега, тумана, пыли и т. п.

Стоимость автоматики достигает 10—12% от общих капиталовложений, составляющих основную расходную статью экономического баланса станции. Поэтому устройства автоматики должны быть достаточно простыми и дешевыми, чтобы оправдать себя в общем комплексе технико-экономических показателей СТС.

Последнее соображение, как показал опыт проектирования, является одним из основных решающих моментов при выборе схемы

* Общая принципиальная схема построения и работа СТС в целом изложены в статьях

автоматизации, так как СТС создается в целях ее последующего массового применения.

Трудность одновременного разрешения поставленных выше задач очевидна.

Описываемые в последующем схеме автоматики далеко не исчерпывают всех проводимых работ и являются первыми, прошедшими лабораторные и полевые испытания, релейными схемами.

Переход от них к безрелейным схемам, находящимся в стадии проработок и стендовых испытаний, не представляет принципиальных трудностей.

В объем данной работы не включены вопросы программного управления, по которым еще не накоплен достаточный материал.

Все описанные схемы автоматики проверялись на солище в Армении, вблизи места где намечено сооружение первой СТС. Поэтому гелиотехнические отпранные данные относятся к указанному району.

Регулируемые параметры

В дальнейшем рассматривается автоматика единичного отражателя, расположенного на ведущей тележке одного из поездов станции, включая автоматику передвижения самой ведущей тележки, которые в совокупности охватывают все особенности движений гелиотехнических устройств СТС.

В последнем варианте схемы единичного отражателя 1957 года (рис. 1) кинематика зеркального отражателя состоит из трех автома-

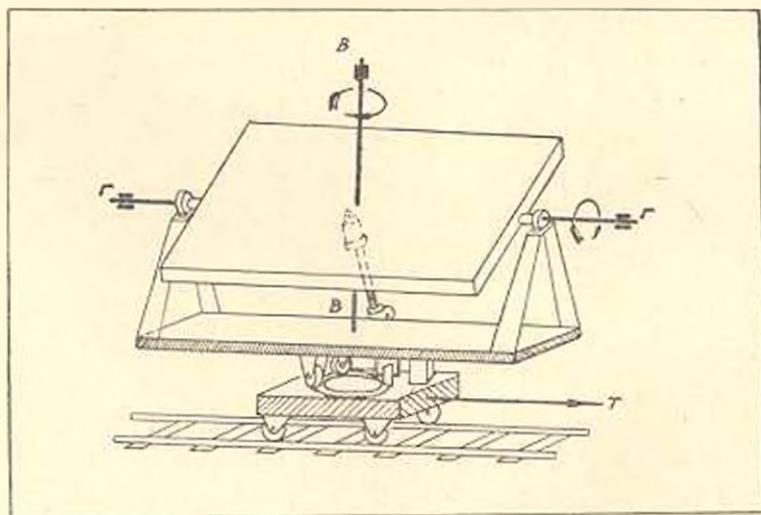


Рис. 1. Единичный отражатель по схеме 1957 г.

гически управляемых движений: горизонтального — азимутального передвижения тележки по рельсовым путям — направление T зениталь-

ного вращения отражателя вокруг горизонтальной оси „ГГ“ и азимутального вращения опорной плиты вокруг вертикальной оси „ВВ“.

Уравнения движения зеркала отражателя могут быть записаны в следующем виде (1, 4):

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sin \alpha \cos \delta}{\cos \alpha \cos \delta - \cos h} \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \cos \delta \frac{\sin h + \sin \theta}{\cos \alpha \cos \delta + \cos h} \quad (2)$$

$$\cos \alpha = \frac{\cos \delta \cos kt \sin \varphi - \cos \varphi \sin \delta}{\cos h} \quad (3)$$

где θ — угол между проекцией нормали к отражающей поверхности на горизонтальную плоскость и осью симметрии станции;

α — угол между осью симметрии станции и радиусом, проведенным к рассматриваемому отражателю;

δ — угол между отраженным лучем и горизонтальной плоскостью;

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{H}{R}, \text{ где } H \text{ — высота котла и } R \text{ — радиус поезда;}$$

h — высота солнца над горизонтом;

α — угол между нормалью к отражающей поверхности и горизонтальной плоскостью;

a — азимутальный угол солнца;

δ — угол солнечного склонения;

kt — часовой угол;

φ — широта местности.

