

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ ОБЛУЧАТЕЛЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600

С. А. Авдушев,* Г. С. Голубчин, Ю. Г. Перченюк *

Описываются основные режимы работы облучателя радиотелескопа РАТАН-600. Приводятся результаты разработки и исследования системы автоматизированного управления облучателем.

The main operating conditions of the feed of the radiotelescope RATAN-600 are described. The results of elaboration and investigation of this automatic control system are presented.

Управление диаграммой направленности радиотелескопа связано, кроме перемещения главного зеркала, с движением облучателя или установкой его в заданное положение. Известно, что облучатель РАТАН-600 обладает шестью степенями свободы (три линейных и три вращения).

В данной работе рассматривается система автоматизированного управления приводом облучателя (САУПО) по двум линейным степеням свободы (перемещение по направляющим рельсам и перемещение каретки облучателя в направлении, перпендикулярном к оси антенны) в соответствии с заданной программой.

При работе в определенном азимуте главное перемещение облучателя производится по радиальным путям. При изменении угла места космического источника (КИ) от зенита до горизонта облучатель смещается из центра антенны на расстояние, равное приблизительно 150 м, расчет радиальной координаты производится по формулам [1]. Точность установки по радиусу связана с появлением на раскрыве антенны квадратичной фазовой ошибки и потерей эффективной площади [2].

$$\Delta_{\text{дон}} \leq 0.4\lambda, \quad (1)$$

где $\Delta_{\text{дон}}$ — ошибка установки, мм; λ — длина волны наблюдения, мм. Зависимость (1) дает потерю эффективной площади, равную 5%.

Перемещение каретки облучателя приводит к смещению диаграммы в горизонтальном направлении. Точность установки каретки определяется требованиями по точности для координатных измерений, которые равны $\sim \lambda/100$.

Однако кроме установки облучателя в заданное положение САУПО должна обеспечивать также режимы сопровождения КИ с целью увеличения чувствительности антенны, возможности исследования быстропеременных источников и т. п.

Кратковременное сопровождение КИ можно осуществить в зоне допустимой абберации главного зеркала с потерей усиления антенны до 50% смещением каретки для сопровождения по азимуту или перемещением облучателя по радиальным путям для слежения по высоте [3] со скоростями, которые определяются выражениями:

$$v_{\text{рад}} \approx 20.9 \sin h \cdot \sin A \cdot \cos \varphi (1+k)/(1+\cos^2 h), \quad (2)$$

где $v_{\text{рад}}$ — скорость облучателя по радиальным направляющим, мм/с; h — угол места КИ; A — азимут КИ; φ — широта места; $k=0.083$;

$$v_{\text{кар}} \approx 7.27 \cdot 10^{-5} (R-F) (\cos \delta \cdot \cos \tau \cdot \cos A + \cos h \cdot \sin^2 h \cdot \sin \varphi) / \cos h, \quad (3)$$

* Сотрудник ОКБС.

где $v_{кар}$ — скорость каретки, мм/с; δ — склонение источника; τ — часовой угол; $R=288\ 000$ мм — радиус исходной окружности; F — фокусное расстояние горизонтального сечения.

Здесь также возможен режим «скольжения», при котором скорость облучателя (1) и скорость каретки (2) постоянны в пределах зоны абберации и равны ~ 1.03 средней скорости $v_{кар}$ или $v_{рад}$.

Длительное сопровождение КИ возможно в области $\pm 30^\circ$ от Юга при использовании перископа и круговых путей [4].

В этом случае скорость облучателя определяется по формуле

$$v_{круг} \approx 7.27 \cdot 10^{-5} R_1 \cos \delta \cdot \cos \tau / \sqrt{1 - \sin^2 \tau \cdot \cos^2 \delta}, \quad (4)$$

где $v_{круг}$ — скорость облучателя по круговым путям, мм/с; $R_1=161\ 250$ мм — радиус дуги окружности, описываемой фазовым центром облучателя.

