

Модернизация мехатронной системы управления радиотелескопом РТ-7.5

© В.А. Польский, Ю.И. Рассадкин, А.В. Сеницын

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Описаны технические решения, использованные при модернизации мехатронной системы управления радиотелескопа РТ-7.5, а также общие методы модернизации и некоторые алгоритмы управления.

Ключевые слова: радиотелескоп, мехатронная система, привод наведения.

Введение. Важнейшая часть радиотелескопа, являющаяся объектом управления для мехатронных модулей, – зеркало антенной установки. Общий вид антенной установки радиотелескопа РТ-7.5 приведен на рис. 1. Зеркало имеет две степени подвижности: по азимутальной оси в диапазоне значений $\pm 172,5^\circ$ относительно направления север – юг и по оси угла места в диапазоне значений $\pm 87,5^\circ$ относительно направления на зенит. Общая масса вращающихся частей антенной установки составляет: 8 т по оси угла места и 27 т по азимутальной оси [1].

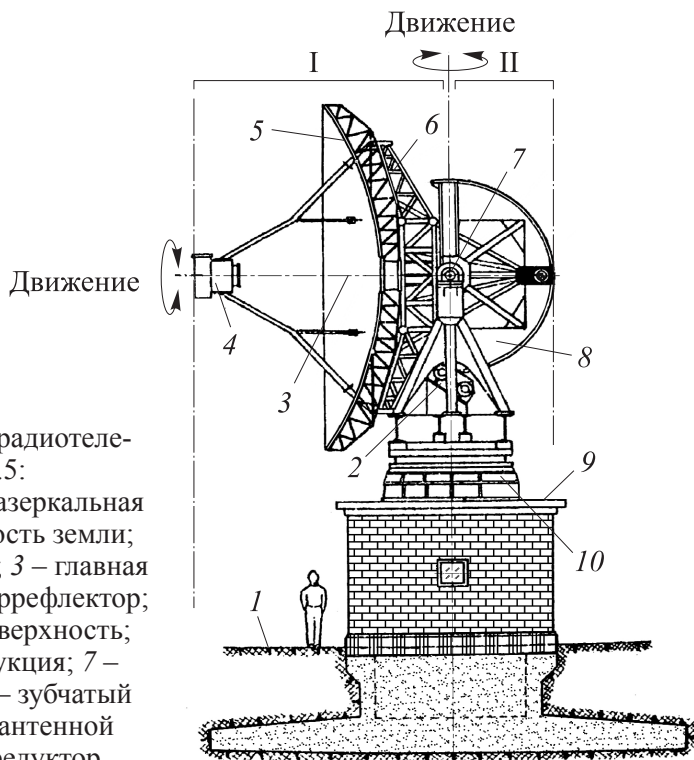


Рис. 1. Общий вид радиотелескопа РТ-7.5:

I, II – зеркальная и зазеркальная части; 1 – поверхность земли; 2 – правый редуктор; 3 – главная ось зеркала; 4 – контррефлектор; 5 – отражающая поверхность; 6 – рамная конструкция; 7 – угломестная ось; 8 – зубчатый сектор; 9 – пилон антенной установки; 10 – редуктор

Основной режим работы РТ-7.5 – режим программного наведения, в котором осуществляется слежение за астрономическими объектами и космическими летательными аппаратами. При проведении подготовительных и регламентных работ используются следующие вспомогательные режимы:

- регламентного наведения для перемещения антенной установки в заданное угловое положение и для движения с заданной угловой скоростью;
- полуавтоматического наведения для ручного слежения за объектами с помощью видеокамеры.

Значения угла азимута и угла места системы приводов до (числитель) и после (знаменатель) модернизации приведены ниже:

	Угол азимута	Угол места
Скорость , угл. с/с	0...205/2,5...9000	0... 325/2,5...9 000
Ускорение , угл. с/с ²	0...20,5/ 0...36	0...32,5/0...36
Ошибка наведения , угл. с ...	≤ 10/≤ 2,5	≤ 10/ ≤ 2,5

Согласно анализу значений угла азимута и угла места, полученных после модернизации системы приводов, были приняты следующие технические решения:

- замена двигателей постоянного тока с управлением от электромашинных усилителей современными специализированными асинхронными двигателями с управлением от векторных преобразователей частоты (ПЧ);
- отказ от двухдвигательной схемы привода каждой оси с громоздким предварительным редуктором и переход на однодвигательную схему с диапазоном регулирования скорости 10 000 '' с компактным одноступенчатым редуктором;
- использование на осях антенной установки современных датчиков абсолютного отсчета с разрешающей способностью 1 ''.

Для взаимодействия с верхним уровнем управления антенной установки – сервером радиотелескопа – применяется архитектура системы управления мехатронными модулями на базе высокопроизводительного программируемого логического контроллера (ПЛК) System Q фирмы Mitsubishi Electric (рис. 2).

