

Gaiduk Anatoly Romanovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634361789; the department of automatic control systems; dr. of eng. sc.; professor.

Plaksienko Elena Anatolievna – Educational Establishment of Higher Vocational Education «Taganrog Management and Economy Institute»; e-mail: pumkad@mail.ru; 45, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634362583; the department of mathematic and informatics; cand. of eng. sc.; associated professor.

УДК 681.51

Д.Ю. Денисенко, Ю.И. Иванов, И.О. Шаповалов

СИНТЕЗ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЛЕСКОПОМ ПО ОСИ Z*

Исследуется структура и синтезируется цифровая система управления большим азимутальным телескопом (БТА) специальной астрономической обсерватории РАН. Описываются принцип работы, структура электроприводов, вспомогательных механизмов и основные особенности каналов управления. Обосновывается необходимость и актуальность модернизации цифровой системы управления БТА. Составляется структурная схема канала управления телескопом по оси Z (зенит), и ставится задача построения и исследования дискретной математической модели указанного канала управления телескопом, а также задача синтеза дискретной системы управления и алгоритма работы цифрового устройства управления телескопом по оси Z. При решении задачи синтеза цифровой системы управления применяется аналитический метод синтеза системы управления по заданным показателям качества с применением принципа управления по выходу и воздействию и с учетом запаздывания, а также условий физической реализуемости цифровых устройств управления. В результате решения задачи синтеза цифровой системы управления, получен алгоритм вычисления дискретных значений управляющего воздействия. Приводятся результаты исследования синтезированной системы.

Телескоп; система управления; цифровое устройство управления; показатели качества.

D.Y. Denisenko, Y.I. Ivanov, I.O. Shapovalov

DESIGN OF THE DIGITAL CONTROL SYSTEM FOR THE TELESCOPE ON THE AXIS Z

The structure is investigated and the digital control system of a big azimuthal telescope (BTA) of special astronomical observatory of the Russian Academy of Sciences is synthesized. The principle of work, structure of electric drives, auxiliary mechanisms and the main features of control paths are described. Need and relevance of modernization of a digital control system of BTA locates. The block diagram of a control path a telescope on axes Z (zenith) is formed and the task of construction and research of discrete mathematical model of the specified control path by a telescope, and also a problem of synthesis of a discrete control system and algorithm of work of a digital control unit by a telescope on an axis Z is set. At the solution of a problem of synthesis of a digital control system the analytical method of synthesis of a control system on the set indicators of quality with application of the principle of management on an exit and influences and taking into account delay, and also conditions of physical feasibility of digital control units is applied. As a result of the solution of a problem of synthesis of a digital control system, the algorithm of calculation of discrete values of operating influence is received. Results of research of the synthesized system are given.

Telescope; control system; digital control unit; quality indicators.

* Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 13-08-00249.

Введение. Что окружает планету Земля? Насколько велика Вселенная? Существует ли её начало и конец? Сможет ли человек приспособиться к жизни не на Земле? В конце концов, есть ли живые существа где-то помимо Земли, и могла ли существовать жизнь ранее на других планетах? Эти и многие другие вопросы давно волнуют человечество.

Ещё в древние времена наблюдения за небесными светилами играли очень важную роль в жизни людей, они помогали человеку находить дорогу, предсказывать погоду, определять время. Эти астрономические наблюдения позволили человеку определить смену дня и ночи, смену фаз луны, смену времён года; ввести новые единицы измерения, такие как сутки, месяц, год, и составить календарь.

В настоящее время астрономия по-прежнему имеет большое значение. Современный человек, в результате открытий наших великих предшественников, имеет огромный опыт и знания, накопленные поколениями и веками, что обеспечивает большие возможности в достижении и дальнейшем покорении космоса.

Существует огромное количество приборов, предназначенных для наблюдений за различными небесными объектами и явлениями (звездами, Луной, планетами, кометами, искусственными небесными телами). Одним из таких приборов является Большой азимутальный телескоп Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (БТА САО РАН) [1].