Уравнение (3) не зависит от величины α , определяющей положение единичного отражателя на станции, т. е. азимутальное перемещение a одинаково для всех отражателей станции и котла. Это движение управляется специальными автоматами азимутального движения ведущих тележек поездов и котла.

Два движения отражателя вокруг осей „ГГ“ и „ВВ“, управляемые двумя автоматами, точно удовлетворяют этим уравнениям. Каждую из 3-х зависимостей (1), (2) и (3) самостоятельно обеспечивает отдельный автомат.

В уравнение (3) не входят величины θ и α , вследствие чего автоматы азимутального движения должны следить непосредственно за азимутом солнца и работать под действием прямого луча.

В уравнения (1) и (2) входит величина θ , определяющая положение отражателя по отношению к котлу. Ввиду того, что высота котла величина постоянная, автоматы, обрабатывающие углы θ и α , должны работать на отраженном луче.

Для работы автоматики особый интерес представляют скорости всех рассмотренных движений. Для этого продифференцируем уравнения (1), (2) и (3).

$$\omega_0 = \frac{d\theta}{dt} = f_1(t) \quad (4)$$

$$\omega_1 = \frac{dz}{dt} = f_2(t) \quad (5)$$

$$\omega_2 = \frac{da}{dt} = f_3(t) \quad (5)$$

Такие зависимости представлены на рис. 2, 3 и 4. Из них определяются максимальные значения скоростей:

$$\omega_0 \text{ макс.} = 5 \text{ /час, } \omega_1 \text{ макс.} = 6,35 \text{ /час,}$$

$$\omega_2 \text{ макс.} = 48,23 \text{ /час.}$$

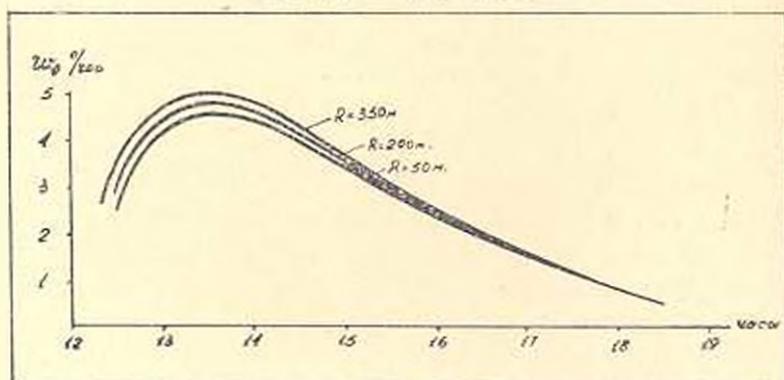


Рис. 2. Изменение скорости ω_0 по часам (при $\theta = 23^\circ 27' - 22$ июня).

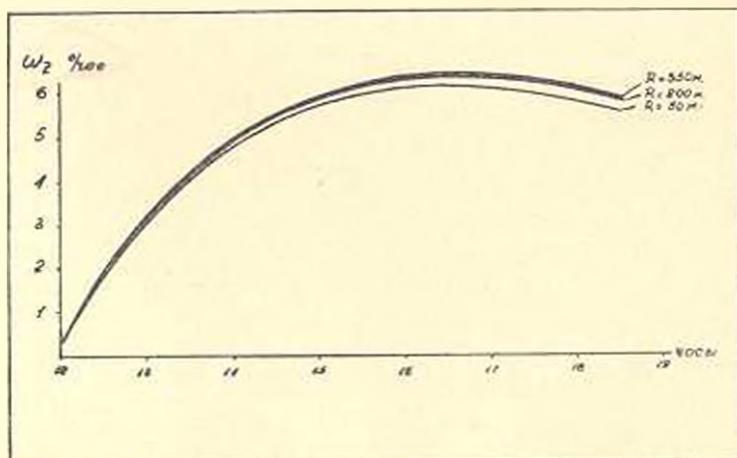


Рис. 3. Изменение скорости ω_2 по часам (при $\theta = 23^\circ 27' - 22$ июня).