Анализ возможностей современных ПЧ показал, что реализовать контур регулирования положения антенной установки на базе данных устройств невозможно. В связи с этим на процессорный модуль ПЛК возложена задача реализации контуров регулирования положения для двух осей. При такой организации управления ПЧ двигателей азимута и угла места вместе с соответствующими механическими передачами выполняют функции скоростных подсистем, которые управляются че-

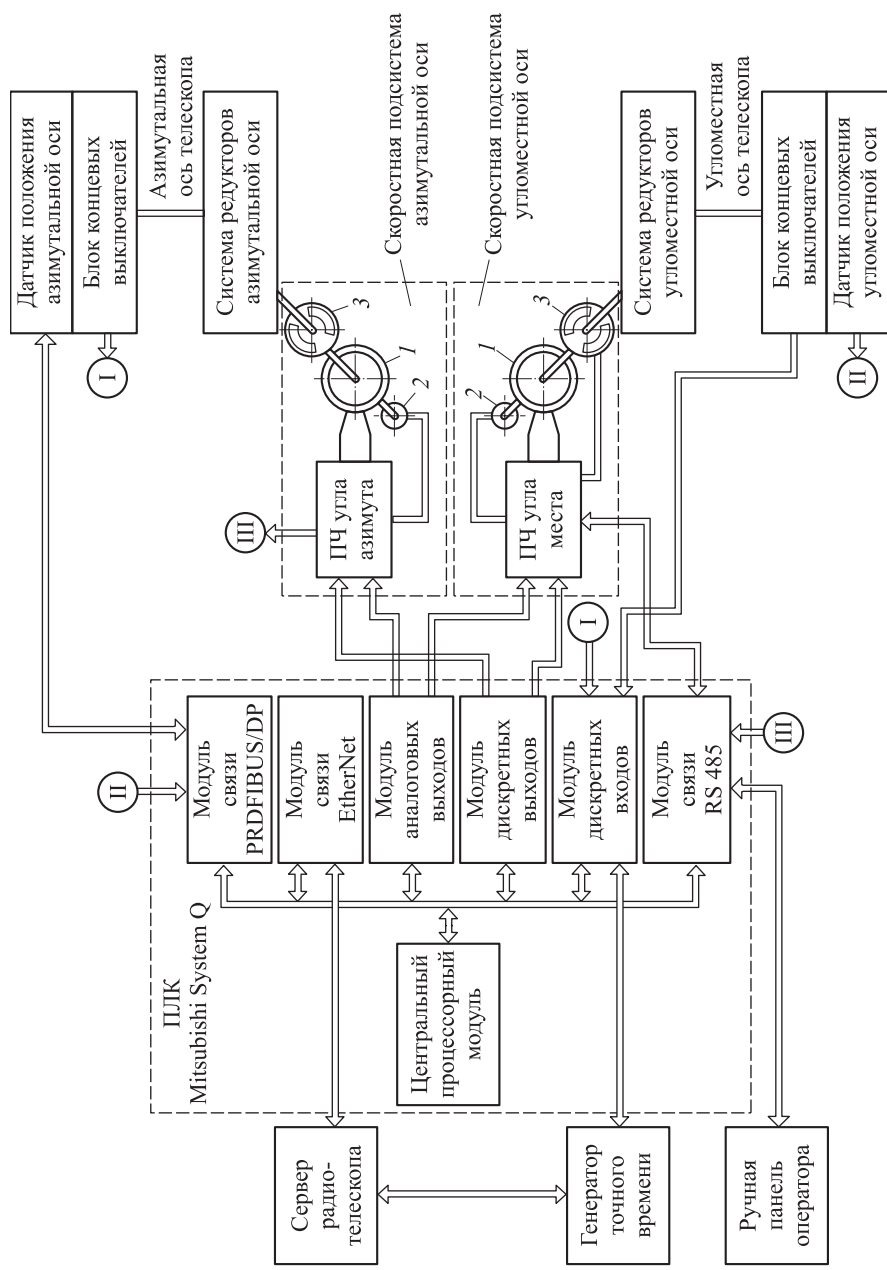


Рис. 2. Архитектура системы управления мехатронными модулями радиотелескопа РТ-7.5 [2]:
 1 – двигатели; 2 – двигатели; 3 – дискретные датчики; 3 – электромагнитные тормоза

рез модуль аналоговых выходов ПЛК. Кроме того, ПЛК осуществляет интерполяцию промежуточных точек траектории в режиме программного наведения и формирование управляющих воздействий на мехатронные модули в режиме регламентного наведения.

Алгоритмы управления мехатронными модулями радиотелескопа. В режиме программного наведения используется метод интерполяции, основанный на сплайн-функциях второго порядка. Для режима регламентного наведения применяются алгоритмы перемещения антенной установки в заданное угловое положение и движения с заданной скоростью, обеспечивающие плавное контролируемое перемещение антенной установки по спланированной траектории.