БТА САО РАН имеет статус национального российского инструмента. Он располагается в предгорьях Северного Кавказа, на горе Пастухова, на высоте 2070 м над уровнем моря в живописных местах Карачаево-Черкесии. Принятый впервые в мире альт-азимутальный принцип движения его оптической оси дал название телескопу и открыл путь для создания крупнейших наземных оптических зеркальных телескопов. Его первичное зеркало имеет диаметр 6.0 м и весит 42 т, фокусное расстояние – 24 м, масса подвижной части телескопа – 650 т [2]. БТА предназначен для выполнения исследований объектов далекого космоса средствами наземной астрономии в оптическом диапазоне. Достижение прецизионной точности и высокой скорости наведения в условиях реального времени требует построения высококачественной системы управления основными приводами телескопа. БТА был разработан и построен в 60-х годах прошлого века, и уровень технической реализации телескопа такого масштаба соответствовал самым уникальным техническим решениям на тот момент времени.

Телескоп БТА состоит из двух основных механических узлов: трубы телескопа и монтировки. На трубе телескопа укреплен гид, состоящий из объектива и окулярной части. Внутри на растяжках расположено диагональное зеркало, относящееся к оптической системе Несмита. На верхнем кольце на растяжках установлен фокусирующий стакан, а над ним, на других растяжках, кабина наблюдателя.

На нижнем кольце трубы телескопа закреплена оправа с главным зеркалом, и установлены крышки, закрывающие главное зеркало от пыли и механических повреждений. Средняя часть трубы телескопа имеет сферические опорные поверхности, а линия, соединяющая их центры, является горизонтальной осью телескопа.

Со средней частью соединено большое червячное колесо, в зацеплении с которым находится 24-разрядный цифровой датчик обратной связи, с которого снимается информация об изменении угла поворота трубы телескопа вокруг оси Z («зенитного расстояния»).

Монтировка телескопа БТА является азимутальной: это значит, что наведение трубы телескопа на выбранные объекты небесной сферы осуществляется вращением ее вокруг вертикальной оси А – изменение азимута, и вокруг горизонтальной оси Z – изменение зенитного расстояния. Таким образом, в процессе астроно-

мических наблюдений необходимо осуществлять его наведение и ведение по двум осям – по оси Z (зенит) и по оси А (азимут). Движение по оси Z осуществляется одним электроприводом, а по оси А – двумя.

Система управления телескопом в целом состоит из отдельных подсистем управления, обеспечивающих функционирование различного оборудования телескопа. С развитием новых более технологичных цифровых электронных устройств, наряду с износом и старением механизмов и узлов вспомогательного оборудования телескопа, периодически возникает необходимость модернизации аппаратной и управляющей частей телескопа. С начала периода эксплуатации телескопа в систему управления постоянно вносились некоторые корректировки и усовершенствования в соответствии с требованиями эксплуатации и наблюдательного процесса. В 1985 г. электронно-цифровая управляющая машина была заменена на универсальную мини-ЭВМ типа СМ2. В дальнейшем мини-ЭВМ была заменена «персональным» компьютером в промышленном исполнении. Позже уже в 2000-х годах проводилась более глубокая модернизация, в процессе которой были заменены электроприводы по осям А и Z. В частности, двигатели постоянного тока были заменены асинхронными с управлением от цифровых инверторов.

Целью данной работы является получение и исследование математической модели приводов телескопа, а также синтез цифровой системы управления движением телескопа по оси Z. Структура действующей в настоящее время системы управления (СУ) БТА по оси Z показана на рис. 1.

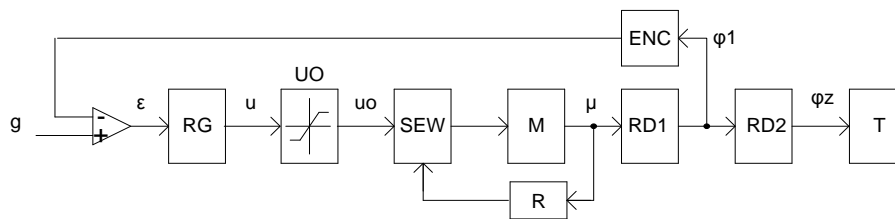


Рис. 1. Структура СУ телескопом по оси Z

На рис. 1 показаны следующие функциональные блоки: RG – регулятор; UO – усилитель-ограничитель; SEW – контроллер сервопривода; M – асинхронный двигатель; RD1, RD2 – первый, второй редуктор (главный червяк); T – телескоп; K – резольвер, ENC – энкодер (датчик угла поворота); переменные: g – задающее воздействие; ε – ошибка; u – управляющее воздействие; u_0 – управляющее воздействие после ограничения; μ – частота вращения вала мотора; φ_1 – угол поворота вала первого редуктора; φ_z – угол поворота вала второго редуктора.