Приведенные кривые показывают большие изменения регулируемых параметров (минимум-максимум), что утяжеляет работу солнечных автоматов.

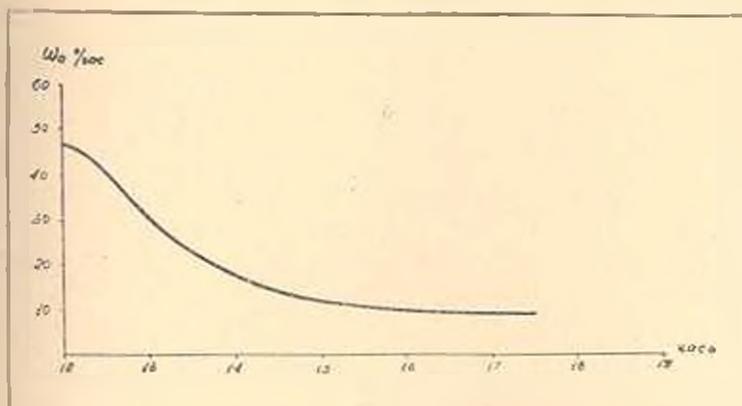


Рис. 1. Изменение скорости ω_0 по часам (при $\delta = 23^{\circ}27'$ — 22 июня).

На первой стадии создания СТС для расчетов автоматики был принят максимальный допуск отклонения системы следования от истинного положения на $\pm 2'$.

Тем самым максимальная дефокусировка лучей на котле, определяемая для отражателя на путях радиусом R макс. = 350 м при $\alpha = 45^{\circ}$, т. е. $\beta = 35,5^{\circ}$, составит:

$$\Delta = \pm \frac{350 \cdot \text{tg } 2'}{\cos 35,5} = \pm 0,25 \text{ м.}$$

Минимальная частота включений в минуту автоматов определится соответствующей максимальной скоростью и принятым допуском отклонения по формуле:

$$\nu_{\text{мин}} = \frac{\omega_{\text{макс.}}}{4} \text{ вкл./мин.} \quad (7)$$

Соответственные величины для трех движений:

$$\nu_{\text{мин}} = 1,25 \text{ вкл./мин.}; \quad \nu_{\text{мин}} = 1,59 \text{ вкл./мин.};$$

$$\nu_{\text{мин}} = 12,06 \text{ вкл./мин.}$$

Фотоэлектрические датчики СТС

Исследования, произведенные на гелноустановках различных типов показали, что для солнечной автоматики наиболее целесообразными являются фотоэлектрические датчики. Они обладают малой инерцией и реагируют непосредственно на световые сигналы — лучи солнца, объекта, за которым должна следить установка.

Можно привести некоторые основные требования, которым должны удовлетворять светочувствительные элементы датчиков СТС:

1. Работа в пределах освещенности от 5000 до 150000 лк.
2. Спектральная чувствительность в видимой области солнечного спектра, а также в его инфракрасной части. Последнее обстоя-

тельство создает предпосылки для работы автоматики от солнца покрытого тонкими облаками, дымкой в утренние и вечерние часы.

3. Стабильность световой и вольтамперной характеристик на всем диапазоне рабочей освещенности.

Большая удельная чувствительность.

Пропорциональность между фототоком и интенсивностью освещения.

4. Малый температурный коэффициент. Высокая устойчивость при значительных изменениях температуры: от -30° до $+45^{\circ}$. Возможность работы в полевых условиях при повышенной влажности.

5. Малые габариты.

6. Долговечность в эксплуатации.

7. Техничко-экономическая целесообразность применения, т. е. возможность получения от промышленности, или изготовления на месте, в требуемом количестве при относительно недорогой стоимости.

В первых конструкциях датчиков были использованы фотоэлементы с внешним фотоэффектом, в частности применяемые в киноаппаратуре цезиевые газонаполненные фотоэлементы типа ЦГ-3.

В последующем были опробованы селеновые фотоэлементы с внутренним фотоэффектом.

В обоих случаях была обнаружена большая утомляемость фотоэлементов в условиях солнечной освещенности, что приводило к значительному изменению их характеристики и нарушению стабильности регулирования.

У селеновых фотоэлементов это обстоятельство усугублялось сильной зависимостью их чувствительности от температурных изменений.

