

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

С. Г. САРКИСЯН, В. И. ПЕРСЕСЯН, Д. О. МЕЛКУМЯН

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАТФОРМЫ
ЗАДАЮЩЕГО УЗЛА ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

1. Постановка задачи

Современная радиоастрономия развивается на основе создания весьма точных, крупных и полностью автоматизированных радиотелескопов, обеспечивающих работу в широком диапазоне частот и обзор возможно большей части небесной сферы [1].

Рассматриваемая система входит в комплекс, который включает в себя двухзеркальную сферическую антенну с неподвижным основным зеркалом и подвижным малым зеркалом, которое вместе с облучателем подвешено на металлоконструкции типа «треноги». Вследствие значительного веса, «парусности» и неравномерности прогресса металлоконструкций и подвешенного на них малого зеркала возникают весовые, ветровые и температурные деформации [2]. Необходимую разрешающую способность антенны можно обеспечить с помощью прецизионной системы управления [3], поэтому эта система включает в себя несколько подсистем, которые компенсируют эти деформации [4]. Разработке, изготовлению и исследованию одной из таких подсистем — системы автоматической стабилизации пространственного положения платформы задающего элемента, важнейшего узла антенны — посвящена настоящая работа. Динамика линейной модели этой системы рассмотрена в статье [5].

2. Идентификация параметров системы

Положение платформы в пространстве регулируется при помощи трех винтовых механизмов, обеспечивающих перемещение трех точек платформы в вертикальном направлении, что позволяет осуществить поворот платформы вокруг любых горизонтальных осей и ее перемещение в вертикальном направлении. Привод каждого винтового механизма выполнен в виде следящей системы. Сигнал рассогласования, возникающий при отклонении платформы от нулевого положения, в гидростатическом инвертирующем преобразователе преобразуется фотоэлектрическим датчиком, усиливается и подается на двигатель с редуктором. Исполнительный механизм, вращаясь, перемещает платформу до исчезновения рассогласования.

В качестве измерителя рассогласования системы применен гидростатический нивелир с прецизионным фотоэлектрическим датчиком уровня жидкости. Основными достоинствами этого датчика являются: высокая стабильность нуля и чувствительность; практически полная компенсация температурной погрешности [6], что позволяет использовать его для длительного контроля вертикальных смещений платформы стабилизации на открытом воздухе. Коэффициент преобразования такого датчика может изменяться от 0,15 до 3 В/мм.

Специального рассмотрения требует динамика гидростатических нивелиров, тесно связанная с происходящими в них гидродинамическими процессами. Последние заключаются, во-первых, в передаче малых возмущений типа сжатия жидкости от одного сосуда к другому, и, во-вторых, в движении жидкости с очень малыми скоростями внутри системы сообщающихся сосудов. Следствием первого из вышеуказанных процессов является чистое запаздывание, имеющее место при изменении взаимного высотного положения сосудов, а следствием второго — колебание уровня жидкости в сосудах, аналогичное механическим колебаниям тела под влиянием движущей силы пружины и сил сопротивления среды [7].

Экспериментально была определена скорость движения жидкости в системе, которая равнялась для длины трубы $l=1$ м и ее радиуса $r=0,5$ см, приблизительно, $v=4$ м/с. Для лабораторного образца платформы стабилизации с диаметром $d=1$ м запаздывание равно $\tau=0,25$ сек.

Из экспериментально снятой характеристики переходного процесса датчика, согласно номограммам [8], с учетом статического коэффициента преобразования датчика и запаздывания, передаточная функция датчика примет вид

$$W_d(s) = \frac{K_d e^{-\tau s}}{T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1}, \quad (1)$$

где $T=1,01$ сек; $\zeta=0,7$; $K_d=0,15-3$ В/мм; $\tau=0,25$ сек.

В качестве усилителя использован серийно выпускаемый промышленностью усилитель постоянного напряжения типа УЭД1-0,3, состоящий из блоков усиления напряжения и мощности. Нагрузкой усилителей является обмотка управления реверсивного асинхронного двигателя РД-09.