Постановка задачи. Практически необходимо найти новый алгоритм работы цифрового регулятора RG. В связи с этим выходом системы будем считать угол φ_1 и представим структурную схему, как показано на рис. 2, где под непрерывным объектом управления (НОУ) понимаются все остальные элементы, показанные на рис. 1.

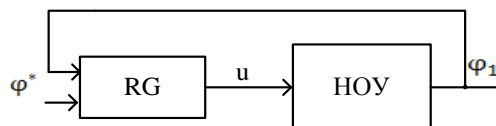


Рис. 2. Структурная схема СУ по оси Z

Проведённые исследования позволяют заключить, что НОУ описывается следующим уравнением вход–выход в операторной форме

$$(0,2p^2 + p)\varphi_1(p) = (1,2p + 1,5)u(p),$$

а цифровая система управления имеет период квантования $T = 0,86$ с.

Поставим задачу синтеза дискретной системы управления телескопом по оси Z , с применением цифрового устройства управления RG (рис. 2) с задержкой на период. Будем предполагать, что в устройстве управления (УУ) используется принцип управления по выходу и воздействиям, причем УУ должен обеспечить следующие показатели качества: первый порядок астатизма к задающему воздействию, т.е. $v_g = 1$, время регулирования t_p не более 105 с, перерегулирование должно отсутствовать, т.е. $\sigma = 0$ %.

Решение задачи. В соответствии с методом синтеза [4, 5], для решения поставленной задачи прежде всего необходимо найти полиномы уравнения

$$A(z)\varphi_1(z) = B(z)u(z) \quad (1)$$

в z -изображениях.

Воспользовавшись функцией `c2d` системы MATLAB, получим искомые полиномы из уравнения (1): $A(z) = z^2 - 1,014z + 0,01357$, $B(z) = 2,178z - 0,9053$ и их степени: $n = \deg(A(z)) = 2$, $m = \deg(B(z)) = 1$.

Требования к качеству синтезируемой системы в данном методе учитываются путём формирования вспомогательной непрерывной передаточной функции.

Коэффициенты этой передаточной функции и значение времени регулирования выбираются из таблицы стандартных передаточных функций по заданным значениям v_g , n и σ %.

Для этой цели воспользуемся табл. 6.1, приведённой в [5]. В данном случае $v_g = 1$, $n = 2$, а $\sigma = 0$ %, поэтому из указанной таблицы находим коэффициенты $\Delta_0 = 1$, $\Delta_1 = 2$, $\Delta_2 = 1$, а также величину $t_{pm} = 4,75$ с. Вычисляем временной масштабный коэффициент по формуле $w_0 = (t_{pm})/(t_p - T) = 0,046$. Подставляя полученные значения в формулу (9.18) [5], найдём вспомогательную передаточную функцию:

$$W_{yg}(p) = \frac{0,00208}{p^2 + 0,09122p + 0,00208}.$$

Снова воспользовавшись функцией `c2d` системы MATLAB, найдём z -преобразование этой функции:

$$W_{desz} = \frac{0,0007494z - 0,00073}{z^2 - 1,923z + 0,9245},$$

тем самым определяются полиномы: $H_0(z) = 0,0007494z - 0,00073$, $H(z) = z^2 - 1,923z + 0,9245$ и их степени $\eta_0 = \deg(H_0(z)) = 1$, $\deg(H(z)) = n = 2$.

Желаемая передаточная функция синтезируемой дискретной системы имеет вид

$$W_{ж} = \frac{H_0(z)}{H(z)z^k}, \quad (2)$$

где k – целое число или нуль.

Так как запаздывание в цифровом устройстве управления равно одному периоду, то в z -изображениях [5] оно описывается, относительно нашей задачи, уравнением вида

$$R(z)u(z) = Q(z)z^{-1}\varphi^* - L(z)z^{-1}\varphi_1. \quad (3)$$

Полиномы уравнения (3) $R(z)$, $Q(z)$, $L(z)$ определяются путём приравнивания $W_{\text{ж}}$ (2) дискретной передаточной функции замкнутой системы (1), (3). При этом числитель и знаменатель передаточной функции $W_{\text{ж}}$ (2) необходимо умножить на полином $B_{\Omega}(z)z^{\mu}$. Здесь μ – некоторое целое число или нуль. Полином

$$B_{\Omega}(z) = \beta_m^{-1}B(z),$$

где β_m – коэффициент полинома $B(z)$ при z^m ; m – степень $B(z)$.

