

39

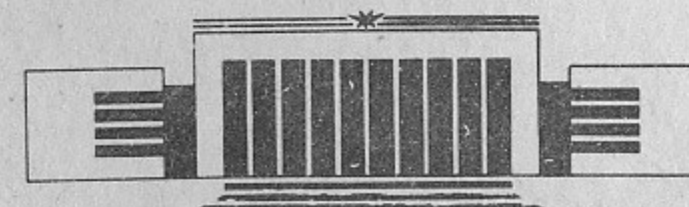


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

В.Е. Балакин, Ю.Д. Валяев, А.В. Колмагоров,
Д.П. Красноносеньких, Л.Г. Леонтьевская

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ПРИВОД
СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ ВЛЭП

ИЯФ 92-50



НОВОСИБИРСК

Прецизионный привод системы позиционирования
элементов ВЛЭПП

Балакин В.Е. Валяев Ю.Д. Колмагоров А.В.
Красноносенских Д.П. Леонтьевская Л.Г.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090, Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

В работе описана экспериментальная установка для прецизионного позиционирования и стабилизации положения ускорительных структур линейного суперколлайдера ВЛЭПП. Приводятся основные характеристики, конструкция привода и устройство системы автоматического управления. Данные полезны для проектирования системы выставки ускорительных и фокусирующих элементов и других систем ВЛЭПП.

Micromover for positioning accelerator
structures at VLEPP

Balakin V.E. Valyaev J.D. Kolmagorov A.V.
Krasnonosenkikh D.P. Leontyevskaya L.G.

Bydker Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, Russia

ABSTRACT

In this work the design of the test facility and the results of measurements. This results will be useful for automatic alignment system design at VLEPP.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	5
2. Устройство привода	7
2.1. Принципиальное устройство	7
2.2. Основные характеристики	8
2.3. Конструкция подвески	8
2.4. Датчик положения	10
2.5. Структурная схема САУ	11
3. Измерение характеристик	13
3.1. Частотные и переходные характеристики	13
3.2. Температурные погрешности	14
3.3. Точностные характеристики	15
4. Оборудование, электроника, автоматизация	15
4.1. Измерительное оборудование	15
4.2. Управляющая электроника	16
4.3. Программа измерения АЧХ и ФЧХ	17
5. Заключение	18
6. Литература	20

Введение

Одним из условий получения высокой светимости на линейных электронных коллайдерах является высокая точность выставки и поддержания положения ускорительных структур и фокусирующих линз в пространстве [1, 2, 3, 4]. Согласно оценкам, точность поддержания магнитной оси квадрупольной линзы в линаке относительно осей двух соседних линз должна составлять несколько нанометров, точность поддержания оси ускорительной структуры - несколько десятков нанометров. Применение метода "автофазировки" [5] позволяет в несколько раз снизить требования на точность положения элементов фокусирующей системы. Режим "бегущего фокуса" [6] в месте встречи пучков так же снижает примерно в пять раз требования к эмиттансу сталкивающихся пучков. С учетом этих обстоятельств оценки дают требования на точность положения магнитных осей квадрупольных линз в сотые доли микрона и требования на точность положения оси структуры в десятые доли микрона.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из условий получения высокой светимости на линейных электронных коллайдерах является высокая точность выставки и поддержания положения ускорительных структур и фокусирующих линз в пространстве [1, 2, 3, 4]. Согласно оценкам, точность поддержания магнитной оси квадрупольной линзы в линаке относительно осей двух соседних линз должна составлять несколько нанометров, точность поддержания оси ускорительной структуры - несколько десятков нанометров. Применение метода "автофазировки" [5] позволяет в несколько раз снизить требования на точность положения элементов фокусирующей системы. Режим "бегущего фокуса" [6] в месте встречи пучков так же снижает примерно в пять раз требования к эмиттансу сталкивающихся пучков. С учетом этих обстоятельств оценки дают требования на точность положения магнитных осей квадрупольных линз в сотые доли микрона и требования на точность положения оси структуры в десятые доли микрона.

На конструкцию ускорителя будут постоянно воздействовать дестабилизирующие факторы: диффузное движение земной коры, температурные дрейфы, сейсмические и техногенные колебания. Измерение величин этих факторов показывает, что они будут вносить погрешности, в десятки и сотни раз превышающие необходимую точность [7, 8]. Для подавления этих погрешностей нужна активная система позиционирования элементов линака. В проекте ВЛЭПП предполагается что система будет измерять траекторию пролета

пучка относительно элементов и позиционировать их таким образом, чтобы получить максимально прямолинейную траекторию и минимально возможный прирост эмиттанса пучка [9, 10].

Конструктивно эта задача будет решаться следующим образом: Все элементы линака будут располагаться на несущих пятиметровых платформах (см. рис 1) При этом платформа должна подавлять высокочастотные вибрации (свыше 10 Гц). Медленные дрейфы (менее 10 Гц) будут подавляться с помощью обратной связи по пучку, путем механического перемещения ускорительных структур относительно платформ и "электрического" перемещения магнитных осей квадрупольных линз. Основные требования к платформе: низкая добротность (отсутствие собственных резонансов), высокая жесткость и стабильность формы.

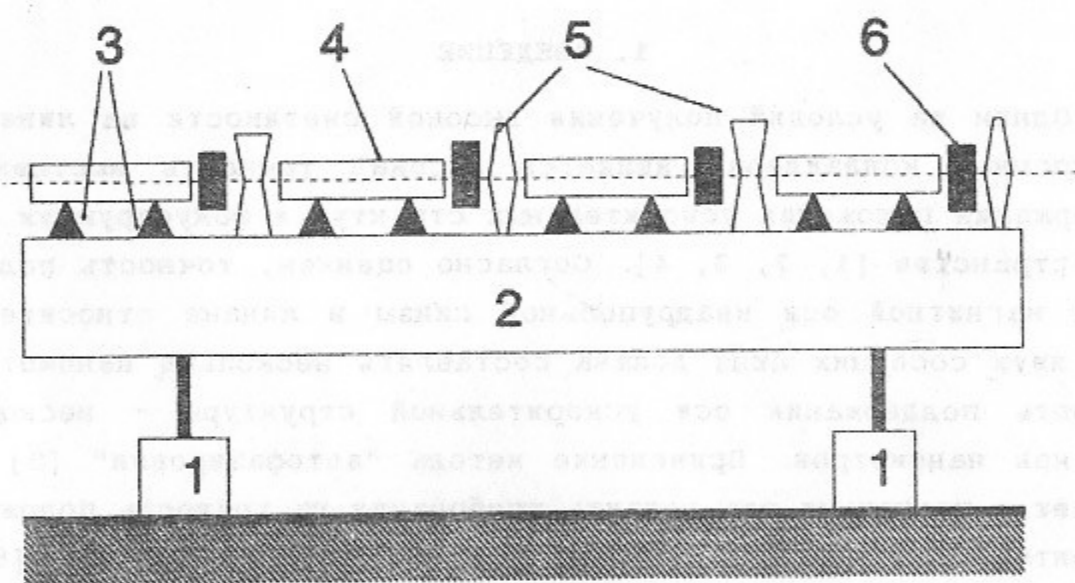


Рис. 1. 1. Виброгасящие опоры и грубая подстройка. 2. Несущая платформа 3. Приводы позиционирования ускорительной секции. 4. Уск. секция. 5. Квадрупольные линзы. 6. Датчик положения пучка.

Требования к системе позиционирования: обеспечение плавного непрерывного перемещения с высокой точностью и в достаточно большом диапазоне для перекрытия диапазона возможных дрейфов.

Конструктивные требования к приводу для позиционирования ускорительных структур: простота и низкая стоимость конструкции (откуда следует что лучше использовать элементы традиционной техники), большое время жизни (отсутствие трущихся и люфтовых соединений), подавление внешних воздействий (со стороны сопрягающихся конструкций), малые собственные дрейфы.

2. УСТРОЙСТВО ПРИВОДА

2.1. ПРИНЦИПИАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

На рис. 2 схематично изображен привод системы позиционирования и стабилизации элементов ВЛЭПП. На жестких опорах 1 и на пружинах 2 подвешен держатель ускорительной структуры 3. Снизу расположен электромагнит 4, сверху датчик перемещений 5 включенный в цепь обратной связи автоматической управляющей системы 7. Система создает ток в электромагните, под действием силы притяжения пружины растягиваются и держатель 3 перемещается в вертикальной плоскости. Это смещение измеряется датчиком и устанавливается таким образом чтобы сигнал обратной связи соответствовал управляющему сигналу. Если мы будем изменять сигнал на управляющем входе, то и перемещение держателя будет изменяться соответственно.

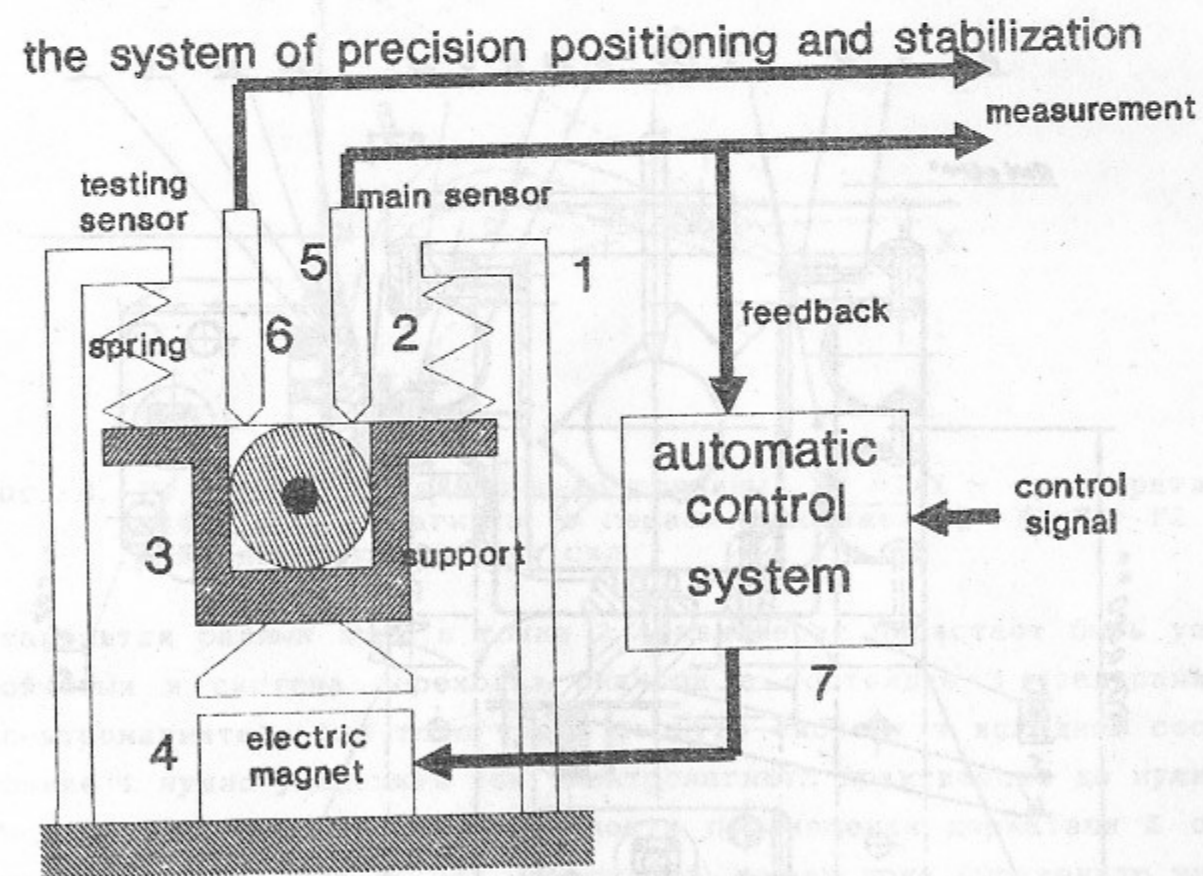


Рис. 2.