Экспериментальным путем была снята статическая характеристика усилителя мощности, которая показана на рис. 1а. Как видно, усилитель мощности обладает существенной нелинейностью типа насыщения. В зоне линейности имеем для усилителя мощности передаточную функцию

$$W_{yc} = K_{yn} = 25. \quad (2)$$

Передаточная функция усилителя напряжения:

$$W_{yn} = K_{yn} = 200. \quad (3)$$

В соответствии с [9], для нелинейности вида рис. 1а получаем

$$g(A) = K_{ym} \quad \text{при } A \leq b_1,$$

$$g(A) = \frac{2K_{ym}}{\pi} \left(\arcsin \frac{b_1}{A} + \frac{b_1}{A} \sqrt{1 - \frac{b_1^2}{A^2}} \right) \quad \text{при } A \geq b_1, \quad (4)$$

где $b_1 = 2B$.

Усилитель мощности охвачен отрицательной обратной тахометрической связью, которая улучшает устойчивость системы. Передаточная функция тахометрической связи имеет вид

$$W_T = K_T, \quad (5)$$

где K_T — крутизна выходной характеристики тахометрического моста. B — сек/рад. Значение K_T определено экспериментально и равно $8 \cdot 10^{-2}$ В·сек/рад.

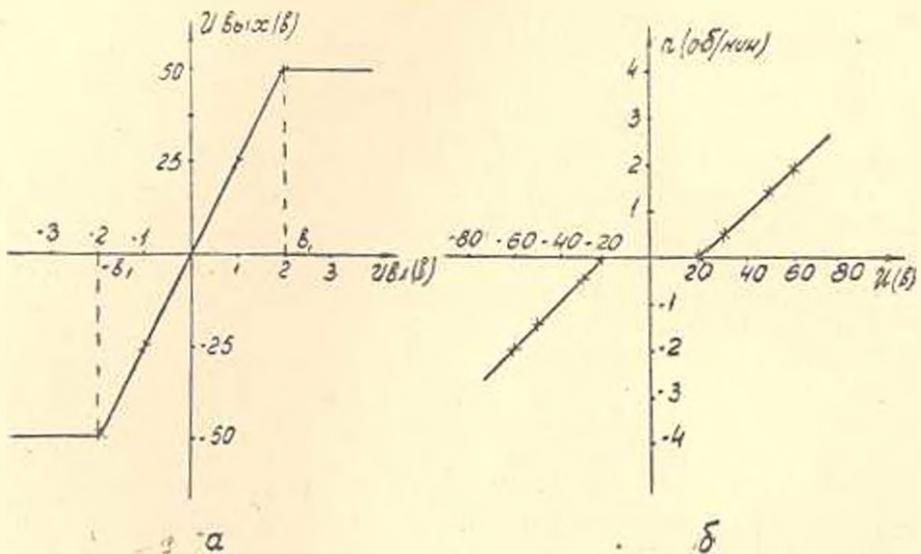


Рис. 1.

На рис. 1б показана экспериментально снятая характеристика скорости двигателя в зависимости от управляющего напряжения, откуда видно, что характеристика имеет нелинейный вид, который получается из-за действия сил сухого и вязкого трений.

Уравнение движения ротора двигателя с учетом сухого и вязкого трений после приведения к стандартному виду можно представить:

$$(T_2 s + 1) \omega = K_{\omega\omega} U_y - \frac{F_1(\omega)}{n},$$

где $n = 0,45$ г·см·сек — полный коэффициент демпфирования; $T_2 = 0,07$ сек и $K_{\omega\omega} = 1,6$ рад/в·сек [8].

Выполняя гармоническую линеаризацию нелинейности в соответствии с [9], получим передаточную функцию в виде

$$W_{22}(s) = \frac{K_{22}}{s \left(T_1 s + 1 + \frac{g_1(A)}{\Omega n} \right)}, \quad (6)$$

где $g_1(A) = \frac{4c}{\pi A}$, а $c = 4 \text{ г} \cdot \text{см}$.

Передача движения от двигателя к винтовому механизму производится через зубчатый редуктор, который конструктивно встроил в двигатель РД-09, имеет люфт, а его передаточное отношение равно $K_p = 1/268$.

Аналогично получим передаточную функцию редуктора [9]

$$W_p(s) = g_2(A) + \frac{g_3(A)}{\Omega} s, \quad (7)$$

где

$$g_2(A) = \frac{K_p}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(1 - \frac{2b_2}{A} \right) + \right. \\ \left. + 2 \left(1 - \frac{2b_2}{A} \right) \sqrt{\frac{b_2}{A} \left(1 - \frac{b_2}{A} \right)} \right] \quad \text{при } A \geq b_2; \\ g_3(A) = -\frac{4K_p b_2}{\pi A} \left(1 - \frac{b_2}{A} \right) \quad \text{при } A \geq b_2.$$

Зона нечувствительности определена экспериментально и равна $2b_2 = 10 \text{ рад}$.