С учетом анализа режимов перемещения облучателя и каретки были сформулированы требования к САУПО (табл. 1).

В табл. 1 ϵ_d — допустимая ошибка по положению. Допустимые отклонения скоростей перемещения каретки и облучателя приняты не более $\pm 10\%$ от установленного значения, допустимые ускорения на механических звеньях САУПО — не более 0.1 мм/с, время разгона до заданной скорости скольжения каретки — не более 0.5 с.

Облучатели радиотелескопа имеют три модификации, которые отличаются друг от друга размерами и геометрией вторичного зеркала, а также другими конструктивными особенностями [5]. Вес облучателей колеблется от $50 \cdot 10^3$ до $120 \cdot 10^3$ кг, вес каретки — от 2500 до 3000 кг, за исключением зенитного облучателя.

ТАБЛИЦА 1

Режим	Облучатель			Каретка		
	v_{min} , мм/с	v_{max} , мм/с	ϵ_d , мм	v_{min} , мм/с	v_{max} , мм/с	ϵ_d , мм
Прохождения *	—	320	± 1	—	200	± 0.1
Кратковременного сопровождения	0.5	16	± 1	0.33	16	± 0.5
Длительного сопровождения	1	16	± 1	0.5	16	± 0.5
Установочный	—	320	—	—	200	—
Юстировка	—	0.5	—	—	0.5	—

* Режим позиционирования.

В данной работе сделана попытка создать унифицированную САУПО для всех модификаций облучателя (кроме каретки зенитного облучателя). При разработке САУПО также учитывались деформации термического характера радиальных и дуговых путей. В результате исследований деформаций рельса в зависимости от температуры и погоды показано, что удлинение рельса происходит достаточно плавно (при максимальной скорости линейной деформации «скачки» не более 0.01 мм), максимальная скорость перемещения рельса составляет 2 мм/ч. На рис. 1, 2 показаны зависимости удлинения рельса Δl от температуры рельса и времени суток, на рис. 3 — суточный ход температуры рельса. С учетом термической деформации рельсов при наблюдениях в миллиметровом диапазоне волн следует корректировать положение облучателя на рельсах не реже 2 раз в час. В этом случае наиболее простым способом определения положения облучателя является измерение с опорой на геодезическую сеть по сравнению с относительными измерениями положения облучателя и главного отражателя.

Рассмотрим блок-схему САУПО (рис. 4), разработанную с учетом технических требований к режимам наблюдений и особенностям измерения положения облучателя. САУПО является двухканальной следящей системой: первый канал — следящая система перемещения облучателя, второй канал — следящая

система перемещения каретки. В нее входят: ЭВМ «Электроника-100И» с устройствами ввода—вывода (УВВ); МПУК «Модифицированный многоканальный преобразователь угол—код» в стандарте КАМАК [6]; КУ — крейт управления, со-