2.2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ

2 степени свободы (на рис. 1 условно показана 1 степень свободы)

Диапазон перемещений	200 мкм
Точность позиционирования (разрешающая способность)	1 нм
Время перехода на 1 мкм	100 мс
Рабочий диапазон частот	0-20 Гц
Подавление внешних вибраций на частоте 10 Гц	15 дБ
	1 Гц 35 дБ
Собственная резонансная частота	40-70 Гц
Нагрузочная способность	до 100 кг
Рассеиваемая мощность	5 Вт
Габаритные размеры	300x100x300 мм
Вес	10 кг

2.3. КОНСТРУКЦИЯ ПОДВЕСКИ

На рис. 3 изображена конструкция одной из подвесок. Держатель ускорительной секции 7 подвешен на дугообразных пружинах

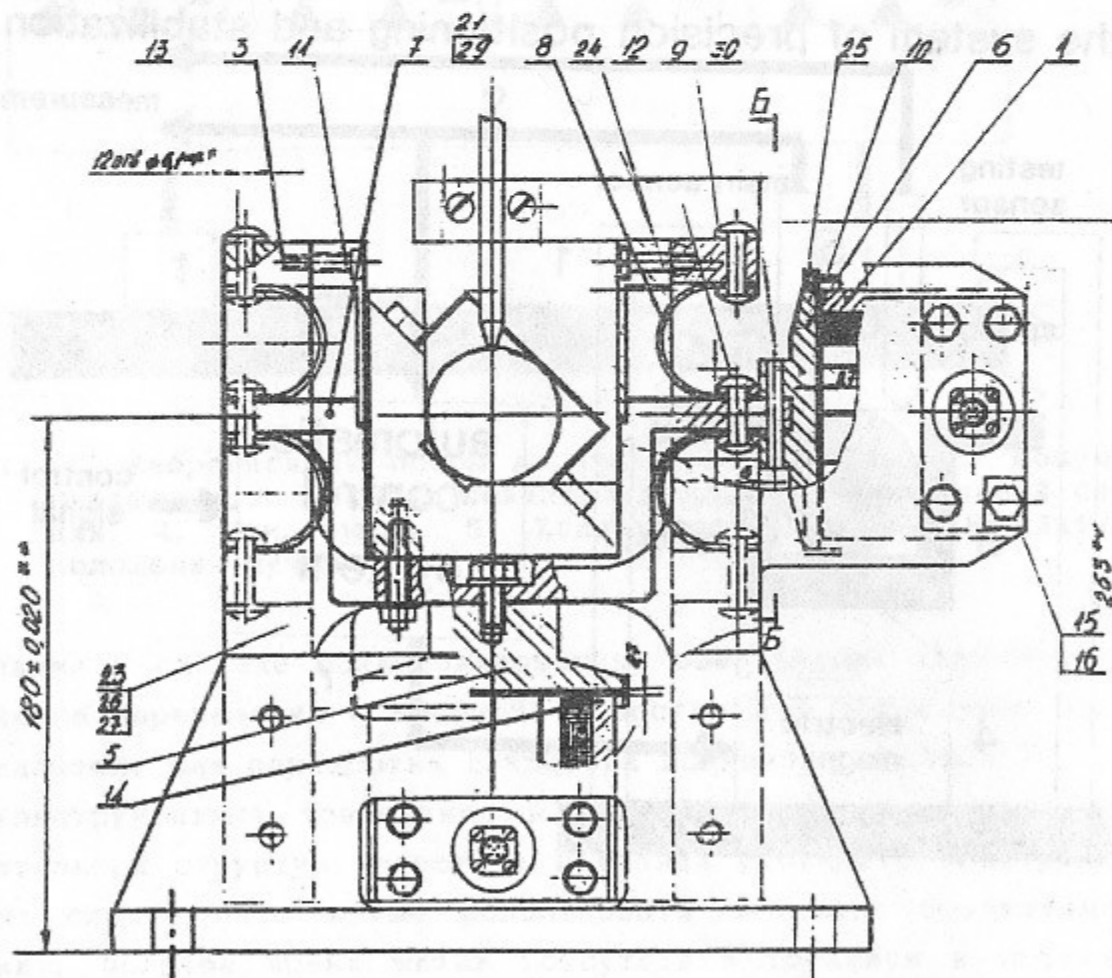


Рис. 3.

8 на жесткой станине 3 и имеет две степени свободы. Приводится в действие электромагнитами вертикального (5, 14) и горизонтального (6, 1) смещения.

При проектировании подвески авторы стремились выполнить следующие требования: простота и надежность конструкции, большое время жизни, отсутствие трущихся и люфтовых соединений, высокая разрешающая способность по перемещению.

Рассмотрим принцип действия подвески. На рис. 4 показаны силы действующие на подвижный элемент подвески в одной плоскости в зависимости от X зазора электромагнита.

При отсутствии других внешних сил точка устойчивого равновесия 1 соответствует $F_3 = 0$. При увеличении тока I точка 1 смещается влево и следовательно смещается подвижный элемент (держатель). Одновременно с этим уменьшается $K_3 = dF_3/dX$ - эквивалентная жесткость системы в точке 1 (в результате понижается резонансная частота колебательной системы). При дальнейшем увеличении тока K_3

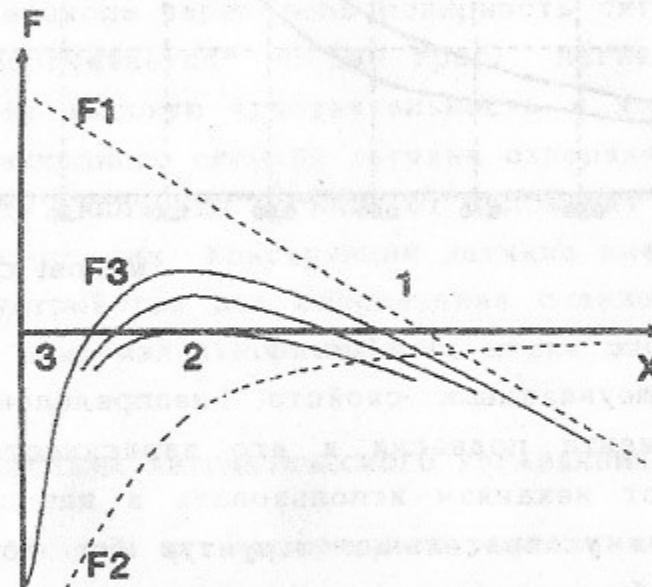


Рис. 4. $F_1 = k \cdot X$ - линейная сила пружины. $F_2 = I/X$ - сила притяжения электромагнита (в первом приближении). $F_3 = F_1 + F_2$ - равнодействующая двух сил.

становится равным нулю в точке 2, равновесие перестает быть устойчивым и система переходит скачком в состояние 3 (залипание электромагнита). Для того чтобы вернуть систему в исходное состояние 1 нужно уменьшить ток электромагнита практически до нуля.

На рис. 5 показана зависимость перемещения держателя X от тока электромагнита I . Эта зависимость имеет ярко выраженную нелинейность и гистерезис изза намагничивания сердечника электромагнита. Вообще говоря состояние устойчивого равновесия 1 (рис. 4) является квазистойчивым так как после приложения внешней силы

система не возвращается в исходную точку (гистерезис зависимости $X = f(F_{\text{внеш}})$ при $I = \text{const}$). Кроме того данный механизм имеет сильную температурную зависимость, в десятки раз превышающую температурные коэффициенты линейного расширения материалов (в пересчете на размеры подвески); перемещение в одной плоскости влияет на перемещение в другой.

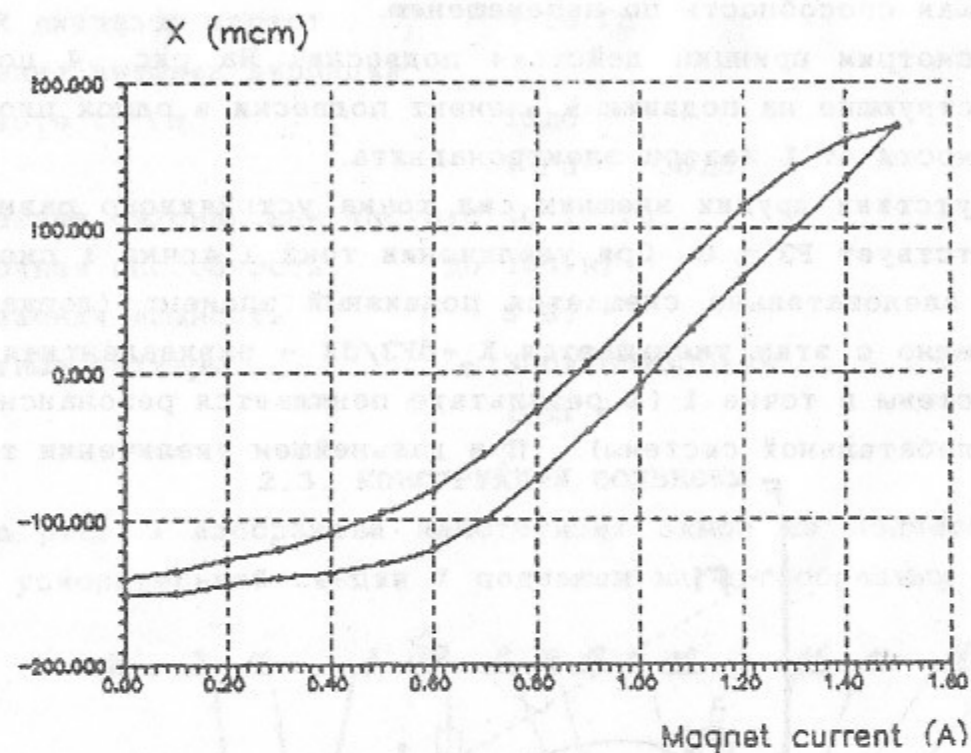
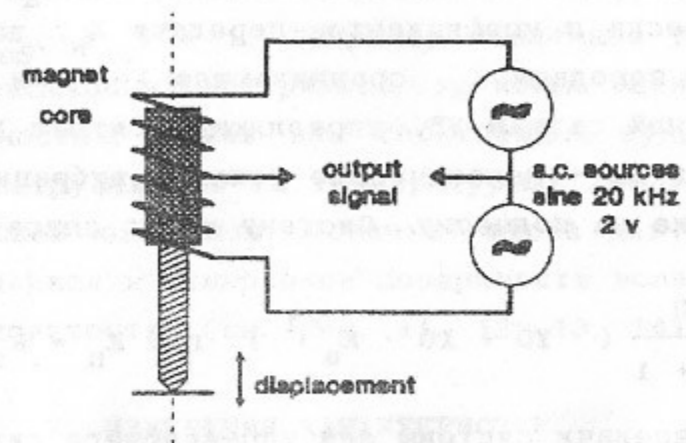


Рис. 5.