В настоящее время мы считаем наиболее целесообразным использовать в автоматах для солнечных установок выпускаемые отечественной промышленностью кадмиевые фотосопротивления [5, 6]. На последних моделях фотоэлектрических датчиков СТС применялись фотосопротивления типа ФС-К2, обладающие высокой удельной чувствительностью — до 2500 $\mu\text{ка}/\text{л.м. в}$. При среднем температурном коэффициенте фототока в интервале температур $0^{\circ} \pm 40^{\circ}\text{C}$, всего 0,12% на $^{\circ}\text{C}$ и максимуме чувствительности в области световых волн длиной 0,52 \pm 0,6 $\mu\text{к}$.

Малый температурный коэффициент предопределил выбор фотосопротивлений типа ФС-К2, хотя по удельной чувствительности и спектральной характеристике фотосопротивления типа ФС-К1 обладают несколько лучшими показателями.

Кратность изменения сопротивления ФС-К2 на солнце достигает величины 100 и выше, однако удельная чувствительность при этом падает в 5—10 раз.

Световая энергия в отраженном пучке света, который направляется на фотосопротивление, распределяется не равномерно (7), а по кривой подобной изображенной на рис. 5. Используя в датчике узкий

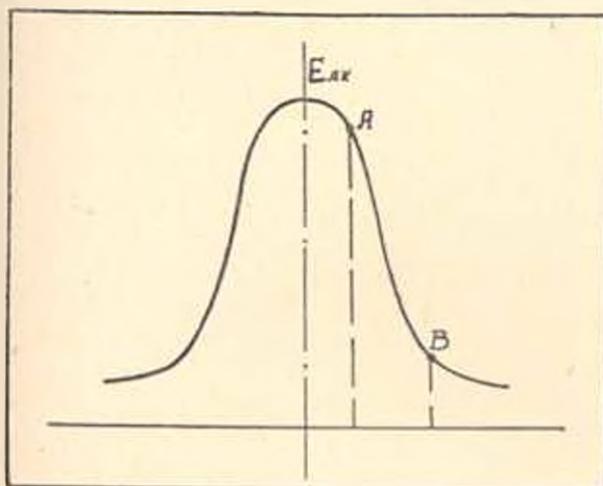


Рис. 5. Распределение световой энергии и отражения в пучке света.

пучок света, возможно сосредоточить его работу в области от точки А до точки В, где небольшое перемещение пучка света вызывает большое изменение освещенности, а следовательно и фототока.

Сочетание всех отмеченных выше свойств фотосопротивлений типа ФС-К2 обеспечили достаточно большую точность работы системы слежения.

Принципиальная оптическая схема датчиков СТС показана на рис. 6. Она работает следующим образом.

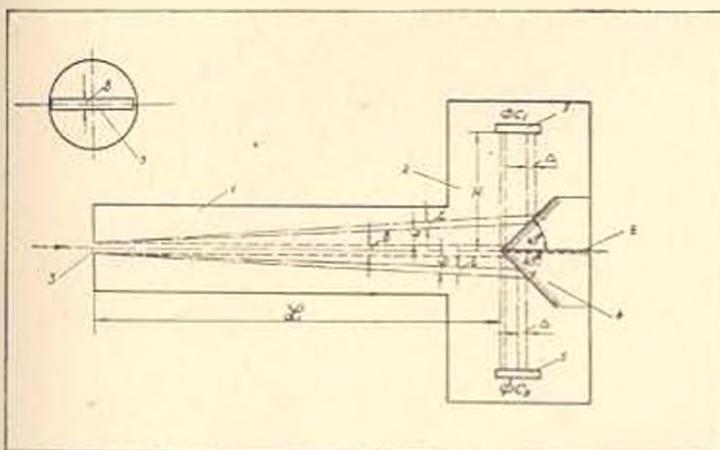


Рис. 6. Принципиальная оптическая схема датчика: 1—коллимационное устройство, 2—короб, 3—щелевая диафрагма, 4—призма, 5—фотосопротивление, 6—визирующее отверстие.