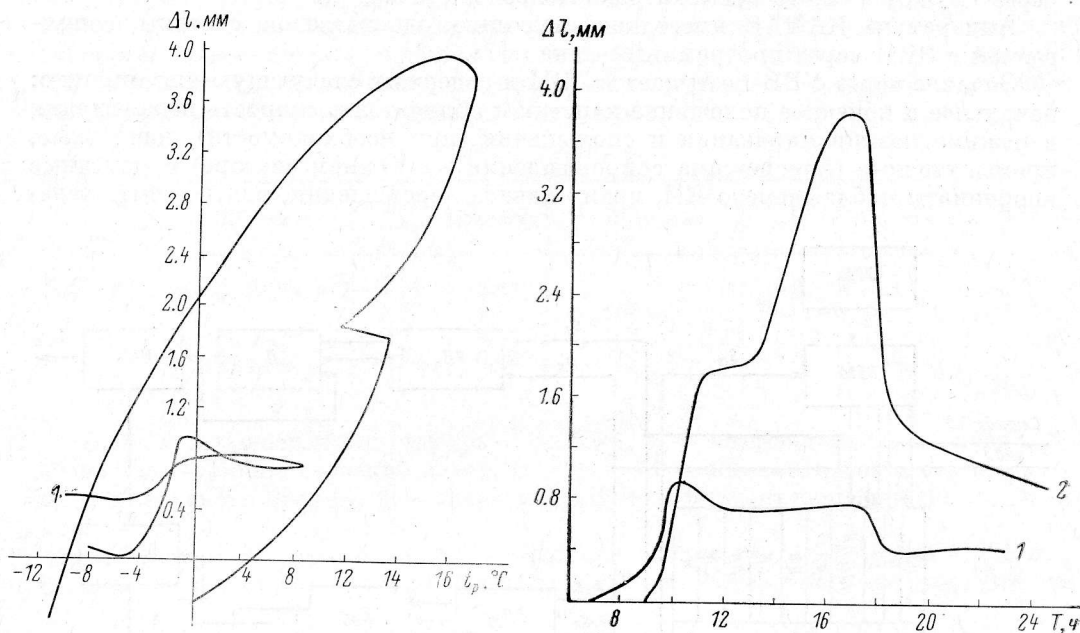


Рис. 1. Зависимость удлинения рельса Δl от температуры рельса. Репер 6.

1 — 18.03.74; 2 — 20.03.74.

Рис. 2. Зависимость удлинения рельса Δl от времени суток. Репер 6.

1 — 18.03.74; 2 — 20.03.74.

стоящий из модулей: ВВ — «Входные ворота», Ч — «Часы», У — «Усилитель», МЦАП — «Многоканальный цифро-аналоговый преобразователь», РК — «Ре-

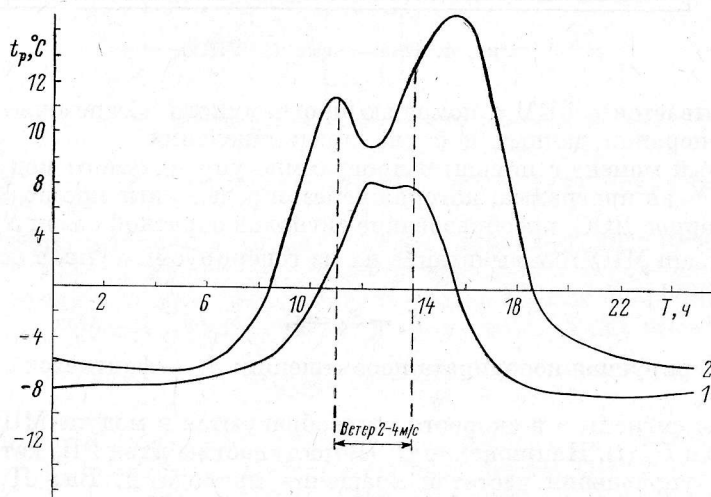


Рис. 3. Суточный ход температуры рельса. Репер 6.

1 — 18.03.74; 2 — 20.03.74.

гистр кнопочный», ДВ — «Драйвер ветви», СК — «Системный контроллер», ПК — «Программный канал», СМ — «Согласователь магистрали», К — «Крейт-контроллер»; РОУ — «Реперное отсчетное устройство»; РР_к — «Регулятор положения каретки»; РР_{об} — «Регулятор положения облучателя»; П_к — «Привод каретки»; П_{об} — «Привод облучателя»; ИМ_к — «Исполнительный механизм

каретки»; ИМ_{об} — «Исполнительный механизм облучателя»; ДОС_к — «Датчик обратной связи каретки»; ДОС_{об} — «Датчик обратной связи облучателя».

Работа САУПО синхронизируется с работой САУ кругового отражателя через службу точного времени радиотелескопа и модуль Ч.

Аппаратура КАМАК имеет конфигурацию одноветвевой системы, сопрягаемой с ЭВМ через программный канал [7].