Исполнительный механизм представляет собой пару «винт-гайка», передаточное число которой равно

$$W_v = K_v = 0,12 \text{ мм/рад}. \quad (8)$$

Таким образом, система автоматической стабилизации включает в себя элементы с запаздыванием и нелинейностями и состоит из трех идентичных сепаратных каналов, т. е. представляет собой многосвязную систему автоматической стабилизации с запаздываниями и нелинейностями.

3. Исследование динамики

На рис. 2 [5] представлена матричная структурная схема системы стабилизации, где D , W , C являются квадратными, а x и y — столбцовыми матрицами третьего порядка. Для удобства проведения матричных преобразований от схемы рис. 2 перейдем к матричной структурной схеме, изображенной на рис. 3 [10].

Согласно структурной схеме рис. 3 характеристическое уравнение замкнутой многосвязной системы определится равенством

$$\det \begin{pmatrix} 1 + W_{11}D_{11} & -W_{11}D_{11}C_{12} & -W_{12}D_{11}C_{13} \\ -W_{22}D_{22}C_{21} & 1 + W_{22}D_{22} & -W_{23}D_{22}C_{23} \\ -W_{33}D_{33}C_{31} & -W_{33}D_{33}C_{32} & 1 + W_{33}D_{33} \end{pmatrix} = 0. \quad (9)$$

В силу симметричности многовязной системы имеем:

$$W_{11} = W_{22} = W_{33} = W = \frac{K_{11}K_{21}K_{31}g \left(g_2 + \frac{g_1}{\Omega} s \right)}{T_{31}s^2 + \left(1 + \frac{g_1}{\Omega} g K_{22} + K_7 \right) s};$$

$$D_{11} = D_{22} = D_{33} = D = W_1 = \frac{K_1 e^{-\tau s}}{T^2 s^2 + 2\tau T s + 1};$$

$$C_{12} = C_{21} = C_{13} = C_{31} = C_{23} = C_{32} = C = K_c,$$

где K_c — коэффициент перекрестных связей, которые вызваны факторами конструктивного характера. K_c определен экспериментально и равен 0,16.

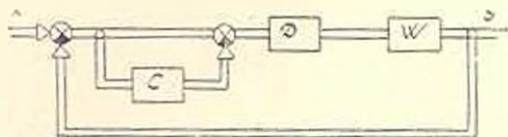


Рис. 2.

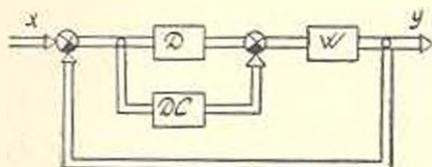


Рис. 3.

Согласно [10] для симметричной многовязной системы определитель можно представить в виде произведения сомножителей

$$(1 + WD + WDC)^2 (1 + WD - 2WDC) = 0. \quad (10)$$

Следовательно, характеристическое уравнение распадается на два одинаковых характеристических уравнения относительного движения

$$1 + WD + WDC = 0 \quad (11)$$

и одно уравнение усредненного движения [10]

$$1 + WD - 2WDC = 0. \quad (12)$$

Подставляя в (12) и (11) выражения передаточных функций, получим характеристическое уравнение относительного движения в виде

$$P_1(s) = (T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1) \left[T_{10} s^2 + \left(1 + \frac{g_1}{\Omega n} + K_{10} K_1 g \right) s \right] + (1 + K_c) K_A K_{yn} g K_b K_{10} \left(g_2 + \frac{g_2}{\Omega} s \right) e^{-\tau s} = 0, \quad (13)$$

а характеристическое уравнение усредненного движения—в виде

$$P_2(s) = (T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1) \left[T_{20} s^2 + \left(1 + \frac{g_1}{\Omega n} + K_{10} K_1 g \right) s \right] + (1 - 2K_c) K_A K_{yn} K_b K_{10} g \left(g_2 + \frac{g_2}{\Omega} s \right) e^{-\tau s} = 0. \quad (14)$$