Полиномы $R(z)$, $Q(z)$, $L(z)$ можно определить [5] по формулам

$$L(z) = z\tilde{L}(z), \quad (4)$$

$$R(z) = (z-1)^{\bar{\nu}}B_{\Omega}(z)\tilde{R}(z), \quad (5)$$

$$Q(z) = \beta_m^{-1}H_0(z)z^{\mu}, \quad (6)$$

где $\bar{\nu} = \max\{0, \nu_g - \nu_A\}$, ν_A – число единичных нулей полинома $A(z)$, а $\tilde{R}(z)$, $\tilde{L}(z)$ – вспомогательные полиномы, которые определяются путём решения следующего полиномиального уравнения:

$$\bar{A}(z)\tilde{R}(z) + \beta_m\tilde{L}(z) = D(z). \quad (7)$$

Здесь

$$\bar{A}(z) = (z-1)^{\bar{\nu}}A(z), \quad D(z) = H(z)z^{\mu+k-1}.$$

По заданным и полученным значениям $\nu_g = 1$, $n = 2$, $\eta_0 = 1$, $m = 1$, ν_A , $\beta_m = 2,178$, поэтому $\bar{\nu} = 0$. Определим степени вспомогательных полиномов и числа μ и k по формулам:

$$k = \eta_0 - m + 1 = 1, \quad \mu = n + \bar{\nu} - \eta_0 = 1,$$

$$\tilde{l} = n + \bar{\nu} - 1 = 1, \quad \tilde{r} = n - m = 1.$$

Отсюда записываем вспомогательные полиномы

$$B_{\Omega}(z) = z - 0,41566,$$

$$\tilde{R}(z) = \rho_1z + \rho_0, \quad \tilde{L}(z) = \lambda_1z + \lambda_0,$$

$$\bar{A}(z) = A(z) = z^2 - 1,014z + 0,001357,$$

$$D(z) = zH(z) = z^3 - 1,923z^2 + 0,9245z.$$

Соответственно [5] система алгебраических уравнений по уравнению (7) имеет вид

$$\begin{bmatrix} 2,178 & 0 & 0,01357 & 0 \\ 0 & 2,178 & -1,014 & 0,01357 \\ 0 & 0 & 1 & -1,014 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \rho_0 \\ \rho_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0,9245 \\ -1,923 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

В результате решения приведённой системы находим численные значения коэффициентов полиномов $\tilde{R}(z)$, $\tilde{L}(z)$: $\lambda_0 = 0,00566$, $\lambda_1 = -0,00495$, $\rho_0 = 0,909$, $\rho_1 = 1$. Затем по формулам (4) – (6) находим полиномы $R(z)$, $Q(z)$, $L(z)$:

$$L(z) = -0,0049568z^2 + 0,0056635z,$$

$$R(z) = z^2 - 1,32466z + 0,37783,$$

$$Q(z) = 0,00034407z^2 + 0,0003351z.$$

Полученное уравнение подставляем в уравнение (3), откуда получаем

$$(z^2 - 1,32466z + 0,37783)u(z) = (0,00034407z^2 + 0,0003351z)z^{-1}\varphi^* - (-0,00534z^2 + 0,005328z)z^{-1}\varphi_1. \quad (8)$$

Так как по условию синтеза воздействие не измеряется, то в (8) проведём замену переменных $\varphi^* = \varepsilon_\varphi + \varphi_1$. Далее для получения алгоритма цифрового устройства управления обе части (8) умножим на z^{-2} , после чего перейдём к оригиналам и перенесём в правую часть все слагаемые, кроме u_k . В результате будем иметь:

$$u_k = 1,32466u_{k-1} - 0,37783u_{k-2} + 0,000344\varphi^*_{z_{k-1}} + 0,000353\varphi^*_{z_{k-2}} - 0,00534\varphi_{1z_{k-1}} + 0,00536\varphi_{1z_{k-2}}. \quad (9)$$

Полученное выражение представляет собой искомый алгоритм работы цифрового устройства управления с непрерывной частью и периодом квантования $T = 0,86$ с для заданного объекта.

Объединяя уравнения объекта цифрового устройства управления (1) и уравнения (9), исключив из них u_z , можно убедиться, что система является устойчивой и удовлетворяет условиям астатизма первого порядка и требуемым показателям качества.