Задание через УВВ поступает в ЭВМ и содержит следующую информацию: начальное и конечное положение каретки и облучателя, скорость перемещения в режиме позиционирования и скольжения (при необходимости), начальные, промежуточные (для режима сопровождения на Южном секторе) и конечные координаты наблюдаемого КИ, время начала перемещения, вид режима. Зада-

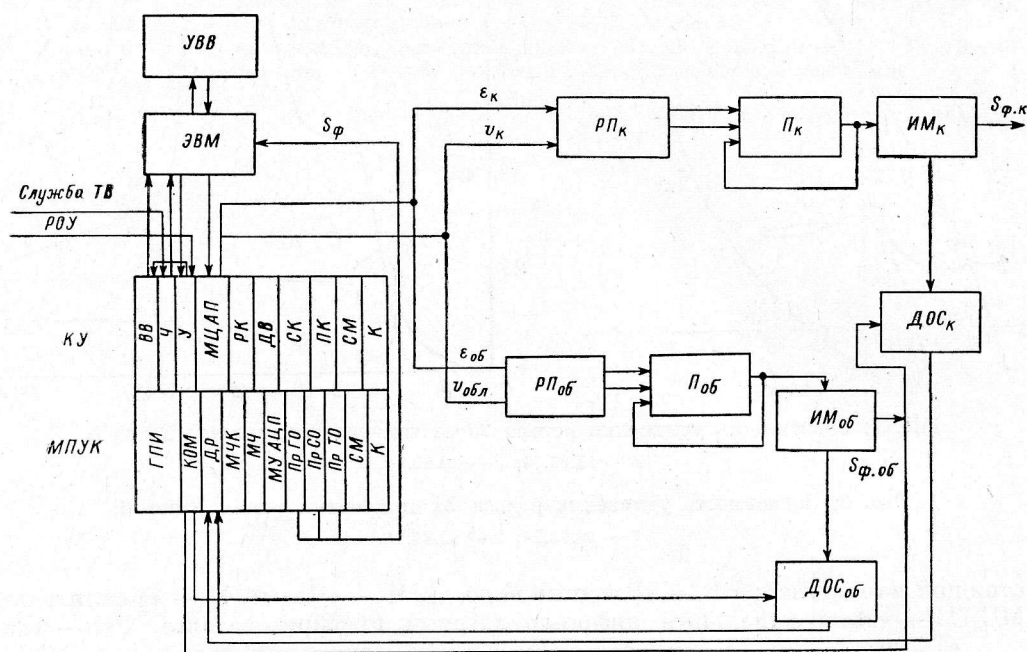


Рис. 4. Блок-схема САУПО.

ние обрабатывается в ЭВМ с помощью программного обеспечения, состоящего из блока генерации данных и блока предвычислений.

В заданный момент с помощью программно-управляемого модуля начинает работать рабочая программа, которая через определенные промежутки времени производит опрос ДОС, преобразование сигналов обратной связи S_ϕ в цифровой код при помощи МПУК и вычитание их из генерируемых управляющих сигналов положения

$$S_s - S_\phi = \epsilon,$$

где S_s — генерируемая координата перемещения; S_ϕ — фактическая координата перемещения.

Цифровые сигналы ϵ и скорости v преобразуются в модуле МЦАП в напряжения $U_\epsilon(t)$ и $U_v(t)$. Напряжение $U_\epsilon(t)$ поступает на вход РП, который формирует сигнал управления частотой вращения привода П. Вал П присоединен к ИП, который перемещает облучатель или каретку. Для повышения точности в РП вводится сигнал компенсации $U_k(t)$ из МЦАП, пропорциональный генерируемой скорости $v(t)$. Корректировка S_ϕ производится с помощью РОУ, модуля У, модуля ВВ. В САУПО в качестве П применены приводы типа ЭТЭС.

Кинематическая схема и параметры ИМ определяются конструкцией модификации облучателя.