Для исследования уравнений методом производной аргумента [11] делаем подстановку $j\omega$ вместо s . Тогда для характеристического уравнения относительного движения, с учетом количественных значений параметров системы и зная, что частота автоколебаний совпадает с текущей частотой $\Omega = \omega$ [9] и $e^{-\tau s} = \cos \tau \omega - j \sin \tau \omega$, получим

$$P_1(j\omega) = 0,071\omega^4 - j 1,02(1,098 + 0,128g)\omega^3 - j 0,0051 \frac{\omega^2}{A} - [1,428(1 + 0,128g) + 0,07] \omega^2 - 0,00714 \frac{\omega}{A} + j(1 + 0,128g)\omega + j \frac{0,005}{A} + j 6,68 K g g_2 \cos 0,25\omega + 6,68 K g g_2 \sin 0,25\omega + 6,68 K g g_2 \cos 0,25\omega - j 6,68 K g g_2 \sin 0,25\omega, \quad (15)$$

а для усредненного движения—

$$P_2(j\omega) = 0,071\omega^4 - j 1,02(1,098 + 0,128g)\omega^3 - j 0,0051 \frac{\omega^2}{A} - [1,428(1 + 0,128g) + 0,07] \omega^2 - 0,00714 \frac{\omega}{A} + j(1 + 0,128g)\omega + j \frac{0,005}{A} + j 3,91 K g g_2 \cos 0,25\omega + 3,91 K g g_2 \sin 0,25\omega + 3,91 K g g_2 \cos 0,25\omega - j 3,91 K g g_2 \sin 0,25\omega, \quad (16)$$

где K —безразмерный коэффициент, изменяющийся от 1 до 20, что соответствует, например, изменению крутизны характеристики датчика от 0,15 до 3 В/мм. В этих уравнениях A —амплитуды автоколебаний, приведенные к амплитудам автоколебаний на выходе винтового механизма.

Соответственно, b_1 и b_2 также приведены к выходу винтового механизма.

Согласно методу производной аргумента [11] для исследования характеристического уравнения (9) с помощью характеристической функции $R(\omega)$ необходимо в уравнениях (15) и (16) выделить их вещественные и мнимые части и найти их производные. Для уравнения (10), согласно [11] можно написать

$$R(\omega) = 2R_1(\omega) + R_2(\omega), \quad (17)$$

где

$$R_1(\omega) = \frac{U_1(\omega) V_1(\omega) - U_1'(\omega) V_1'(\omega)}{U_1^2(\omega) + V_1^2(\omega)}, \quad (18)$$

$$R_2(\omega) = \frac{U_2(\omega) V_2(\omega) - U_2'(\omega) V_2'(\omega)}{U_2^2(\omega) + V_2^2(\omega)}. \quad (19)$$

Как известно [11], интеграл от характеристической функции позволяет судить об устойчивости системы, область положительности этой функции определяет область устойчивости или автоколебаний системы, а показатели качества системы достаточно точно оцениваются экстремумом данной функции.

Расчет характеристикой функции при вариации в широких пределах параметра K системы проведен на ЦВМ ЕС-1020 на алгоритмическом языке «Фортран». Анализ расчета показывает, что система асимптотически устойчива при $K < 15$, а при $K \geq 15$ она входит в режим автоколебаний, причем амплитуда и частота автоколебаний при $K = 15$ — критическом значении, соответственно, равны $A = 0,018$ мм и $\omega = 0,9$ рад/сек. В табл. 1 показаны значения амплитуд и частот автоколебаний при различных $K > 14$.

Таблица 1

K	15	16	17	18	19	20
$A, \text{ мм}$	0,018	0,019	0,021	0,023	0,025	0,027
$\omega, \text{ рад/сек}$	0,9	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87

С помощью экстремального значения функции $R(\omega)$ построен переходный процесс $x(t) = A(t) \sin \psi(t)$ системы согласно приближенной методике [9]. Учитывая, что величина, обратная $\max R(\omega)$, характеризует степень затухания переходного процесса системы [11], роль показателя затухания ξ и частоты ω с изменением амплитуды A затухающего переходного процесса играют экстремумы характеристических функций $R(\omega)$ и частоты, при которых имеем эти экстремумы, в зависимости от амплитуды A при данном значении K . Построим переходный процесс для $K = 15$. Значения $\max R(\omega)$ и $\omega_{\max} R(\omega)$ в зависимости от A находим из табл. 2.