Из за вышеуказанных свойств (неопределенность положения подвижного элемента подвески и его зависимость от нескольких параметров) этот механизм использовать в качестве привода для позиционирования ускорительных структур без обратной связи по положению было бы неудобно.

2.4. ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ

Принципиальное устройство датчика изображено на рис. 6. Датчик представляет собой индуктивный делитель переменного напряжения. Напряжение запитки от двухполярного синусоидального источника 20 кГц подается на две катушки расположенные соосно и имеющие общую среднюю точку с которой снимается измерительный сигнал. Подвижный элемент магнитной системы (сердечник) жестко связан с измерительным штоком. Если сердечник находится в средней точке, индуктивные сопротивления катушек равны и измерительный сигнал равен нулю. При перемещении сердечника изменяется баланс индуктивностей и появляется сигнал, амплитуда которого пропорциональ-



Principle design of position sensor

Рис. 6.

на смещению. При переходе через ноль полярность сигнала изменяется (синус "переворачивается" на 180 град). Магнитная система датчика обеспечивает высокую чувствительность и хорошую линейность зависимости выходного сигнала датчика от перемещения. Нелинейность зависимости амплитуды сигнала от положения штока не более 1% в диапазоне ± 1 мм. Конструкция датчика имеет специальное прецизионное устройство для обеспечения плавного безлюфтового параллельного движения измерительного штока внутри корпуса.

2.5. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Структурная схема системы автоматического управления (см. рис. 7) содержит следующие основные элементы:

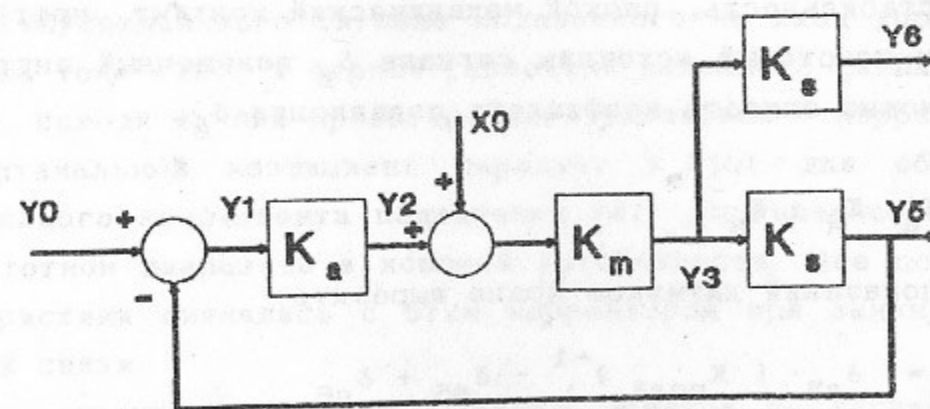


Рис. 7.

Усилитель-корректор с коэффициентом передачи $K_a(j\omega)$, (далее просто K_a), подвеска с коэффициентом передачи K_M , датчик положения с коэффициентом передачи K_S , сравнивающее (+ -) и суммирующее (++) звено. Выходной сигнал Y_5 , управляющий сигнал Y_0 , эквивалентный сигнал помехи X_0 - механические усилия, вибрация и тепловой шум воздействующие на подвеску. Систему можно описать уравнением:

$$Y_5 = \frac{K_{\Pi}}{K_{\Pi} + 1} (Y_0 + X_0 \cdot K_a^{-1}), \text{ где } K_{\Pi} = K_a \cdot K_M \cdot K_S \quad (1)$$

Коэффициент передачи системы для управляющего сигнала:

$$K_Y = \frac{Y_5}{Y_0} = \frac{K_{\Pi}}{K_{\Pi} + 1} \quad (2)$$

(зависимость K_Y от частоты - характеристика управления см. рис. 8).

Коэффициент передачи помехи X_0

$$K_{\text{пом}} = \frac{Y_5}{X_0} = \frac{1}{K_a + (K_M \cdot K_S)^{-1}} \quad (3)$$

Обратная величина $K_{\text{пом}}$ есть коэффициент подавления:

$$K_{\text{под}} = K_a + (K_M \cdot K_S)^{-1} \quad (4)$$

Зависимость $K_{\text{под}}$ от частоты - частотная характеристика подавления внешних помех (см рис. 10)

Если погрешность датчика положения (собственные шумы, температурная нестабильность, плохой механический контакт, люфт) представить как некоторый источник сигнала δ_S помещенный внутри датчика, то можно описать коэффициент подавления δ_S :

$$K_{\text{под}\delta_S} = K_a \cdot K_M + K_S^{-1} \quad (5)$$

Разность показаний датчиков можно выразить:

$$Y_5 - Y_6 = \delta_{S5} \cdot (K_{\text{под}\delta_S})^{-1} - \delta_{S5} + \delta_{S6} \quad (6)$$

В интересующей нас частотной области 0 - 0.1 Гц коэффициент подавления (5) очень большой ($10^3 - 10^6$), поэтому можно написать:

$$Y_5 - Y_6 = -\delta_{S5} + \delta_{S6} \quad (7)$$

Из этой разности нельзя извлечь погрешности, коэффициент корреляции которых $\rho(\delta_{S5}, \delta_{S6}) = 1$, например медленный температурный дрейф линейного расширения материалов, но можно оценить величину случайных погрешностей, таких как собственный шум, "искривление" размеров конструкции из за температурных градиентов возникающих при воздушной конвекции, "скачки" штока датчика при движении перпендикулярном к измеряемой поверхности вследствие сухого трения и шероховатости. (см. рис. 11, 12, 13, 14).

3. ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК

Все измерения производились по схеме изображенной на рис. 2. Датчики 5, 6 измеряют положение ускорительной структуры в вертикальной плоскости относительно жесткой станины подвески (см. рис. 3). При этом датчик 5 включен в цепь обратной связи САУи является управляющим. Датчик 6 - контрольный. Подвески со структурой установлены напятиметровой стальной платформе. Платформа на "мягких" ($F_{\text{рез}} = 10$ Гц) опорах.

3.1. ЧАСТОТНЫЕ И ПЕРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рассмотрим зависимость от частоты коэффициентов передачи основных звеньев цепи рис. 7. Коэффициент K_S в интересующем нас диапазоне 0 - 100 Гц не зависит от частоты, фазовый сдвиг практически нулевой.

Передачная характеристика подвески $K_M(j\omega)$ или АЧХ и ФЧХ частотнозависима в диапазоне 1 - 100Гц, объясняется резонансными свойствами колебательной системы и потерями в электромагните. На рис. 8 показаны АЧХ и ФЧХ одной из конструкций подвески. Характеристики сняты при разомкнутой петле обратной связи по соотношениям синусоидального сигнала подаваемого на вход управляемого источника тока (Y_2), и первой гармоники выходного сигнала датчика (Y_5). Исходя из них проектировался усилитель - корректор имеющий оптимальный коэффициент передачи $K_a(j\omega)$ для обеспечения максимального коэффициента подавления (4), управляемости в широком частотном диапазоне и хорошей устойчивости. Все последующие характеристики снимались с этим корректором при замкнутой цепи обратной связи.

Из характеристики управления снятой по сигналам $Y_5 - Y_0$ (рис. 9) видно что система хорошо управляется в диапазоне

0 - 20 Гц: амплитуда передается без искажений, отставание фазы $\leq 45^\circ$. В диапазоне 20 - 100 Гц частотная и фазовая характеристики сильно "изломаны" из-за резонансных свойств конструкции; добиться лучшей управляемости очень тяжело т.к. система нелинейна и ее резонансы "плавают" в зависимости от положения.

Характеристика подавления снималась "электрическим" способом по сигналам X0 - Y5 а также "механическим" способом по отношению амплитуд сигналов Y5 при включенной и выключенной обратной связи, источником внешней силы был электродинамический вибратор, установленный на уск. структуру, который возбуждался синусоидальным сигналом в диапазоне 10 - 100 Гц. Оба эти способа дали близкие результаты (на рис. 10. показана некоторая усредненная характеристика подавления). Характеристика хорошо демонстрирует "астатицизм" системы (очень малая статическая ошибка управления т.к. коэффициент усиления петли обратной связи K_{Π} на низких частотах очень большой). Повысить усиление на частотах 20 - 100 Гц невозможно по причине самовозбуждения САУ.

Переходные характеристики так же характеризуют качество управления - показывают время перехода из одного устойчивого состояния в другое при ступенчатом входном воздействии. На рис. 11 показаны типичные переходные характеристики (шаг ± 1 мкм при различных положениях + 100 мкм, 0, - 100 мкм) быстрое затухание выбросов говорит о хорошем запасе устойчивости. Несимметричность переходов вверх и вниз возникает вследствие динамической нелинейности системы.

3.2. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ

Для исследования нестабильности датчика был сделан специальный держатель трубчатой конструкции, внутрь которой вставляется и зажимается датчик. На рис. 14 показаны сигналы датчика на держателе за 10 минут а) на открытом воздухе, б) в термостатической камере. Как видно из графиков, дрейф показаний датчика в сильной степени связан с изменением температуры окружающей среды.

На рис. 12 показаны сигналы Y5, Y6 датчиков для подвески находящейся на открытом воздухе за 10 минут, на рис. 13 тоже самое когда подвеска была сверху накрыта х/б тканью (1 слой). Максимальный разброс показаний 15 нм в результате уменьшился до 2 нм. Это можно объяснить следующим: конвекционные воздушные по-

токи создают в элементах конструкции переменные температурные градиенты, которые "искривляют" их размеры. Защитная ткань уменьшает скорость конвекционных потоков, делает их более равномерными, следовательно уменьшаются (интегрируются) градиенты внутри материалов. Из вышеуказанных измерений можно заключить что собственный дрейф системы относительно базовой плоскости имеет температурное происхождение и его величина определяется коэффициентами линейного расширения материалов конструкции и их теплопроводностью.

3.3. ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИВОДА

На рис. 15 показаны сигналы, снятые с контрольного датчика (Y6) при синусоидальном управляющем (Y(t)) сигнале с амплитудой ± 100 мкм и 10 нм соответственно. Перемещение хорошо повторяет форму управляющего сигнала при больших амплитудах, при малых на сигнал положения заметно накладывается сейсмический шум.

Рис. 16 демонстрирует разрешающую способность системы по перемещению. Показаны управляющий ступенчатый сигнал и соответствующий ему сигнал перемещения с контрольного датчика. Величина "ступеньки" соответствует 1 нм.

Рис. 17 показывает способность системы сопротивляться внешним статическим нагрузкам. На стальной уголкового держатель ускорительной структуры был положен а затем снят грузик массой около 1 кг. Сигналы сняты с управляющего и контрольного датчиков при неизменном входном сигнале. На сигнале с датчика обратной связи видны возмущения во время изменения нагрузки, постоянное смещение значительно меньше уровня сейсмических шумов (при нагрузке 10 кг постоянное смещение так же заметить не удалось). Сигнал с контрольного датчика показывает прогиб держателя (см. поясняющую картинку) при расстоянии между датчиками 30 мм.