Структурная схема одного канала САУПО приведена на рис. 5, где $F_{эл}$ — нелинейный динамический коэффициент передачи электропривода; $F_{н.м}$ — не-

линейный динамический коэффициент передачи исполнительного механизма; K_k — коэффициент передачи цепи компенсации; K_y — коэффициент усиления регулятора; $K_{осп}$ — коэффициент обратной связи по положению; T_m — период дискретности ЭВМ; T_ϕ — постоянные фильтров; T_o — постоянная времени регулятора; T_k — постоянная времени цепи компенсации; U_p — сигнал задания скорости; U_s — сигнал задания положения; F_c — усилие сопротивления; M_c — момент сопротивления; p — оператор дифференцирования; ω_d — частота вращения электродвигателя; КИ — ключ.

ТАБЛИЦА 2

Величина	Облучатель	Каретка	Величина	Облучатель	Каретка
$K_{ИМ}, 10^{-3}$ м/рад	1.02	0.63	ξ	0.1	0.1
η	0.7	0.7	$m, 10^3$ кг	70—120	3
$2b, 10^{-3}$ м	0.2	0.05	$F_c, \text{кН}$	0, 0.5	—
$c, 10^9$ Н/м	0.85	0.62	$F_o, \text{кН}$	7.5	0.6

В табл. 2 приведены параметры ИМ: $K_{ИМ}$, η — коэффициент полезного действия, $2b$ — кинематический зазор, c — жесткость кинематической цепи, F_o — величина сухого трения, ξ — безразмерный коэффициент демпфирования, m — масса.

Параметры $K_{ИМ}$, η , m , F_c и F_o являются заданными, параметры c , $2b$ и ξ выбраны в результате синтеза САУПО [8, 9] в соответствии с требованиями

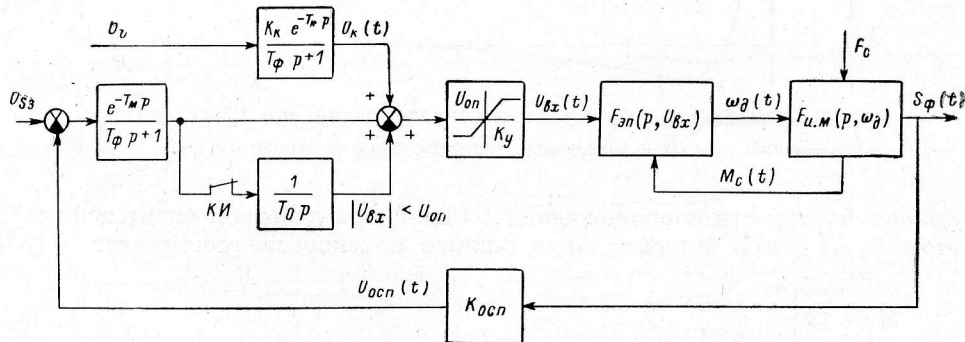


Рис. 5. Структурная схема одного канала САУПО.

табл. 1, при этом собственная частота ИМ облучателя принята равной 16.4, каретки — 23 Гц.

С целью минимизировать ошибку по положению в установившихся режимах для САУПО выбран пропорционально-интегральный закон управления [8], а для повышения динамической точности введен сигнал скоростной компенсации $v_x(t)$ [9]. Передаточная функция регулятора САУПО имеет вид

$$W_p(p) = K_y^* \frac{T_o p + 1}{T_o p}. \quad (5)$$

Регулятор имеет переменную структуру для обеспечения устойчивости во всем диапазоне управляющих и возмущающих воздействий [10, 11]. При сигналах, превышающих $v_{он}$ и вызывающих насыщение в приводе перемещения, ключ КИ (рис. 5) прерывает интегрирование и снижает порядок астатизма САУПО.

Для предварительной оценки возможности обеспечения требуемых свойств системы и определения настроенных параметров РП проведен синтез САУПО методом логарифмических частотных характеристик [11]. Параметры САУПО приведены в табл. 3, где ω_c — частота среза разомкнутой САУПО.