Согласно приближенной методике [9] из табл. 2 строим функции $A(t)$ и $\omega(t)$ рис. 4а).

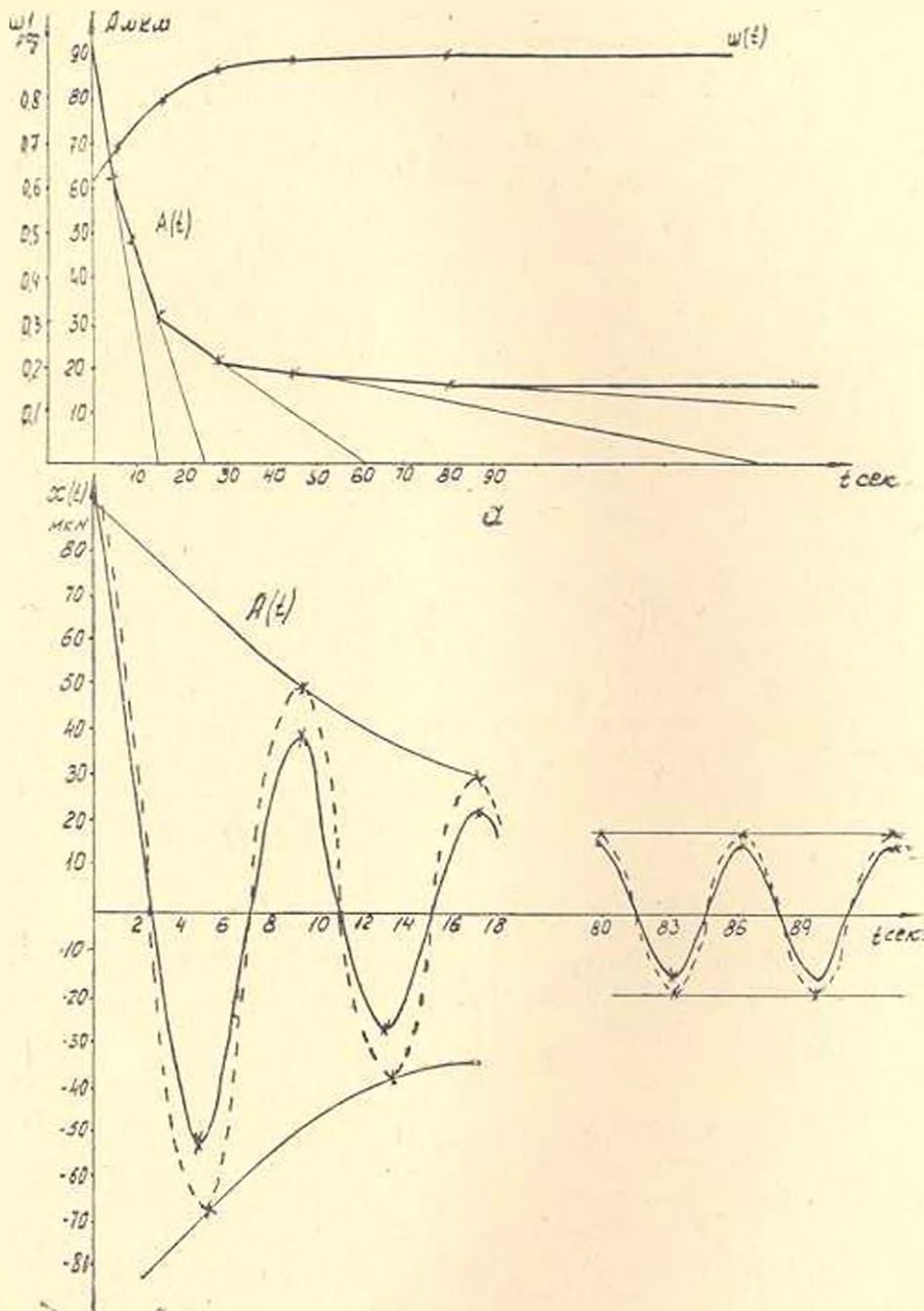


Рис. 1.