4. ОБОРУДОВАНИЕ, ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ

4.1. ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Все измерения производились с помощью автоматизированного комплекса на базе ЭВМ МС1212 и КАМАК-оборудования производства ИЯФ. Для измерения частотных характеристик в диапазоне 0.1 - 100 Гц был использован задающий генератор ГЗ-110, который управлялся в режиме дистанционного управления через два управляющих ре-

гистра В0628 в крейте КАМАК. Входной и выходной сигналы объекта измерения подавались на АЦП 101СК Ц0623. Измеренная и обработанная информация выводилась в графическом виде на ЦДР-2. Для снятия переходных характеристик так же использовался ЦАП Ц1102.

При измерении "точных" характеристик использовался как источник опорного и управляющего напряжения 20-разрядный ЦАП Ц0643. Сигналы с датчиков измерялись 20-разрядным интегрирующим вольтметром Ц0609 "Липенок", проверялись вольтметром В7-34А.

4.2. УПРАВЛЯЮЩАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

На начальном этапе изучения работы системы был использован измерительный прибор МИКРОН-02 (измеритель перемещений, состоит из аналогового преобразователя сигналов и АЦП с выводом результата измерения на табло в диапазонах ± 2000 , ± 200 , ± 20 мкм)

Работать с таким прибором было очень удобно т.к. сразу имеется информация об интересующей нас физической величине, но в процессе измерений точности системы выяснилось что прибор имеет большую внутреннюю погрешность (дрейф) порядка 200-300 мкв/мин или соответственно 4-6 нм/мин. Такая погрешность нас не устраивала и была специально разработана электроника для измерения и управления подвеской.

Функциональная схема электроники показана на рис. 18. Высокостабильный (по амплитуде) генератор напряжения запитки датчика 20 кГц $2 \times 2 \text{ В} \pm 0.001\%$ работает следующим образом: транзисторный генератор, выходной сигнал которого пропорционален питающему напряжению $U_{ПГ}$ запитывается таким напряжением, при котором амплитуда выходного равна 2 В. Питающее напряжение $U_{ПГ}$ вырабатывается путем сравнения и интегрирования опорного напряжения $U_{оп}$ и выпрямленного напряжения запитки $U_{ос}$ (обратная связь по амплитуде). Выпрямление осуществляет двухтактный синхронный детектор на полевых ключах, сигнал управления для него $U_{сд}$ вырабатывает формирователь из того же напряжения запитки. Источник опорного напряжения выполнен на базе усилителя МДМ с малым входным дрейфом (~ 0.5 мкв/град) и прецизионного термостабилизированного стабилитрона КС191 через который пропускается ток соответствующий термостабильной точке. Собственная нестабильность ИОНа проверялась в течение дня и не превышала 10 мкв. Сравняющий интегратор тоже по схеме МДМ: малый дрейф и большой

статический $K_{ус} \sim 10^7$. Генератор запитки выполненный по такой схеме имеет стабильность амплитуды $10^{-5}-10^{-6}$.

Двухполярное напряжение запитки подается на параллельно включенные датчики положения. Измерительный сигнал с датчика $U_{изм}$ усиливается полосовым усилителем, выпрямляется однократным синхронным детектором (с выхода СД сразу имеем сигнал положительной либо отрицательной полярности) далее сглаживается и усиливается. Полученное напряжение постоянного уровня есть измерительный сигнал относительного положения штока датчика чувствительностью 50 мкв/мм. Диапазон измеряемых перемещений ± 10 в (± 200 мкм). Далее этот сигнал в УСО сравнивается с управляющим напряжением, разностный сигнал усиливается усилителем-корректором АЧХ и ФЧХ и подается на широтно-импульсный модулятор (учитывая что нагрузка индуктивная очень выгодно управлять током нагрузки ключем, периодически подключаем ее к источнику питания; при этом пульсации тока нагрузки незначительные и имеем высокий КПД усилителя мощности), где преобразуется в скважность импульсного сигнала, управляющего мощным выходным каскадом. Для улучшения характеристики управления системы усилитель мощности имеет отрицательную обратную связь по току, и является управляемым источником тока в диапазоне 0 - 100 Гц. Система создает такой ток нагрузки при котором обеспечивается равенство сигнала положения и управляющего напряжения. Зависимость положения управляемого объекта от управляющего напряжения линейная с точностью $\leq 0.1\%$.

4.3. Программа измерения частотных характеристик

Измерение входного и выходного сигнала осуществлялось одновременно двумя каналами АЦП101СК. Полученные 2 массива целых (10-разрядных) чисел X_1 и X_2 обрабатывались следующим образом:

Входной сигнал: X_{1i} (синусоидальный) $i = 0..2047$

Выходной сигнал: X_{2i}

Из частоты входного сигнала и времени выборки АЦП определялись числа: m - длина массива данных, содержащая целое число периодов входного сигнала, и n - длина массива данных, содержащего четверть периода входного сигнала, при условии, что $m + n \leq 2048$.

Находим

$$k_{\sin} = \frac{\left(\sum_{i=0}^{2047} X_{1i} * X_{2i} \right) * 2}{m * \max(X_{1i})} \quad (8)$$

$$k_{\cos} = \frac{\left(\sum_{i=0}^2 X_{1i} * X_{2(i+n)} \right) * 2}{m * \max(X_{2i})} \quad (9)$$

$k_{a1} = \max(X_{1i})$ - амплитуда входного сигнала.

Зная коэффициент преобразования из единиц измерения АЦП в вольты $a_{аср}$ вычисляем:

$K_{\sin} = k_{\sin} * a_{аср}$ - коэффициент синуса первой гармоники при разложении выходного сигнала в ряд Фурье. (10)

$K_{\cos} = k_{\cos} * a_{аср}$ - коэффициент косинуса первой гармоники при разложении выходного сигнала в ряд Фурье. (11)

Используя найденные величины находим:

Амплитуда первой гармоники выходного сигнала:

$$K_{a2} = \sqrt{K_{\sin}^2 * K_{\cos}^2} \quad (12)$$

Сдвиг фазы выходного сигнала по отношению к входному:

$$cf = \arctg\left(\frac{K_{\sin}}{K_{\cos}}\right) \quad (13)$$

Отношение первых гармоник выходного и входного сигналов:

$$20 * \log\left(\frac{K_{a2}}{K_{a1}}\right) \quad (14)$$

Для снижения погрешности измерений возникающих от электрических шумов и наводок, измерения производились многократно, затем вычислялись средние значения выходных параметров (13, 14).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ был опробован и испытан привод, который позволяет позиционировать ускорительную структуру с высокой точностью относительно базовой платформы и стабилизировать её положение (подавлять внешние силы, воз-

действующие на структуру в области низких частот) Видимо, данный (или подобный) привод можно использовать для изучения работы системы автоматической выставки элементов ВЛЭПП по пучку на этапе макетирования стометровой секции. При этом должны выполняться вышеупомянутые требования к несущей платформе. В сравнении с подобными работами [11, 12], в которых описываются системы позиционирования и подавления вибраций для выставки японского линейного коллайдера на основе пьезодвигателей (см. таб.).

Control stage*, КЕК, JLC		ВЛЭПП, подвеска (привод)	
Movable range	21 мсм	200 мсм	Диапазон перемещений
Resonant frequency	250 Hz	40-70 Hz	Резонансная частота
Response time	40 msec/мсм	100 msec/мсм	Время перехода на 1 мкм
Position resolution	5 nm	1 nm	Разрешение по перемещению
Load capacity	20 kg	50 kg	Грузоподъемность
Vibration damping			Подавление вибраций
	20 Hz	-20 db	-10 db
	10 Hz	-24 db	-15 db
	1 Hz	-29 db	-35 db
	0.1 Hz	-28 db	-55 db
Dimension	100x100mm	260x150mm	Размеры

Наш привод имеет следующие преимущества:

- 1) Значительно больше диапазон точного непрерывного перемещения.
- 2) Большая нагрузочная способность.
- 3) Конструкция состоит из элементов традиционной техники и технологии, следовательно не возникнет трудностей связанных с производством; единственный прецизионный элемент-датчик положения.
- 4) Не нужно высокое напряжение для питания двигателей, и соответственно нет сложностей связанных с применением высоковольтной техники.

По характеристикам быстродействия (подавления вибраций) наш привод несколько уступает пьезодвигателям.

Достоинствами привода является простота конструкции и низ-

кая стоимость; отсутствие трущихся узлов и люфтовых соединений, следовательно большой "срок жизни".

Недостаток нашего привода: для поддержания постоянного положения требуется энергия; при отключении напряжения питания или выходе из строя управляющей электроники он выйдет за пределы рабочего диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В.Е., Будкер Г.И., Скринский А.Н. Возможности создания установки со встречными электрон-позитронными пучками на сверхвысокие энергии. Доклад на Международном семинаре "Проблемы физики высоких энергий и управляемого термоядерного синтеза", 24-26 апреля 1978 г. В кн.: Проблемы физики высоких энергий и управляемого термоядерного синтеза. М. Наука, 1978.
2. Балакин В.Е., Кооп У.А., Новохатский А.В., Скринский А.Н., Смирнов В.П. В кн.: Тр. шестого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978. - Дубна 1979, т. 1, с. 143.
3. Balakin V.E., Novokhatski A.V., Smirnov V.P. VLEPP: Transverse Beam Dynamics. Proceedings of the 12th Intern. Conf. on High Energy Accelerator, Fermilab, 1983, p. 119.
4. Balakin V.E., Novokhatski A.V., Smirnov V.P. VLEPP: Stochastic Beam Heating. IBID, p.121.
5. Балакин В.Е. Подавление стохастического разогрева пучка в линейном коллайдере. Препринт ИЯФ 88-100, Новосибирск, 1988.
6. Balakin V.E. "Travelling Focus" regime in linear collider VLEPP., 7th ICFA Workshop on Beam Dynamics. UCLA Faculty center, Los Angeles, California. May 13-16, 1991.
7. Баклаков Б.А. Лебедев П.К. Пархомчук В.В. Токмаков В.А. Трапезников Н.Л. Серый А.А. Шильцев В.Д. Измерение уровня вибраций в тоннеле УНК. - Препринт ИЯФ СО АН СССР 90-88, Новосибирск, 1990.
8. Баклаков Б.А. Лебедев П.К. Пархомчук В.В. Серый А.А. Слепцов А.И. Шильцев В.Д. Изучение корреляционных и мощностных характеристик колебаний земной поверхности в районе комплекса УНК. Препринт ИЯФ 91-15. Новосибирск, 1991.

9. Balakin V.E. Status VLEPP. Third Int. Workshop on linear collider LC91. BINP, Protvino, September 17-27, 1991.
10. Balakin V.E. Adaptive structure VLEPP. Third Int. Workshop on linear collider LC91. BINP, Protvino, September 17-27, 1991.
11. Ishihara N. et al. A test facility of super accurate alignment system for a linear collider. Proceedigs of the first international workshop on Accelerator Alignment, SLAC 1989.
12. Ishihara N. et al. Proceedings of the First Workshop on Japan linear collider. KEK, October 24-25, 1989.
13. Теория автоматического управления. Учеб. для вузов под ред. ак. А.А. Воронова. Москва "Высшая школа" 1986.
14. Блоки в стандарте КАМАК. Препринт ИЯФ.