Уточнение параметров САУПО с учетом нелинейностей системы (рис. 5) выполнено на ЭВМ «Минск-32» с помощью системы автоматизированного мо-

делирования для анализа динамики систем автоматического управления САУПО [12]. В результате проведенного моделирования параметры САУПО (табл. 3) были скорректированы: $K_y=0.5$, $T_0=0.5$ с, $\omega_c=5$ с⁻¹, при этом перерегулирование составило 23%, а время переходного процесса $t_p=1.3$ с.

ТАБЛИЦА 3

САУПО	K_y	T_0 , с	ω_c , с ⁻¹
Облучатель	1.2	0.15	12
Каретка	0.52	0.12	17

В режиме сопровождения (рис. 6) без возмущений по нагрузке максимальная ошибка не превышает 0.53 мм, а установившаяся ошибка не превышает 0.01 мм. Исследование возмущений по нагрузке на точность САУПО проводилось при

скачкообразном набросе и сбросе нагрузки $F_c=15$ кН с длительностью действия нагрузки 1 с. На рис. 7 представлены кривые скорости $v(t)$ и ошибки $\varepsilon(t)$ для

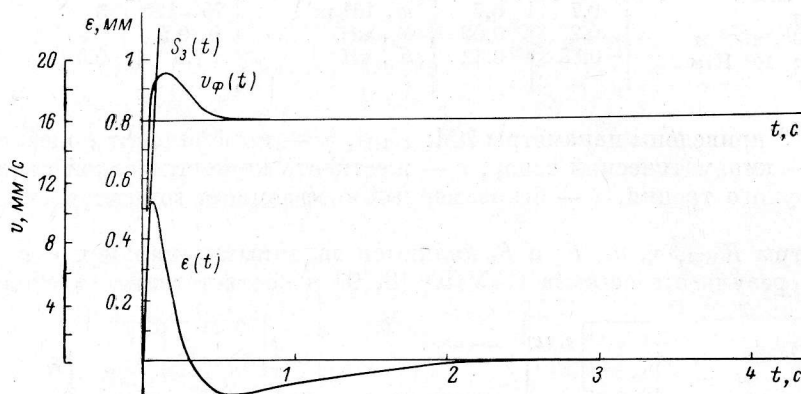


Рис. 6. Зависимость $\varepsilon(t)$ в режиме сопровождения при $F_0=7.5$ кН.
 ε — ошибка; $v_{\phi}(t)$ — фактическая скорость; $S_3(t)$ — заданный путь.

максимальной скорости сопровождения 16 мм/с при действии возмущения F_c , при этом $F_0=7.5$ кН. Максимальная ошибка по скорости составляет $\pm 15\%$

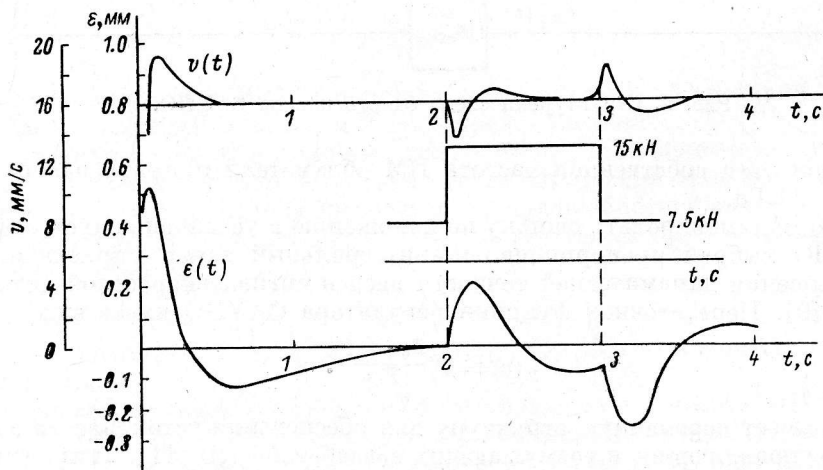


Рис. 7. Влияние нагрузки на точность САУПО в режиме сопровождения при $F_0=7.5$ кН.

от установившегося значения скорости соответственно при набросе и сбросе нагрузки, а максимальное приращение ошибки равно 0.22 мм.