Луч солнца, проходя через щелевую диафрагму, расположенную в начале коллимационного устройства, попадает на грань зеркальной призмы, установленной в его конце. Отразившись, луч делится на две части, освещающая фотосопротивления ΦC_1 и ΦC_2 . Последние включены каждое в цепь одной из двух противоположно-действующих об-

моток n_1 и n_2 поляризованного реле РП-5. При равенстве световых потоков, падающих на оба фотосопротивления, что соответствует прицельному направлению единичного отражателя, значения сопротивлений цепей равны. По обмоткам n_1 и n_2 текут равные, но противоположно направленные токи, вследствие чего подвижной контакт реле РП-5 сохраняет нейтральное положение. Когда же, вследствие отклонения солнечного луча, одно из фотосопротивлений освещается большим световым потоком, сопротивление его падает, в цепи одной обмотки возникает большой фототок и магнитная система реле РП-5 выводится из состояния равновесия — оживляет цепи промежуточных реле или других усилительных устройств. Последние, срабатывая, включают в нужную сторону реверсивный электродвигатель, соединенный передачей с механизмом, изменяющим положение отражателя. Тем самым восстанавливается прицельное направление и равенство световых потоков, освещающих ΦC_1 и ΦC_2 . Применение дифференциальных датчиков обеспечивает с одной стороны большую чувствительность работы следящих систем, а с другой стороны — создает предпосылки для длительной стабильной работы, предупреждая расстройство под влиянием утомляемости фотосопротивлений.

Покажем ход расчетов и соотношения основных параметров датчиков. Примем, что при отклонении лучей солнца в датчике на угол ε освещаемая площадь ΦC_1 увеличивается по ширине на Δ , а освещаемая площадь ΦC_2 уменьшается по ширине на Δ (рис. 6). Величину Δ можно определить по приближенной формуле:

$$\Delta = (L + H) \operatorname{tg} \varepsilon, \quad (8)$$

где L — расстояние от входного отверстия до грани призмы;

H — расстояние от грани призмы до фотоэлемента.

Формула (8) позволяет вычислить значения освещаемых площадей F , ΔF , и соответственно $F_1 = F + \Delta F$ и $F_2 = F - \Delta F$.

При этом задаются требуемой точностью слежения, т. е. значением допустимого угла отклонения $\varepsilon_{\text{доп}}$.

Напишем соотношения для перехода к фототокам I_1 и I_2 в цепях датчика:

$$I_1 = K \cdot E \cdot F_1 \cdot v = K \cdot E (F + \Delta F) v, \quad (9)$$

$$I_2 = K \cdot E \cdot F_2 \cdot v = K \cdot E (F - \Delta F) v, \quad (10)$$

где E — расчетная величина рабочей освещенности на поверхности фотосопротивления в лк;

K — удельная чувствительность фотосопротивления в мкА/л.к. , взятая для соответствующего режима;

v — напряжение на зажимах фотосопротивления в вольтах.

Ток срабатывания дифференциальной системы I_0 связан с токами I_1 и I_2 уравнением:

$$I_0 = I_1 - I_2 \quad (11)$$

обозначим:

$$m = \frac{F + \Delta F}{F - \Delta F} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{I_1}{I_2} \quad (12)$$

Тогда, после несложных преобразований можно прийти к основным связующим формулам:

$$\Delta F = \frac{I_0}{2KEv} \quad (13)$$

$$F = \left(\frac{m+1}{m-1} \right) \frac{I_0}{2KEv} \left| \frac{b}{2} + (L+H) \operatorname{tg} \varphi \right| l, \quad (14)$$

где b - ширина щели;

l - длина светочувствительного слоя фотосопротивления (обычно 3,5 ÷ 4 мм);

φ - $16'$ - половина видимого угла диаметра солнца.

Датчики СТС, как и вообще все датчики гелиоустановок, выполняются двух видов:

1. с оптической системой, работающей от отраженного луча солнца, и

2. воспринимающие прямой луч солнца.

Датчики первого типа служат для воздействия на гелиотехнические устройства с целью отражения лучей солнца в заданном направлении.

На единичных отражателях СТС они применены для управления зенитальным и азимутальным вращением отражателя, т. е. для обработки углов z и ψ (см. формулы 1 и 2). Общий вид такого датчика показан на снимке (рис. 7).