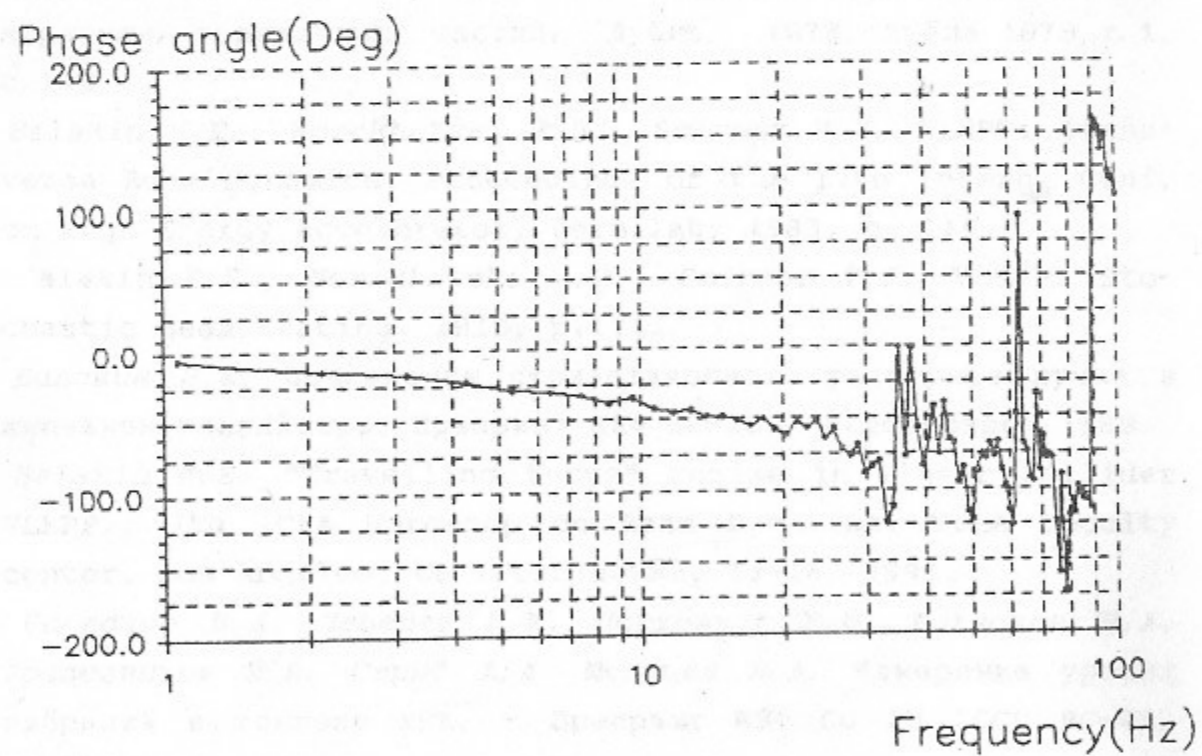
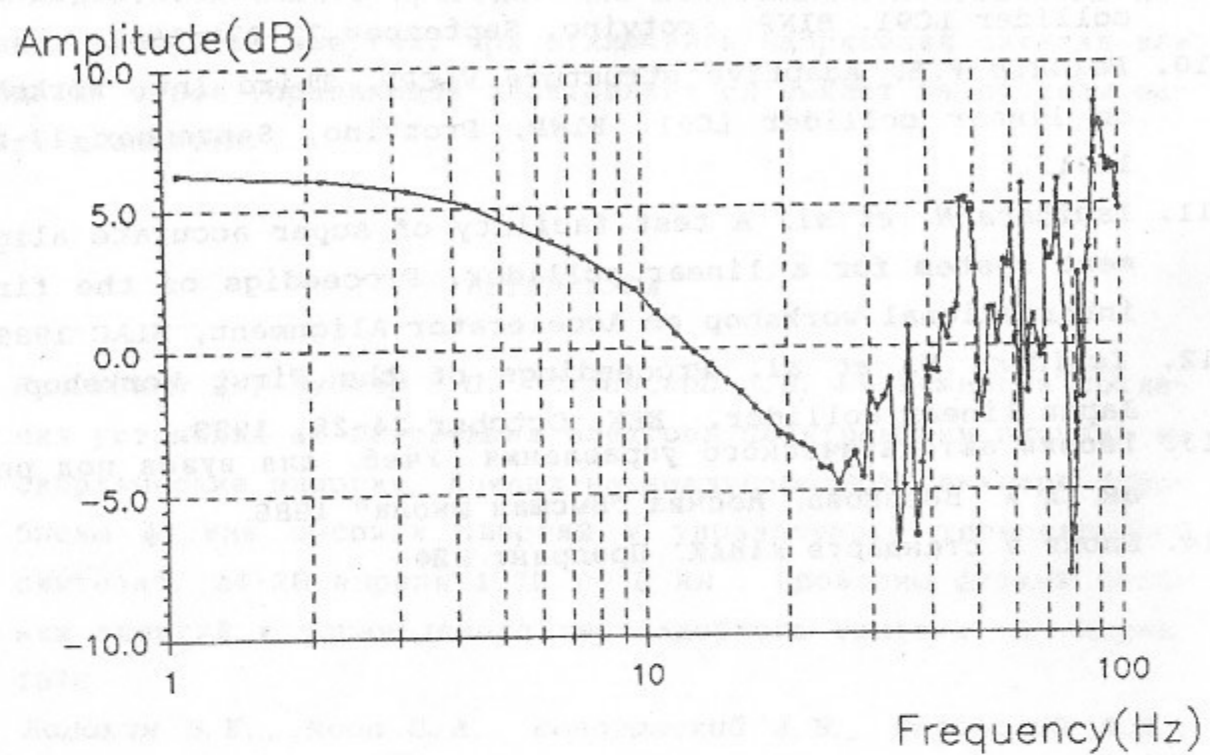


Рис. 8. Амплитудно - частотная и фазо - частотная характеристики вески.

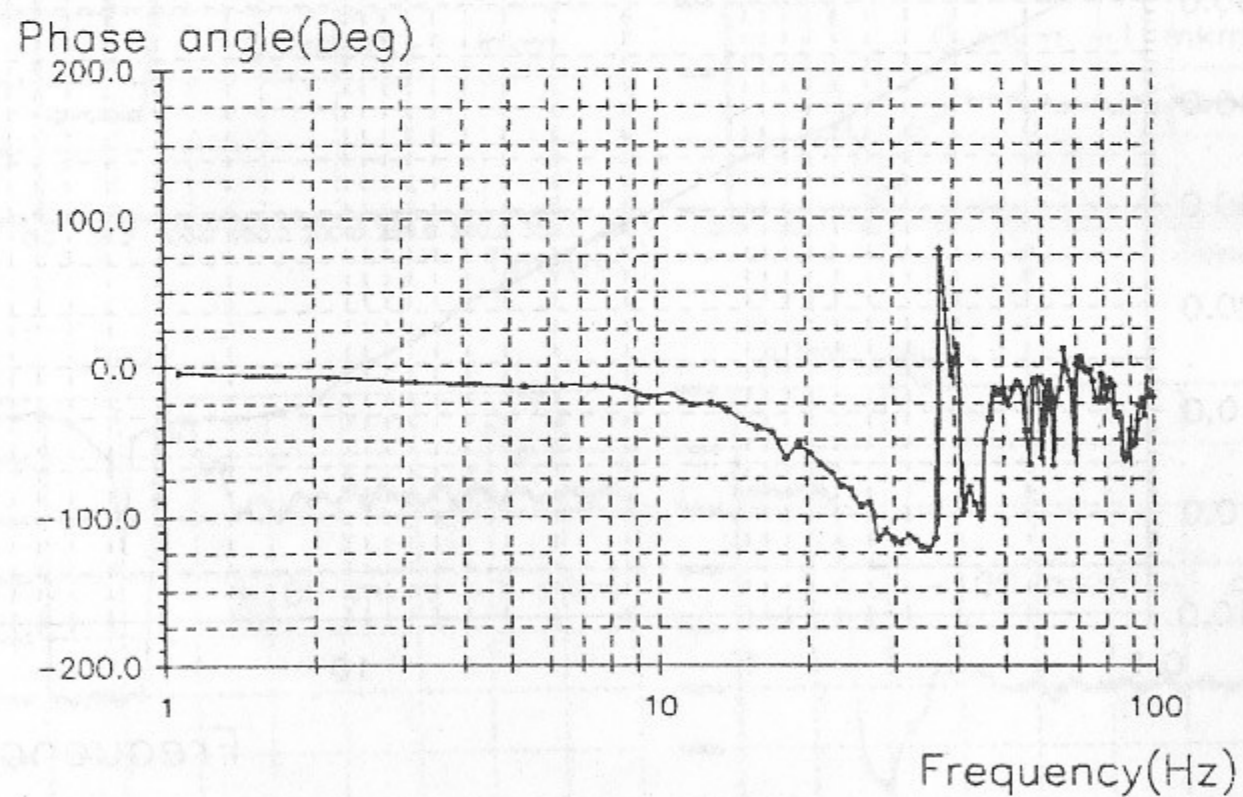
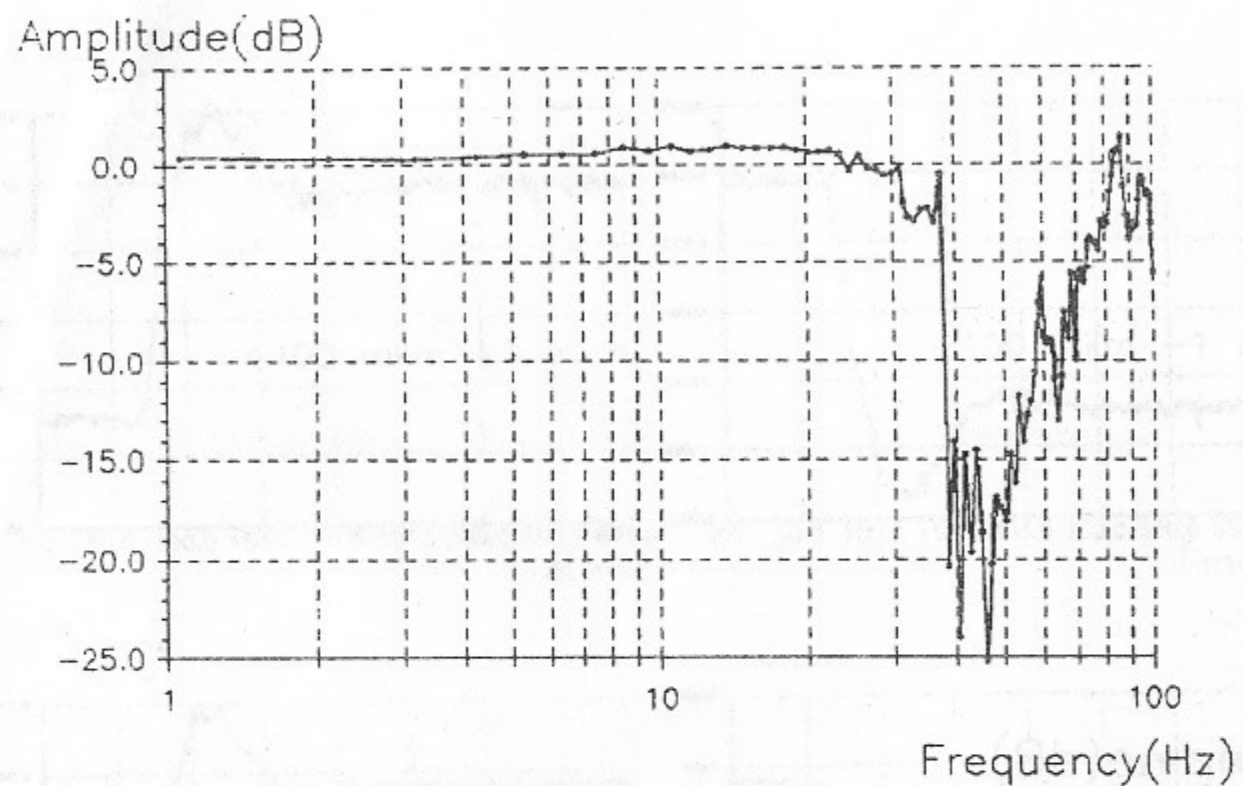


Рис. 9. Амплитудно - частотная и фазо - частотная характеристики управления САУ.