Влияние периода дискретности одного канала управления на устойчивость и точность САУПО проверялось при моделировании с помощью экстраполятора нулевого порядка, включенного на входе РП. При исследовании период дискре-

тизации менялся от 0.01 до 0.05 с. Проверка проводилась в режиме сопровождения на скорости 16 мм/с с одновременным возмущением по нагрузке (рис. 8). При увеличении периода дискретности до 0.05 с влияние дискретности незна-

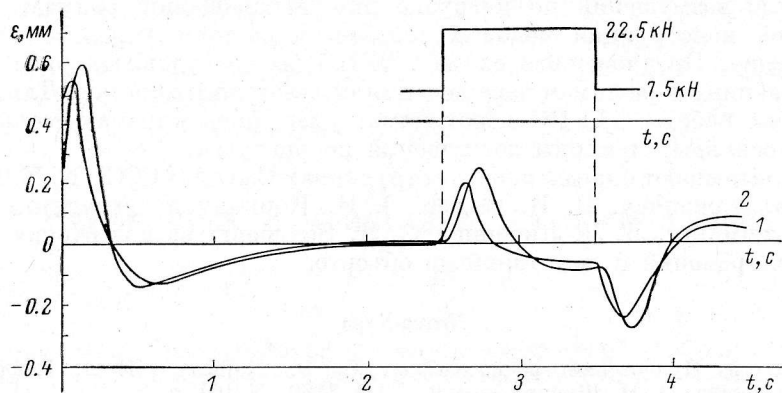


Рис. 8. Влияние нагрузки и периода дискретизации Δt на точность и устойчивость САУПО в режиме сопровождения при $v=16$ мм/с, $F_0=7.5$ кН.

Период дискретизации, с: 1 — 0.01, 2 — 0.05.

чительно. Испытание САУПО было проведено на облучателе № 2 при движении по рельсовому пути. Измерения жесткости и собственных частот привода не проводились ввиду отсутствия технических средств. Наиболее существенным

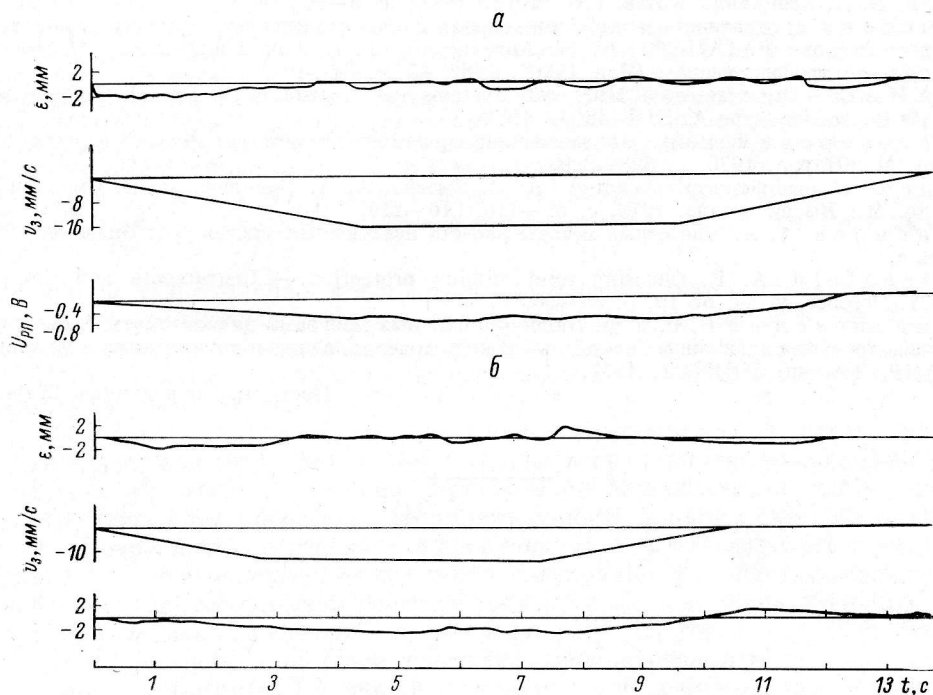


Рис. 9. Осциллограммы ошибки слежения по положению $\varepsilon(t)$ скорости задания $v_s(t)$ и выходного сигнала регулятора РП $U_{\text{РП}}(t)$ по результатам испытаний.