Коллимационное устройство датчика выполнено в виде трубы вращающейся вокруг горизонтальной оси и шарикоподшипниках. Прицельное направление трубы регулируется двумя винтами, а устойчивость положения достигнута грузом, подвешенным снизу. Разница датчиков зенитального и азимутального вращения заключается в расположении входной щели и, соответственно, грани призмы: у первых расположение горизонтальное, у вторых — вертикальное. Ще-



Рис. 7. Датчик зенитального вращения.

ли - небольшой длины 15—20 мм, шириною около 1 мм.

Датчики второго типа служат для непосредственного слежения за солнцем. На СТС они применяются для азимутального передвижения поездов-тележек с отражателями по кольцевым рельсам во-

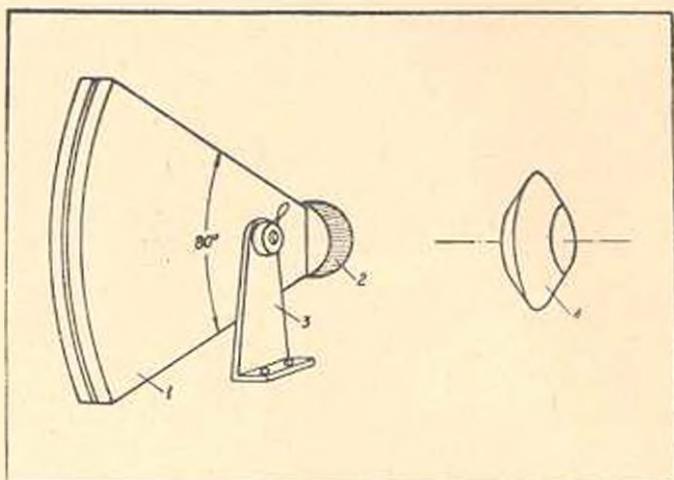


Рис. 8. Датчик азимутального передвижения: 1—коллимационный рaструб, 2—короб, 3—стойка, 4—зеркальная призма (увеличена).

круг котла, т. е. для обработки угла α (см. формулу 3). Общий вид такого датчика показан на рис. 8.

Оптическое устройство датчика должно обеспечивать отражение солнечных лучей на оба фотосопротивления при изменяющейся в течение дня высоте солнца. Поэтому коллимационное устройство его выполнено в виде сектора с узкой вертикальной щелью по всей входной поверхности. Угол сектора $\alpha_{\text{сект}} = 80^\circ$, а зеркальная призма была изготовлена в виде двух усеченных конусов. Линия окружности, соединенных вместе оснований этих конусов и явилась рабочей гранью призмы датчика.

Экспериментальные установки для моделирования автоматки единичных отражателей СТС

Параллельно с разработкой схем автоматки управления единичными отражателями СТС и конструированием отдельных ее элементов велась практическая проверка работы на моделях и опытных конструкциях.

Ниже приводится часть результатов экспериментальных исследований.

Малая лабораторная модель 1956 г.

Малая лабораторная модель, смонтированная на основании размером 560×600 мм, имитировала только одно, наиболее сложное, движение отражателя — зенитальное вращение зеркала.

Проведенные опыты показали следующее:

1. Точность следящей системы, при непрерывной работе, достигает $2'$.

2. Частота включений составила в среднем 12–15 *вкл./мин.*

3. Зона нечувствительности (начиная с того момента, когда токи в обоих цепях освещенных фотосопротивлений равны) колеблется в пределах 5–6 секунд. Этот отрезок времени в угловых единицах равноценен отклонению отраженного луча на $1' 15'' - 1' 30''$.

Затемнение щели датчика на 5–6 минут после достижения равновесного состояния не вызывало нарушения устойчивости слежения.

Опытный единичный отражатель СТС конструкции 1956 года

Опытный единичный отражатель был изготовлен в натуральную величину с суммарным размером площади всех 28 зеркал $3 \cdot 4 = 15 \text{ м}^2$. Его общий вид с лицевой стороны показан на рис. 9.