В режиме программного наведения ПЛК получает от сервера радиотелескопа через фиксированный отрезок времени T_1 информацию о трех узловых точках траектории по углу места φ^* и углу азимута ψ^* . Так, для угла места это

$$\varphi^*(t_0) = \varphi_0^*; \quad \varphi^*(t_0 + T_1/2) = \varphi_1^*; \quad \varphi^*(t_0 + T_1) = \varphi_2^*.$$

затем ПЛК интерполирует $(n-1)$ промежуточных точек траектории с шагом $\Delta t = T_1/n$, которые подаются на входы мехатронных модулей. Для телескопа РТ-7.5 было принято $T_1 = 1$ с. При этом самым загруженным в вычислительном отношении для ПЛК оказывается первый промежуток времени $[t_0; t_0 + \Delta t]$, в течение которого контроллер должен провести процедуру интерполяции, опросить датчики положения осей, рассчитать сигналы на выходах регуляторов положения и выдать их на входы ПЧ.

Для интерполяции используются сплайн-функции второго порядка. Интерполяционная траектория проходит через точки $\varphi_0^*, \varphi_1^*, \varphi_2^*$ и описывается следующим уравнением:

$$\varphi_n^*(t) = \varphi_0^* + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2, \quad t \in [t_0; t_0 + T_1],$$

где a_1 и a_2 – коэффициенты, определяемые по формулам

$$a_1 = (-3\varphi_0^* + 4\varphi_1^* - \varphi_2^*) / T_1; \quad a_2 = (2\varphi_0^* - 4\varphi_1^* + 2\varphi_2^*) / T_1^2.$$

Запишем уравнение для $\varphi_n^*(t)$ в дискретном виде

$$\varphi_{иK} = \varphi_0^* + l_1 K + l_2 K^2, \quad K = 1, \dots, n-1,$$

где $l_1 = a_1 \Delta t$ и $l_2 = a_2 \Delta t^2$. При этом неизбежно возникают погрешности квантования управляющих сигналов по времени и погрешности интерполяции. Погрешности квантования по времени оцениваются по описанию командной траектории, которую должен обработать привод,

в виде эквивалентного синусоидального входного воздействия $\varphi^*(t) = \varphi_{\max} \sin(\omega_{\varphi} t)$:

$$\varphi_{\max} = \Omega_{\max}^2 / \varepsilon_{\max}; \quad \omega_{\varphi} = \varepsilon_{\max} / \Omega_{\max}.$$

Здесь Ω_{\max} и ε_{\max} – максимальные значения скорости и ускорения. Сравнивая два соседних дискретных значения φ^*_{k} и φ^*_{k-1} , можно оценить погрешность квантования

$$\beta(t) = \varphi_{\max} [\sin(\omega_{\varphi}(t_0 + k\Delta t)) - \sin(\omega_{\varphi}(t_0 + (k-1)\Delta t))].$$

Поскольку наибольшая скорость изменения $\varphi^*(t)$ имеет место при $t_0 = 0$ и $k = 1$, максимальная погрешность квантования составит

$$\beta_{\max}(t) = \varphi_{\max} \sin \omega_{\varphi} \Delta t.$$

Значения максимальной погрешности квантования в зависимости от шага квантования для $\Omega_{\max} = 9000$ угл. с/с и $\varepsilon_{\max} = 36$ угл. с/с² приведены ниже:

Δt , мс	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10
β_{\max} , угл. с	0,886	1,772	4,43	8,86	17,72	44,3	88,6

Согласно указанным выше значениям, уже при $\Delta t = 0,2$ мс погрешность квантования превышает разрешающую способность 20-разрядного датчика угла $\Delta = 1''$. Для обеспечения заданной точности наведения при приемлемых для используемых в системе ПЛК значениях Δt (около 1...10 мс) на вход скоростной подсистемы подается дополнительный сигнал, пропорциональный скорости изменения управляющего воздействия,

$$\dot{\varphi}_n(t) = \Omega_n(t) = a_1 + 2a_2(t - t_0),$$

или в дискретном виде $\Omega_{иK} = a_1 + mK$, $K = 1, \dots, n - 1$; $m = 2a_1\Delta t$.

Схема управления приводом угла места в режиме программного наведения (подачи дополнительного сигнала) приведена на рис. 3.

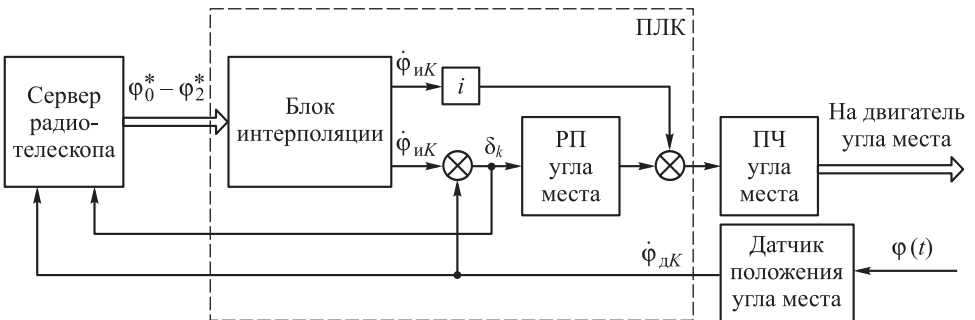


Рис. 3. Схема управления приводом угла места в режиме программного наведения:

РП – регулятор положения; δ_k – ошибка наведения; $\varphi_{дK}$ – координата оси, измеренная датчиком положения; i – передаточное число редуктора