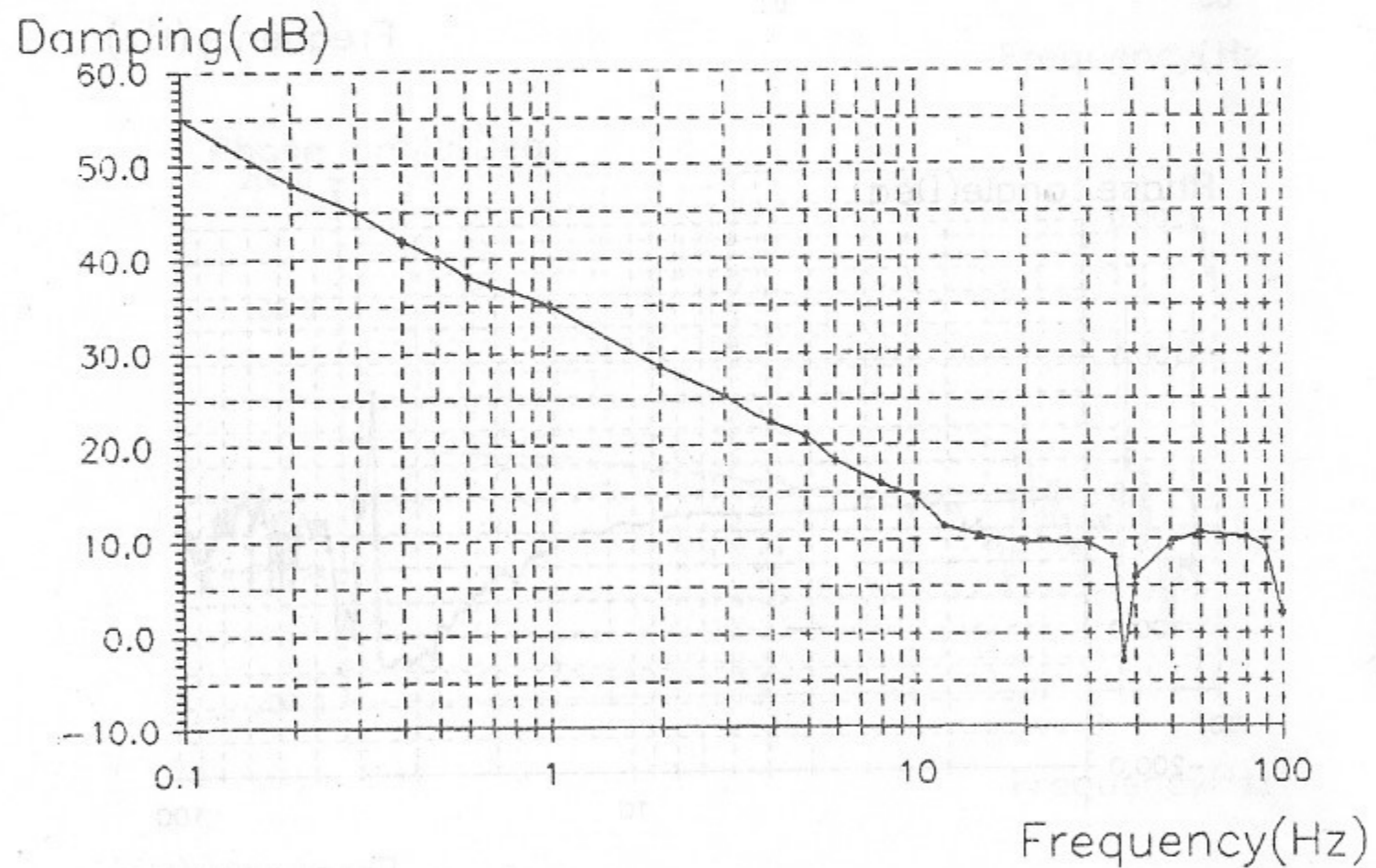


Рис. 10. Частотная характеристика подавления внешних вибраций.

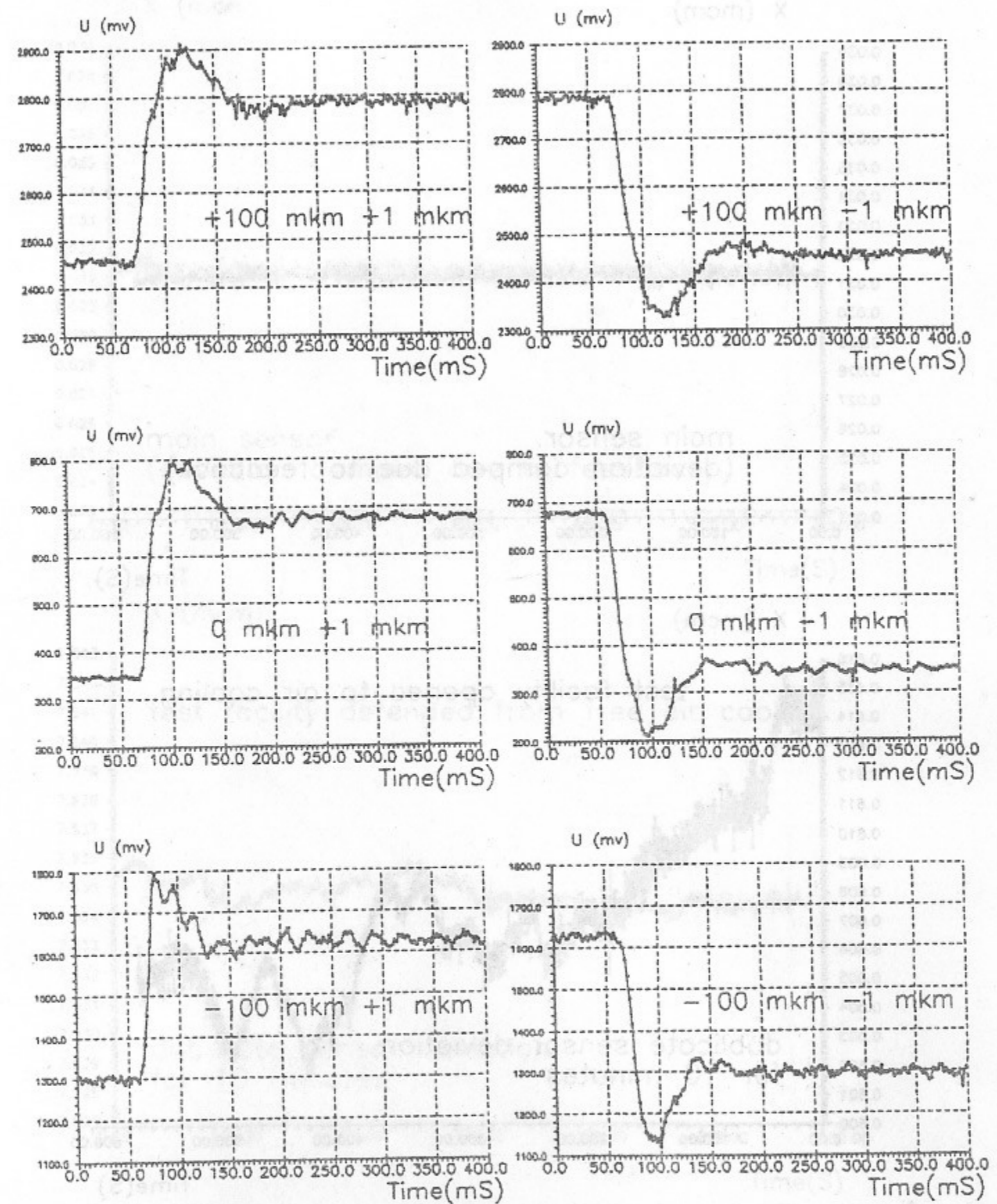


Рис. 11. Переходные характеристики. Показаны переходы вверх и вниз на 1 мкм при различных положениях измеряемого объекта: +100, 0, -100 мкм.