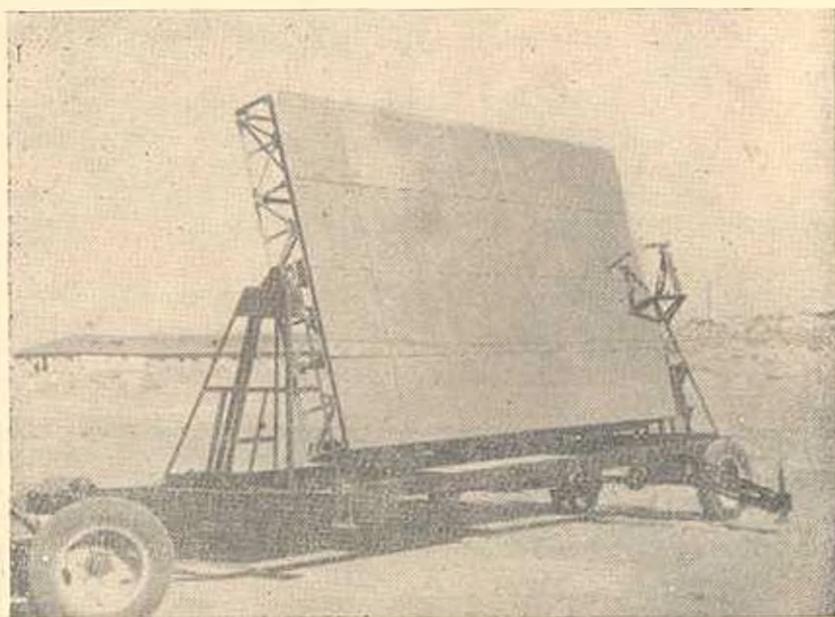


Рис. 9. Общий вид опытного единичного отражателя 1956 г.

Азимутальное движение тележки осуществлялось ручным приводом.

Автоматическое управление азимутальным вращением отражателя осуществлялось дифференциальным фотоэлектрическим датчиком, установленным на кронштейне перед зеркалом, что ясно видно на фотографии.

Усилительно-коммутационные устройства были приняты релейного типа, аналогичные обработанным на малой лабораторной модели. Испытания дали следующие результаты:

1. Наблюдения за отклонениями зайчика на экране по вертикали, во время работы автоматики, показали заложенную в схему точность слежения, равную $2'$.

2. Осциллографирование позволило определить среднюю частоту включений, составившую 29 *вкл./мин.*

3. Осциллограммы показали значительную вибрацию контактной системы релейной схемы усиления, работавшей на переменном токе, составившую по продолжительности до 20% фиксированного времени работы. Переход на промежуточное реле постоянного тока с дополнительной выдержкой времени 0,3 секунды при размыкании контактов, осуществляемой посредством конденсаторов подключаемых параллельно реле, позволил ликвидировать указанный недостаток.

4. На базе релейно-контактной схемы можно и дальше вести углубленные разработки. Одновременно следует уделить большее внимание разработке и экспериментальной проверке экономичных схем бесконтактного управления.

5. Необходимы дополнительные проверки устойчивости схем на длительность работы.

6. Метод моделирования автоматки и перенесения его результатов в натуру на опытный отражатель полностью себя оправдал.

Лабораторная модель 1957 г. единичного отражателя с тремя вращениями

Модель, изготовленная в 1,5 натуральной величины, показана на рисунке 10. Модель имитировала вращение отражателей вокруг котла движением по кольцевым рельсам, радиусом $R=10$ м.