Таблица 2

$A, \text{ м.м}$	$\max R (\text{м})$	$\frac{\max R(\text{м})}{\text{рад/сек}}$
0,0053	24,96	0,99
0,0113	— 362,12	0,96
0,0173	— 1208,65	0,91
0,0233	120,19	0,87
0,0293	55,8	0,81
0,0353	38,58	0,81
0,00413	30,14	0,78
0,0473	25,32	0,76
0,0533	22,2	0,73
0,0593	20	0,71
0,0653	18,36	0,69
0,0713	17,1	0,68
0,0773	16,1	0,66
0,0833	15,27	0,64
0,0893	14,59	0,63

Вид переходного процесса системы при $K = 15$, построенного согласно значениям $A(t)$ и $\omega(t)$, показан на рис. 4б, где расчетная линия проведена пунктиром, а экспериментальная характеристика — непрерывной линией. Сравнение результатов показывает, что математическая модель качественно однозначна реальной системе, но количественные характеристики отличаются на 10—15%.

ВНИИРИ

Поступило 28.VI.1978

Ս. Տ. ՍԱՐԿԻՅԱՆ, Վ. Ն. ՆԵՐՏԵՅԱՆ, Պ. Ն. ՄԵԼԿՅԱՆ

ԵՐԿՂԱՅԵԼԻ ԱՆՏԵՆԱՅԻ ՂԵԿԱՎԱՐՈՂ ՀԱՆԴՈՒՅՑԻ ՀԱՐԹԱԿԻ
ԿԱՅՈՒՆԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՆԱԽԱԴԹՈՒՄԸ

Ա մ ֆ ո ֆ ու մ

Անտենայի անհրաժեշտ թույլատրելի ունակության ապահովման համար ավտոմատ կառավարման համակարգից պահանջվում է բարձր ճշտություն, որը կարելի է ստանալ անտենայի սինտպսիկ և կշռային դեֆորմացիաների կոմպենսացիայի ենթահամակարգերի օգնությամբ:

Հողվածը նվիրված է այդ ենթահամակարգերից մեկի՝ երկհայելի անտենայի գեկավորող հանգույցի հարթակի տարածական դիրքի կայունությունն ապահովող ավտոմատ համակարգի նախադժման, պատրաստման և ուսումնասիրման հարցերին: Ենթահամակարգն իրենից ներկայացնում է 12-րդ կարգի ոչ-զծային, հապաղումներով անընդհատ համակարգ, որի հետազոտումն իրագործվել է արգումենտի ածանցյալի մեթոդով ԵՄ—1020 հաշվիչ համարիչի

խա, օգտագործելով «ՃՈՐՏՐԱՆ» արդրիթմական լեզուն: Որոշվել է համահարգի ինքնաառատանումների պարամետրերը (ամպլիտուդ և հաճախակախություն) կախված համակարգի պարամետրերից և մուտքի ազդանշանների կծուսթյուններից՝ փորձնական և տեսական եղանակներով: Արդյունքները համընկնում են 10—15% ճշտությամբ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Цейтлин И. М. Антенная техника и радиоастрономия. М., «Советское радио», 1976.
2. Есепкина Н. А. и др. Радиотелескопы и радиометры. М., «Наука», 1973.
3. Управление антеннами с зеркалами большого диаметра. «Зарубежная радиоэлектроника», № 12, 1977.
4. Геруни П. М., Саркисян Р. А. Система автоматического управления большими антеннами. «Радиотехника», 1964, № 3.
5. Мелкумян Д. О., Персегян В. Н., Саркисян С. Т. Исследование динамики системы трехточечной автоматической стабилизации платформы. «Известия АН Арм ССР серия Т. II.», т. XXX, № 6, 1977.
6. Петросян С. Н., Сагателян О. А., Саркисян С. Т., Татевосян А. С. Фотоэлектрическое устройство для измерения уровня жидкости преимущественно в гидростатических нивелирах. Авторское свидетельство № 522410 от 19.12.74 «Бюллетень изобретений», 1976, № 27.
7. Schell G. Systematische Fehler des hydrostatischen Nivellments und Verfahren zu ihrer Ausschaltung. Deutsche Geodatische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe B; Angewandte Geodasie, Heft 27, 1956.
8. Коченко Ф. Ф. Следящие системы автоматических комплексов. М., «Недра», 1965.
9. Попов Е. П., Пальтов И. П. Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем. М., Физматгит, 1960.
10. Морозовский В. Т. Многоосевные системы автоматического управления. М., «Энергия», 1970.
11. Мелкумян Д. О. Исследование САУ методом производной аргумента. «Известия АН Арм ССР (серия Т. II.)», т. XXIV, № 6, 1971.