Погрешность квантования составит

$$\beta' = \varphi_{\max}[\sin(\omega_3(t_0 + \Delta t)) - \sin(\omega_3 t_0)] - \Omega_{\max} \Delta t \cos(\omega_3 t_0).$$

Эта погрешность имеет максимум при $\varphi^*(t) = 90^\circ$. Значения максимальной погрешности квантования в зависимости от шага квантования приведены ниже:

Δt , мс	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	100
β'_{\max} , угл. с	$-1,8 \cdot 10^{-7}$	$-7,2 \cdot 10^{-7}$	$-4,5 \cdot 10^{-6}$	$-1,8 \cdot 10^{-5}$	$-7,2 \cdot 10^{-5}$	-0,00045	-0,0018	-0,18

Зависимости $|\beta_{\max}| = f(\Delta t)$ и $|\beta'_{\max}| = f(\Delta t)$, построенные по указанным выше данным в логарифмическом масштабе, представлены на рис. 4. Согласно зависимостям, при подаче на вход скоростной подсистемы дополнительного сигнала погрешность квантования даже при $\Delta t = 100$ мс не превышает разрешающей способности датчика угла.

В режиме регламентного наведения система управления приводами должна обеспечить плавное движение антенной установки с ограничением максимальных скоростей и ускорений. Традиционным является решение, при котором ограничение скоростей и ускорений достигается за счет ограничения сигналов на выходах регуляторов положения и скорости электропривода. Для обеспечения плавного контролируемого перемещения антенной установки в новое положение принято следующее решение: в ПЛК программным способом реализуется блок формирования управляющих воздействий, который после приема задания от сервера формирует плавную траекторию с изменением командной скорости по S-образной характеристике. Рассчитанные точки траектории подаются на вход следящего привода. В зависимости от начального рассогласования $\Delta\varphi$ автоматически выбирается одна из четырех траекторий перехода (рис. 5). На участках кривой 1, 3, 5, 7 командная скорость изменяется по параболическому закону. Величины $\Delta\varphi_{п1}$ и $\Delta\varphi_{п2}$ рассчитываются по формулам

$$\Delta\varphi_{п1} = \Omega_{\max} (\Delta t_1 + \Omega_{\max} / \varepsilon_{\max}); \quad \Delta\varphi_{п2} = 2\varepsilon_{\max} \Delta t_1^2.$$

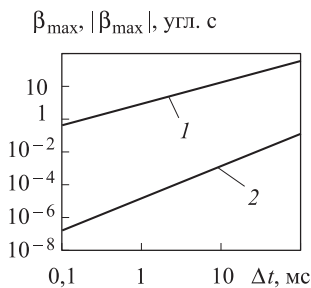


Рис. 4. Зависимости погрешностей квантования $|\beta_{\max}|$ (1) и $|\beta'_{\max}|$ (2) от шага квантования

Величина $\Delta\varphi_{\min}$ выбрана экспериментально, время Δt_1 – из условия $4\Delta t_1 \geq 3T_{\text{зер}}$, где $T_{\text{зер}}$ – период резонансных колебаний зеркала антенной установки по соответствующей оси. По данным экспериментов, при выполнении этого неравенства не происходит возбуждение механических колебаний зеркала в начале и в конце движения.

Для телескопа РТ-7.5 максимальные скорости и ускорения в режиме регламентного наведения составляют: $\Omega_{\max} = 18\,000$ угл. с/с и $\varepsilon_{\max} = 2880$ угл. с/с², а $\Delta t_1 = 0,25$ с, при этом $\Delta\varphi_{\text{п1}} = 32,5^\circ$, $\Delta\varphi_{\text{п2}} = 0,1^\circ$, $\Delta\varphi_{\min} = 10''$.

Для реализации движения с заданной скоростью применяется профиль, показанный на рис. 5, а, при этом вместо величины Ω_{\max} используется значение заданной скорости Ω_3 , а время Δt_y зависит от заданной скорости Ω_3 .

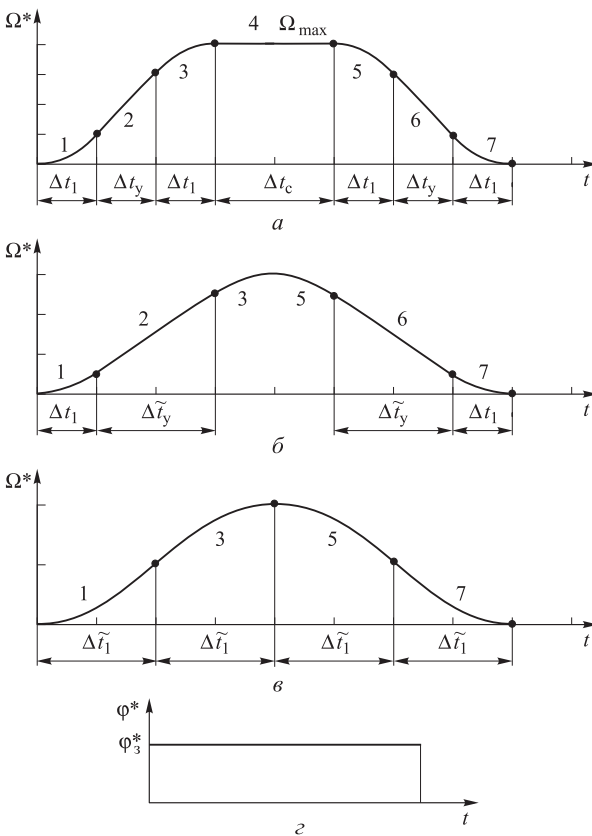


Рис. 5. Профили изменения скорости при различных значениях начального рассогласования:

a – большое рассогласование (семь участков движения, $\Delta t_y = \text{const}$, $\Delta t_1 = \text{const}$, $\Delta t_c = \text{var}$);
б – среднее рассогласование (шесть участков движения, $\Delta t_c = 0$, $\Delta t_1 = \text{const}$, $\Delta t_y = \text{var}$, $\Delta \tilde{t}_y < \Delta t_y$);
в – малое рассогласование (четыре участка движения, $\Delta t_y = 0$, $\Delta t_1 = \text{var}$, $\Delta \tilde{t}_1 < \Delta t_1$);
г – очень малое рассогласование (один участок движения); Δt_1 , $\Delta \tilde{t}_1$ – время разгона до максимального ускорения; Δt_c – время движения с максимальной скоростью; Δt_y , $\Delta \tilde{t}_y$ – время движения с максимальным ускорением; $\Delta\varphi_{\text{п1}}$, $\Delta\varphi_{\text{п2}}$, $\Delta\varphi_{\min}$ – значения начальных рассогласований, в зависимости от которых выбирается профиль изменения скорости

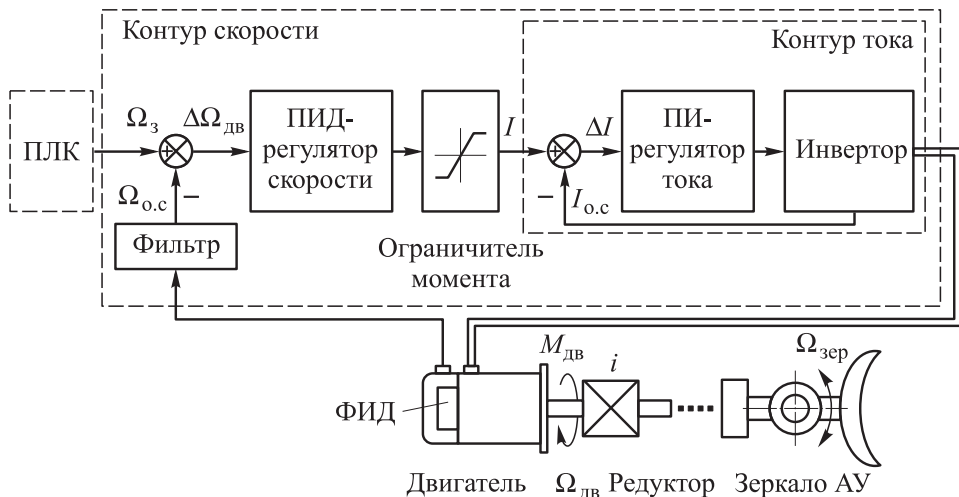


Рис. 6. Функциональная схема скоростной подсистемы на базе ПЧАВ-100:

ФИД – фотоимпульсный датчик на валу двигателя; АУ – антенная установка; ПИД-регулятор – пропорционально интегрально-дифференцирующий регулятор; ПИ-регулятор – пропорционально интегральный регулятор; Ω_z – заданное значение скорости ротора двигателя; $\Omega_{o.c}$ – сигнал обратной связи; $\Delta\Omega$ – скоростная ошибка привода; $\Omega_{дв}$ – скорость ротора двигателя; $\Omega_{зер}$ – скорость зеркала; $M_{дв}$ – электромагнитный момент, развиваемый двигателем; I – заданное значение моментобразующего тока двигателя; $I_{o.c}$ – фактическое значение тока, измеренное датчиком (обратная связь); ΔI – сигнал токовой ошибки

Методика расчета и настройки скоростной подсистемы мехатронных модулей. Функциональная схема скоростной подсистемы приведена на рис. 6.

Передаточная функция ПИД-регулятора скорости имеет вид

$$P_{p.c}(s) = K_p + 1 / (\tau_{инт}s) + \tau_{диф}s,$$

где $K_p, \tau_{инт}, \tau_{диф}$ – настраиваемые параметры регулятора. В рассматриваемой подсистеме электромагнитные процессы в регуляторах и асинхронных двигателях, в первом приближении, можно принять идентичными подобным процессам в двигателях постоянного тока. С учетом этого для описания скоростной подсистемы используется структурная схема, приведенная на рис. 7.