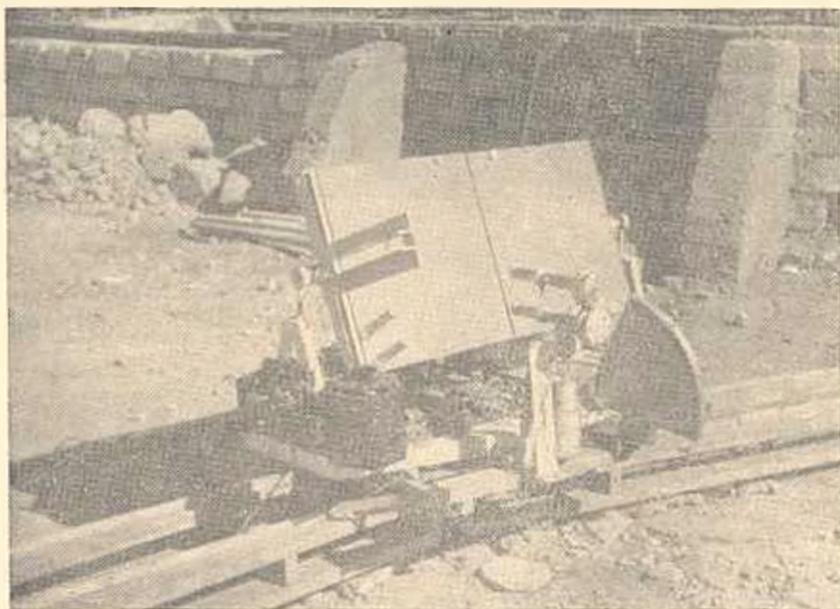


Рис. 10 Модель единичного отражателя 1957 г. во время испытаний.

Автоматическое управление приводами 3-х движений было осуществлено с помощью трех датчиков. Два из них, работающие на отраженном от зеркала солнечном луче, закреплены на общем установочном приспособлении и сохраняют одно и то же заряженное отрегулированное положение, благодаря подвесной системы с контргрузом.

Третий датчик, управляющий азимутальным передвижением тележки, работает на прямом солнечном луче и имеет коллимационный раструб в виде сектора.

Характеристики фототоков и количество включений приводов были зафиксированы на осциллограмме. Одновременно велись визуальные наблюдения за перемещением изображения на экране.

Результаты обработки измерений показали, что автоматы такого типа обеспечивают фокусировку отраженного луча с точностью до $2'$.

Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского
АН СССР

Институт энергетики и гидравлики
АН Армянской ССР

Поступило 12.VIII 59

Հ. Տ. ՇԵՐՄԱԶԱՆՅԱՆ, Խ. Խ. ԱՊՈՒՅԻՍ

ԱՐԵՎԱԿԱՆԱՅԻՆ ԶԵՐՈՒՅԻՆ ԿԱՅԻՆԻ ՀՆՏԵՎՈՂ,
ԱՎՏՈՄԱՏԻԿԱՅԻ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐԸ

Ս. մ ֆ ո ֆ ու մ

Հողվածում շարադրվում և անդհանրացվում է արեգակնային ջերմատու-
մային կայանի նստակ անդրադարձիչի ավտոմատիկայի մշակման ու նկատա-
զոտման փորձը, որը անդհանրապես արևին նեռակելու տեխնիկայի համար մեծ
նկատաբրքրություն է ներկայացնում:

Ավտոմատիկ կոնտնապորման պարամետրերի և նրա աշխատանքային
պայմանների բազանարման հիման վրա, շարադրվում են այն պահանջները,
որոնք պետք է ներկայացվեն ավտոմատիկայի առանձին էլեմենտներին:

Նկարագրվում է ֆոտոէլեկտրական զինիթային և ազիմտտային տվիչ-
ների նախագծման տեսությունը և բերվում են համապատասխան որինակներ:
Արևնեռակ արվում են ավտոմատիկայի դաշտային և յարտաառք փորձար-
կումների արդյունքները, որոնք կաատարվել են ինչպես մոդելների, այնպես էլ
իրական առանձին անդրադարձիչի վրա:

Հողվածում շարադրվում են ընդհանուր նեռակությունների և նկատզո գի-
տա-նեռազոտական աշխատանքների հիմնական սղղությունը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Баум В. А., Алариси Р. Р. и Гарф В. А. Солнечные установки большой мощности. Теплоэнергетика, 6, 1956.
2. Гарф В. А. Солнечная теплосиловая станция в Араратской равнине. Труды научно-технической конференции по теплотехнике. Ереван, 1959.
3. Шермазанян Я. Т. Автоматика солнечной теплосиловой станции, там же

4. *Гарф Б. А.* Механизмы вращения подвижных солнечных установок. Использование солнечной энергии. Сб. 1, изд. АН СССР, 1957.
5. *Коломиец Б. Т.* Фотосопротивления. АН СССР. Институт полупроводников, 1956.
6. *Коломиец Б. Т. и Олеск А. О.* Характеристики фотосопротивлений из поликристаллического сульфида кадмия. „Электричество“, 6, 1956.
7. *Апариси Р. Р.* Экспериментальная установка для получения высоких температур. Использование солнечной энергии. Сб. 1, изд. АН СССР, 1957.