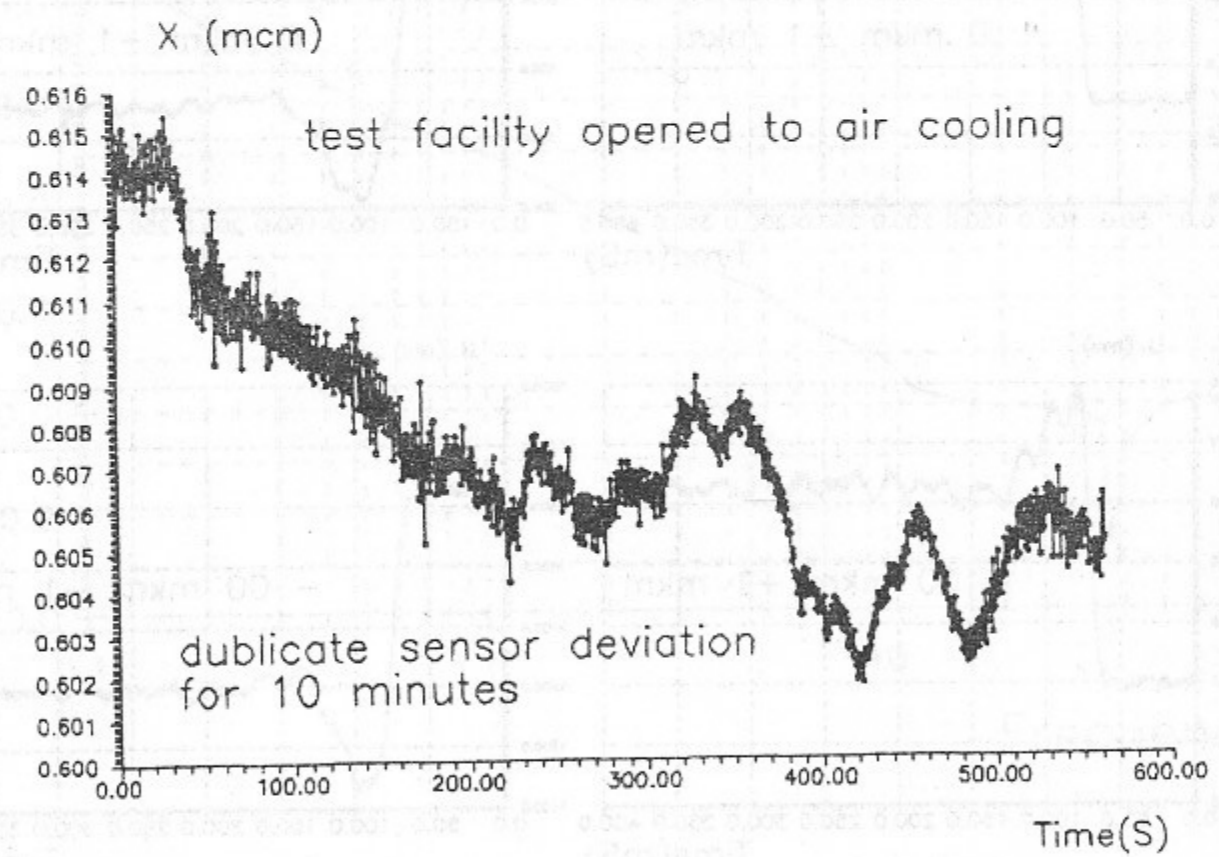
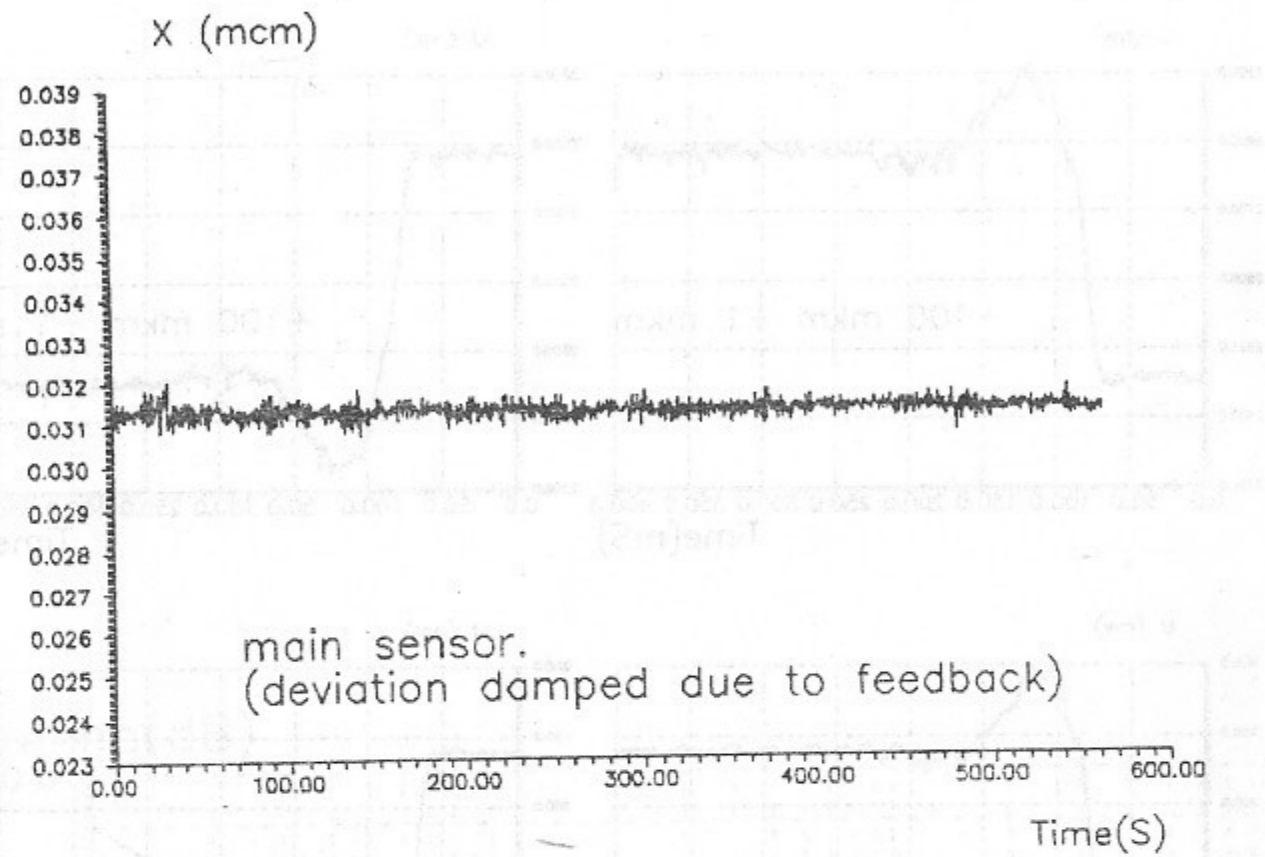


Рис. 12. Показания основного (Y5) и контрольного (Y6) датчиков положения за 10 минут. Конструкция открыта для конвекционных воздушных потоков.

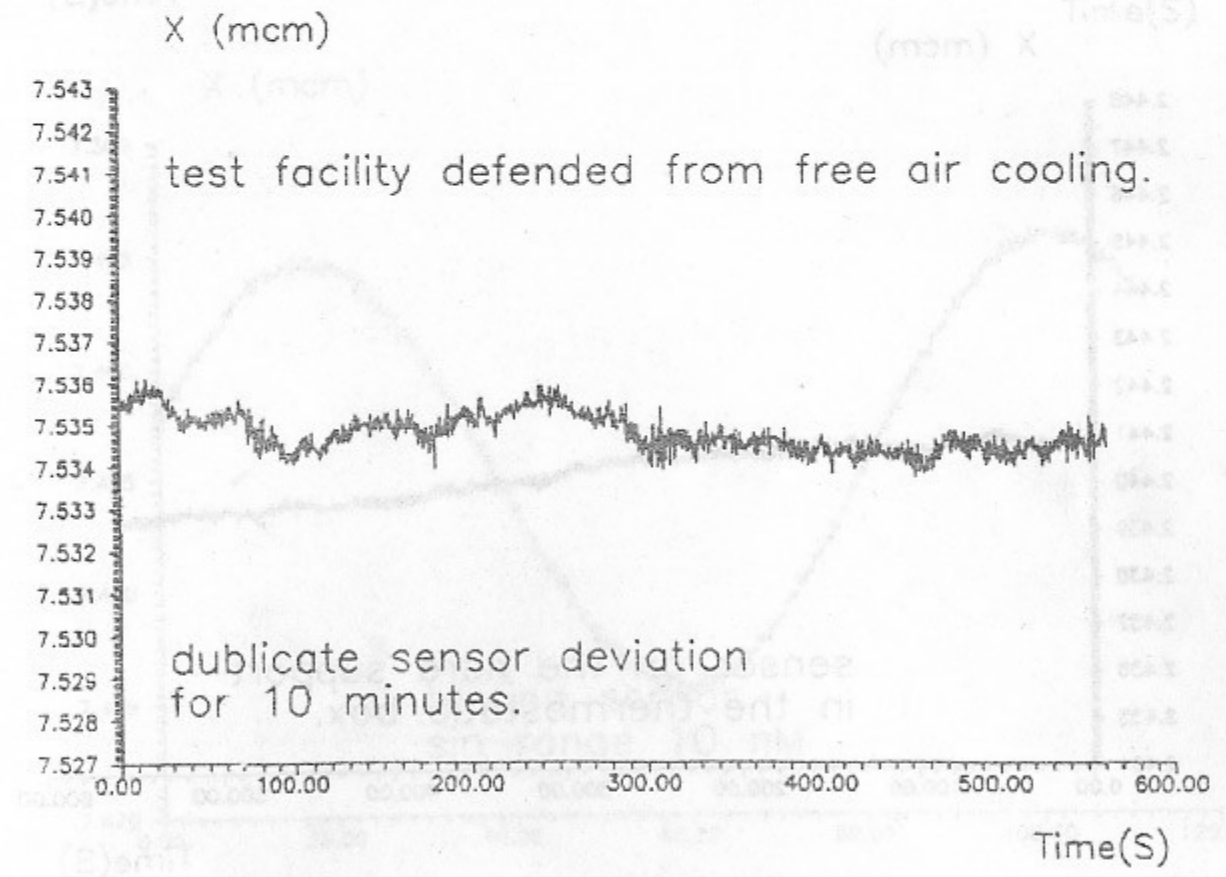
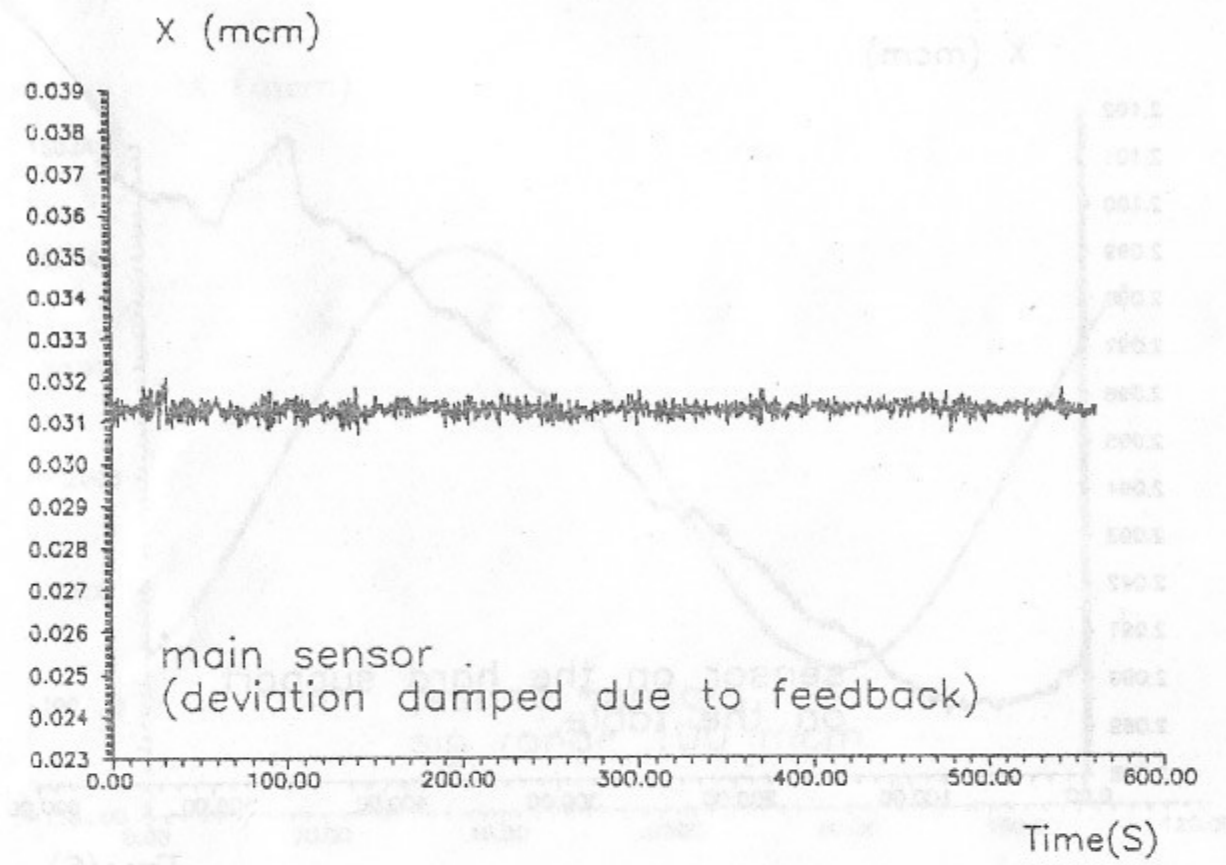


Рис. 13. Показания основного (Y5) и контрольного (Y6) датчиков положения за 10 минут. Конструкция закрыта от конвекционных воздушных потоков одним слоем хлопчатобумажной ткани.