Структура и параметры упругой механической нагрузки были определены экспериментально. Для этого привод каждой оси резко тормозился до полного останова двигателя. В результате возникали упругие колебания зеркала, которые фиксировались датчиком положения оси. В качестве примера на рис. 8 показана осциллограмма, полученная для азимутальной оси. Согласно рисунку, в механической системе по азимутальной оси наблюдаются одночастотные затухающие колебания с частотой $f_{аз} = 2,69$ Гц.

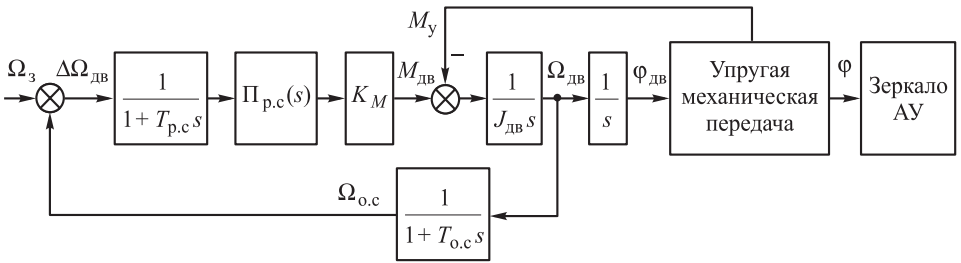


Рис. 7. Структурная схема системы регулирования скорости на базе ПЧ: M_y – момент упругих сил со стороны механической передачи; K_M – коэффициент пропорциональности между электромагнитным моментом и сигналом задания тока; $J_{дв}$ – момент инерции ротора двигателя; $\phi_{дв}$ – угол поворота вала двигателя; $T_{р.с}$ и $T_{о.с}$ – постоянные времени, учитывающие время реакции регулятора скорости и фильтрацию сигнала обратной связи; $\phi_{дв}$ – координата вала двигателя

Для угломестной оси также наблюдались одночастотные колебания с частотой 4,9 Гц. На основе имеющихся результатов механические системы приводов этих осей аппроксимированы двухмассовыми упругими моделями с сосредоточенными параметрами. На рис. 9, а приведена структурная схема скоростной подсистемы с двухмассовой моделью механической части подсистемы. Путем структурных преобразований схемы, приведенной на рис. 9, а, получена удобная для анализа и расчета схема, представленная на рис. 9, б.

Применялась двухэтапная процедура расчета и настройки скоростной подсистемы. На первом этапе осуществляются расчет и настройка параметров регулятора скорости при отсоединенной нагрузке, т. е. когда $J' = 0$ и $M(s) = 1$ по заданным значениям полосы пропускания привода по скорости f_c и показателя колебательности M_C . На основе анализа асимптотической логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) разомкнутого контура скорости были выведены следующие формулы:

$$\tau_{инт} = K_M M_C / \left[4\pi^2 f_c^2 J_{дв} (M_C - 1) \right];$$

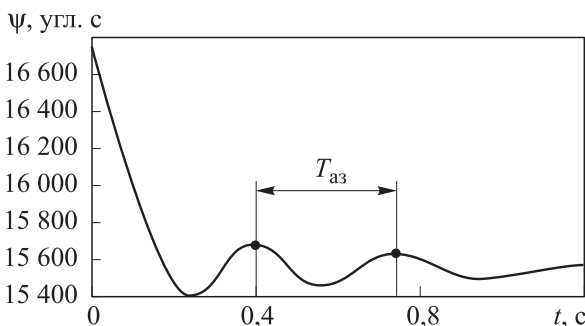


Рис. 8. Осциллограмма, полученная для азимутальной оси

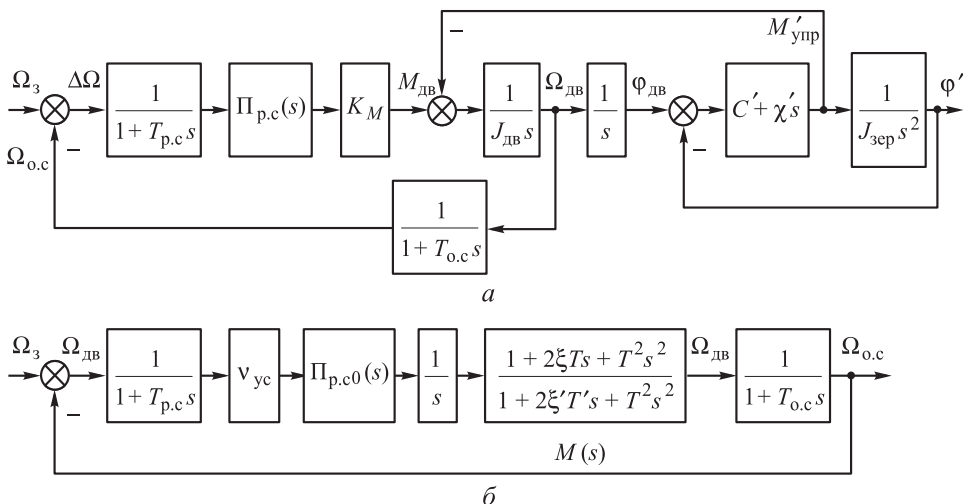


Рис. 9. Структурная схема скоростной подсистемы с двухмассовой моделью механической части подсистемы (а) и расчетная структурная схема этой подсистемы (б):