Скорость, мм/с: а — 16, б — 10.

представляется измеренная величина кинематического зазора (1 мм вместо 0.2 мм), что приводит к ухудшению параметров САУПО: $K_y=0.2$, $T_0=0.94$ с, $\omega=2$ с⁻¹. Параметры САУПО определялись осциллографированием ошибки по положению ε , скорости задания v и выходного сигнала регулятора $U_{\text{ПР}}$ в диапазоне скоростей от 1 до 40 мм/с. Осциллограммы $\varepsilon(t)$ и $U_{\text{ПР}}(t)$ для скорости 10

и 16 мм/с приведены на рис. 9. Максимальная ошибка слежения при установившейся скорости перемещения не превышала 2 мм во всем диапазоне скоростей, статистическая ошибка — 1 мм. В процессе испытаний были зарегистрированы значительные возмущения по нагрузке при перемещении облучателя из-за особенностей конструкции ходовых тележек и состояния рельсовых путей.

Заключение. Предложенная схема САУПО вполне удовлетворяет техническим требованиям к режимам перемещения облучателя и каретки. Для улучшения качества работы САУПО необходимо: уменьшить кинематический люфт, устранить основные причины возмущений по нагрузке.

Авторы выражают благодарность сотрудникам САО АН СССР Е. К. Нижельской, Г. В. Жеканису, В. И. Фурсе, Э. И. Коркину и сотрудникам ОКБС С. Ф. Гольдшмидту, Л. Л. Лившицу, О. Л. Вольбергу за подготовку и проведение моделирования и испытаний на объекте.

Литература

1. Большой Пулковский радиотелескоп / С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Н. А. Есепкина, О. Н. Шиврис. — Изв. ГАО, 1960, № 164, с. 3.
2. Выбор размеров отражающих элементов и расчет электрических характеристик радиотелескопа РАТАН-600 / Б. В. Брауде, Н. А. Есепкина, Н. Л. Кайдановский и др. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 40.
3. Стоцкий А. А. Аберрации главного зеркала антенны переменного профиля и сканирование диаграммы направленности путем смещения облучателя. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 63—76.
4. Шиврис О. Н. Работа радиотелескопа РАТАН-600 с плоским отражателем. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1980, 12, с. 134—136.
5. Радиотелескоп РАТАН-600 / С. Э. Хайкин, Н. Л. Кайдановский, Ю. Н. Парийский, Н. А. Есепкина. — Изв. ГАО, 1972, № 188, с. 6—8.
6. Система автоматизированного управления Западного сектора кругового отражателя радиотелескопа РАТАН-600 / А. Н. Ангельский, Г. С. Голубчин, Ю. К. Постоевко и др. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1982, 15, с. 88—105.
7. C A M A C — Organization of Multicrate Systems Specification of the Branch Highway and Crate Controller Type A. EUR 4600e, 1972.
8. Бесекерский В. А. Динамический синтез систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1970, с. 328—329.
9. Расчет автоматических систем / А. В. Фатеев, А. А. Вавилов, Л. П. Смольников и др. М.: Выш. школа, 1973, с. 69—116, 216—219.
10. Вавилов А. А. Частотные методы расчета нелинейных систем. Л.: Энергия, 1970. 324 с.
11. Nisenfeld A. E. Choosing reset windup protection. — Instruments and Control, 1971, October, v. 44, no 10, p. 95—96.
12. Андриевский Б. Р. и др. Пакет прикладных программ для автоматизированного проектирования адаптивных систем. — В кн.: Моделирование и оптимизация в условиях САПР. Таллин, НИИТЭЗ, 1977.

Поступила в редакцию 26.04.82