Заключение. Применение принципа управления по выходу и воздействиям и аналитического метода по заданным показателям качества позволяет создавать цифровые системы управления, с учетом физической реализуемости цифровых устройств управления. В работе получен алгоритм работы цифрового устройства управления, который в соответствии с результатами исследования обеспечивает требуемые показатели качества процесса управления телескопом по оси Z.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономарев Д.Н. Астрономические обсерватории Советского Союза. – М.: Наука, 1987. – 208 с.
2. <http://www.sao.ru/>.
3. Большой азимутальный телескоп (БТА). Техническое описание. Кн. 1. – Л.: Ленинградское оптико-механическое объединение, 1975.
4. Гайдук А.Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: Физматлит, 2012. – 360 с.
5. Гайдук А.Р., Беляев В.Е., Пьявченко Т.А. Сборник задач с решениями на ЭВМ по теории автоматического управления. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – 464 с.
6. Иванов Ю.И., Югай В.Я. Микропроцессорные устройства систем управления: Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 135 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.А. Нейдорф.

Денисенко Дарья Юрьевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: d.u.ivanova@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79061853728; кафедра систем автоматического управления; ассистент.

Иванов Юрий Иванович – e-mail: taganrog@tsure.ru; тел.: +79061833631; кафедра систем автоматического управления; доцент.

Шапвалов Игорь Олегович – e-mail: shapovalovio@gmail.com; тел.: 89508473455; кафедра систем автоматического управления; ассистент.

Denisenko Dariya Yurievna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: d.u.ivanova@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79061853728; the department of automatic control systems; assistant.

Ivanov Yuri Ivanovich – e-mail: taganrog@tsure.ru; phone: +79061833631; the department of automatic control systems; associate professor.

Shapovalov Igor Olegovich – e-mail: shapovalovio@gmail.com; phone: +79508473455; the department of automatic control systems; assistant.

УДК 629.733+004.942

Р.А. Нейдорф

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ
ВЕРТИКАЛЬНЫМИ МАНЕВРАМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
АЭРОСТАТИЧЕСКОГО ТИПА***

Исследуется задача энергетически эффективного принципа вертикального маневрирования летательных аппаратов, основанных на аэростатическом принципе удержания в воздухе. В настоящее время подобные аппараты получают все большее признание как транспортные средства в самых различных областях народного хозяйства, технике, науке, обороне и др. Вытесненные из авиации машинами с аэродинамическим принципом удержания в воздухе в 30-х годах прошлого века и незаслуженно забытые, аэростаты и дирижабли вновь привлекли внимание исследователей, разработчиков и производителей авиационной техники. Задача обеспечения вертикального маневрирования летательных аппаратов, основанных на аэростатическом принципе удержания в воздухе обоснована и решена в рамках парадигмы сосредоточенности их параметров. Предлагается и подтверждается расчетами реализация управления, использующего варьирование силы всплытия или погружения путем изменения объема корпуса аппарата. Это позволяет осуществлять экономию энергии управления, необходимого для достижения заданных скоростей совершения маневров. Исследование опирается на физические закономерности движения тел переменного объема под действием как Архимедовых и гравитационных сил, так и сил аэродинамического сопротивления среды полета. Статья иллюстрируется результатами расчета энергетических оценок управления вертикальными перемещениями аэростатических аппаратов исследуемого типа.

Летательный аппарат; аэростатический принцип; всплытие; погружение; аэродинамические силы; управление; энергетические затраты.

R.A. Neidorf

**COMPUTING AND ENERGY ASPECTS OF THE CONTROL
OF THE AIRSHIP VERTICAL MANEUVERS**

In this article the task of ensuring of the airships vertical maneuvering, based on the hydrostatic principle of retention in the air justified and solved within the paradigm of the concentration of their parameters. Currently such devices are increasingly recognized as vehicles in various fields of national economy, technology, science, defense and other. Excluded from aviation machines with aerodynamic principle of support in the air in the 30s of the last century, and undeservedly forgotten, balloons and dirigibles again attracted the attention of researchers, developers and manufacturers of aviation equipment. The task of ensuring the vertical maneuvering airship, based on the aerostatic principle of retention in the air justified and solved. The implementation of the control using variation of force floating or dive by changing the volume of the airship body proposed and confirmed by calculations. This allows to perform the energy savings which neces-

* Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № НШ-1557.2012.10, гранта Евросоюза «МААТ – многоуровневая транспортная система на базе стратосферных дирижаблей» в рамках Седьмой рамочной программы FP7, а также целевой программы Минобрнауки № 2.3.13.