C' , χ' – жесткость механической передачи и коэффициент диссипативных потерь, приведенный к валу двигателя; $J'_{зер}$ – момент инерции зеркала, приведенный к валу двигателя; Φ' , $M'_{упр}$ – приведенные к валу двигателя координата зеркала и момент упругих сил; $\nu_{ус}$ – общий коэффициент усиления; $J_{\Sigma} = J_{дв} + J'_{зер}$ – суммарный момент инерции всех движущихся частей; $T = \sqrt{J'/C'}$, $T' = T\sqrt{J_{дв}/J_{\Sigma}}$, $\xi = \tau/(2T)$; $\xi' = \tau/(2T')$ – постоянные времени и коэффициенты затухания упругой передачи; $\tau = \chi'/C'$ – постоянная времени диссипативных потерь; $\Pi_{p.c0}(s) = (1 + K_p \tau_{инт}s + \tau_{инт} \tau_{диф}s^2) / s$ – передаточная функция регулятора скорости с единичным коэффициентом усиления

$$K_p = (2\pi J_{дв} f_c / K_M) \left\{ 1 + \left[2\pi f_c T_{o.c} (M_C - 1) \right] / M_C \right\};$$

$$\tau_{диф} = 2\pi T_{o.c} J_c f_c / K_M.$$

На втором этапе проводится анализ влияния упругой нагрузки на качество работы привода, для чего в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 9, б, анализируется ЛАЧХ разомкнутого контура скорости (рис. 10).

Для того чтобы скоростная подсистема имела приемлемый запас устойчивости необходимо $\Delta A \geq 6$ дБ. Для обеспечения высокой динамической точности слежения применен метод, основанный на принципах комбинированного управления, а также использован антирезонансный фильтр в цепи сигнала ошибки. Линеаризованная структурная схема позиционного контура управления мехатронного модуля угла места приведена на рис. 11, а. На этом рисунке математическая модель скоростной подсистемы представлена без учета малых

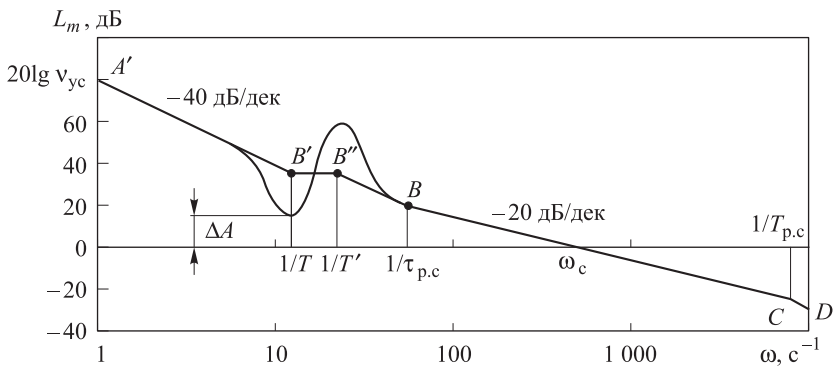


Рис. 10. ЛАЧХ разомкнутого контура скорости с присоединенной нагрузкой: $A'B'B''BCD$ – асимптотическая ЛАЧХ, при этом небольшие значения коэффициентов затухания ξ и ξ' приводят к появлению антирезонансных и резонансных пиков на частотах $1/T$ и $1/T'$

постоянных времени $T_{p.c}$ и $T_{o.c}$. Для уменьшения ошибки слежения используется принцип комбинированного управления, заключающийся в подаче на вход скоростной подсистемы дополнительного сигнала, пропорционального скорости изменения управляющего воздействия. Поскольку при слежении за астрономическими объектами скорость движения зеркала невелика, заданная точность слежения обеспечивается при небольших коэффициентах усиления в контуре положения, при которых его полоса пропускания значительно меньше собственной частоты упругих механических колебаний зеркала. При слежении за низкоорбитальными космическими аппаратами скорость движения зеркала возрастает в десятки раз, и для обеспечения заданной точности слежения необходимо значительное увеличение коэффициента усиления, при этом полоса пропускания контура положения становится соизмеримой с собственной частотой упругих колебаний зеркала. Это может привести к неустойчивости мехатронного модуля.

Для обеспечения устойчивости мехатронного модуля с упругой механикой применяется антирезонансный фильтр в цепи сигнала ошибки, который подавляет упругие колебания зеркала. Сигнал скоростной компенсации подается с учетом упругой механической нагрузки мехатронного модуля.

Для определения структуры регулятора положения с антирезонансным фильтром структурная схема, приведенная на рис. 11, а, преобразуется к схеме, представленной на рис. 11, б [3].

Регулятор положения с передаточной функцией $\Pi_{p.c}(s)$ разбит на два звена:

1) ПИД-регулятор с коэффициентами усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих K_p , K_{int} , K_{diff} с передаточной функцией

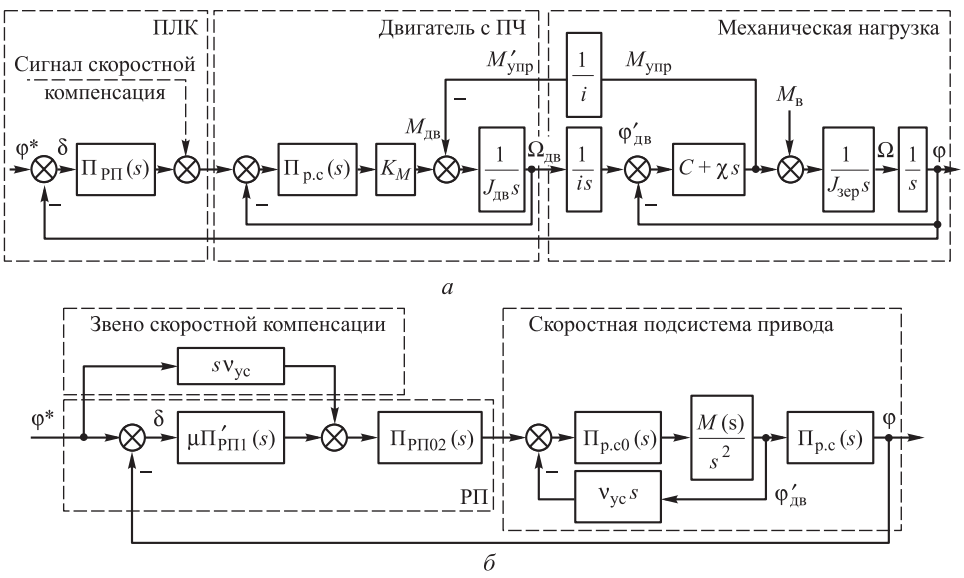


Рис. 11. Линейризованная (а) и преобразованная (б) структурные схемы позиционного контура управления мехатронного модуля угла места:

$\mu = K_{инт} K_M / (\tau_{инт} J_{\Sigma} i)$ – общий коэффициент усиления по контуру положения;

$N(s) = (1 + \tau s) / (1 + 2\xi T s + T^2 s^2)$ – передаточная функция механической нагрузки

$$P_{РП0}(s) = P_{РП01}(s) P_{РП02}(s),$$

где $P_{РП01}(s) = [1 + (K_{\Pi} / K_{инт})s + (K_{дв} / K_{инт})s^2] / s$;

2) антирезонансный фильтр с передаточной функцией

$$P_{РП02}(s) = N^{-1}(s) = (1 + 2\xi T s + T^2 s^2) / (1 + \tau s).$$

Определенная таким способом структура регулятора имеет вид, представленный на рис. 12.

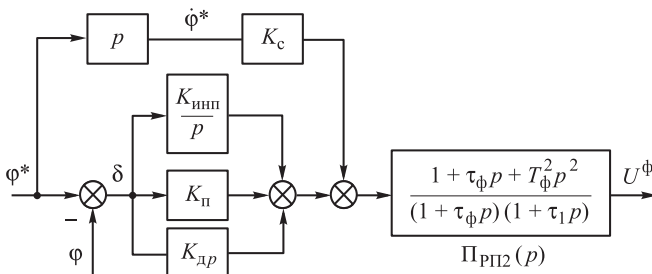


Рис. 12. Структурная схема регулятора положения со звеном скоростной компенсации:

$K_c = i$ – коэффициент передачи сигнала скоростной компенсации; $\tau_{\phi}, T_{\phi}, \tau_1$ – постоянные времени антирезонансного фильтра; U_{ϕ} – сигнал на выходе регулятора положения

При точной настройке необходимо обеспечить равенство $T_{\phi} = T$, $\tau_{\phi} = \tau_0$. Дополнительное апериодическое звено с постоянной времени τ_1 добавлено для фильтрации высокочастотных помех.

Опыт эксплуатации радиотелескопа РТ-7.5 после проведенной модернизации подтвердил правильность принятых технических решений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соколовский Г.Г. *Электроприводы переменного тока с частотным регулированием*. Москва, Издательский центр «Академия», 2006, 272 с.
- [2] *Следящие приводы. Т. 2: Электрические следящие приводы*. Е.С. Блейз, В.Н. Бродовский, В.А. Введенский и др; Б.К. Чемоданов ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003, 890 с.
- [3] Разработка интерфейса управления модернизированными приводами антенных систем радиотелескопа РТ-7.5: Отчет об опытно-конструкторской работе МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2005, с. 35–76.

Статья поступила в редакцию 19.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Польский В.А., Рассадкин Ю.И., Сеницын А.В. Модернизация мехатронной системы управления радиотелескопом РТ-7.5. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/934.html>

Польский Вячеслав Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Робототехника и комплексная автоматизация» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 40 научных работ в области робототехники. e-mail: polsky@rk10.bmstu.ru.

Рассадкин Юрий Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Специальная робототехника и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области робототехники. e-mail: rassadkin@sm.bmstu.ru.

Сеницын Алексей Витальевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Специальная робототехника и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 25 научных работ в области робототехники. e-mail: kutta@mail.ru.