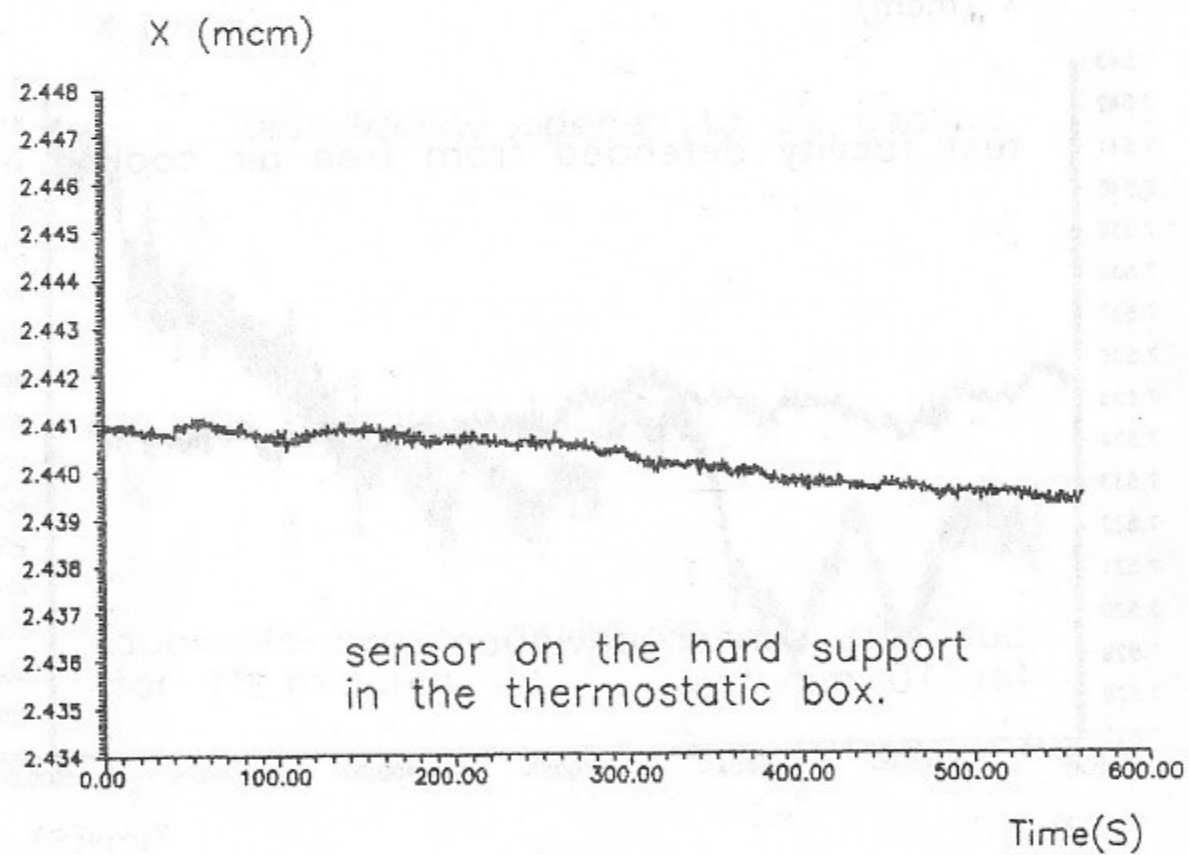
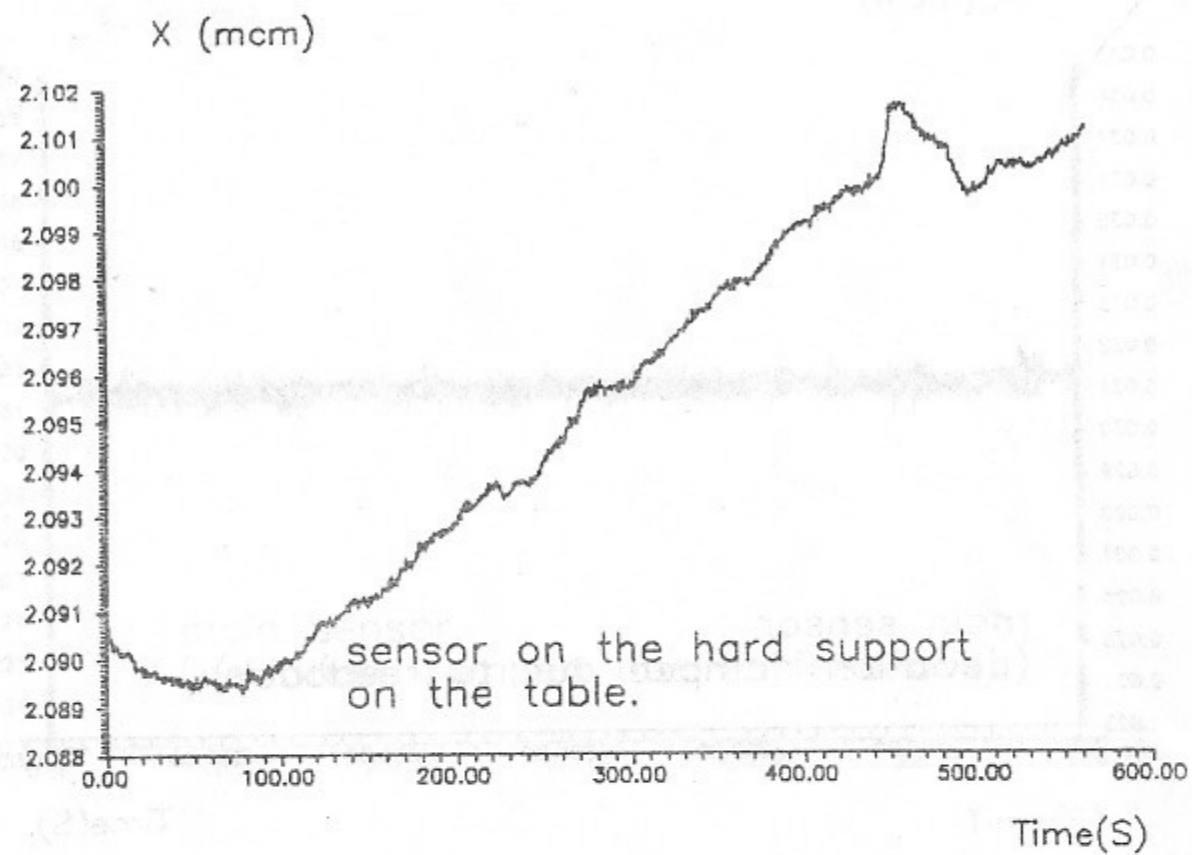


Рис. 14. Показания датчика положения закрепленного на жестком металлическом держателе за десять минут: а) на открытом воздухе, б) в термостатической камере.

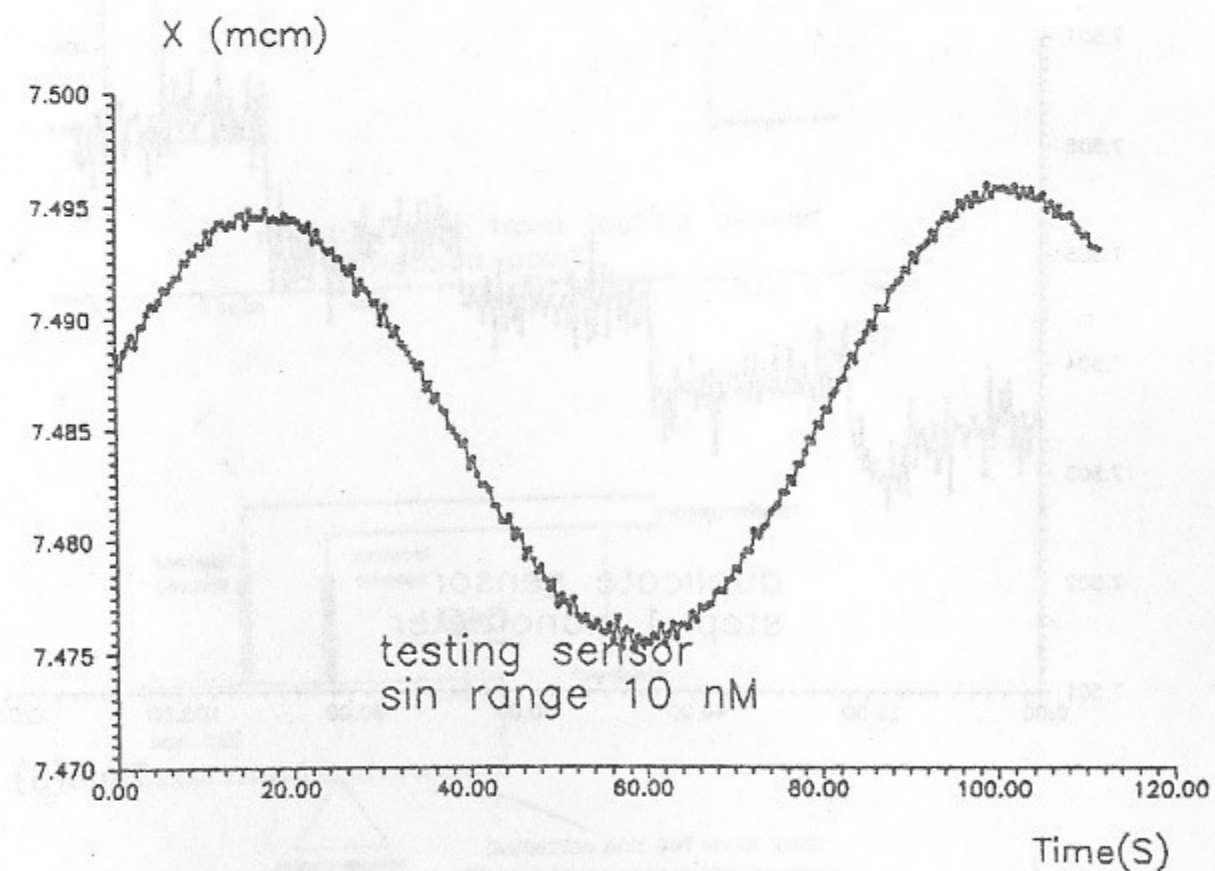
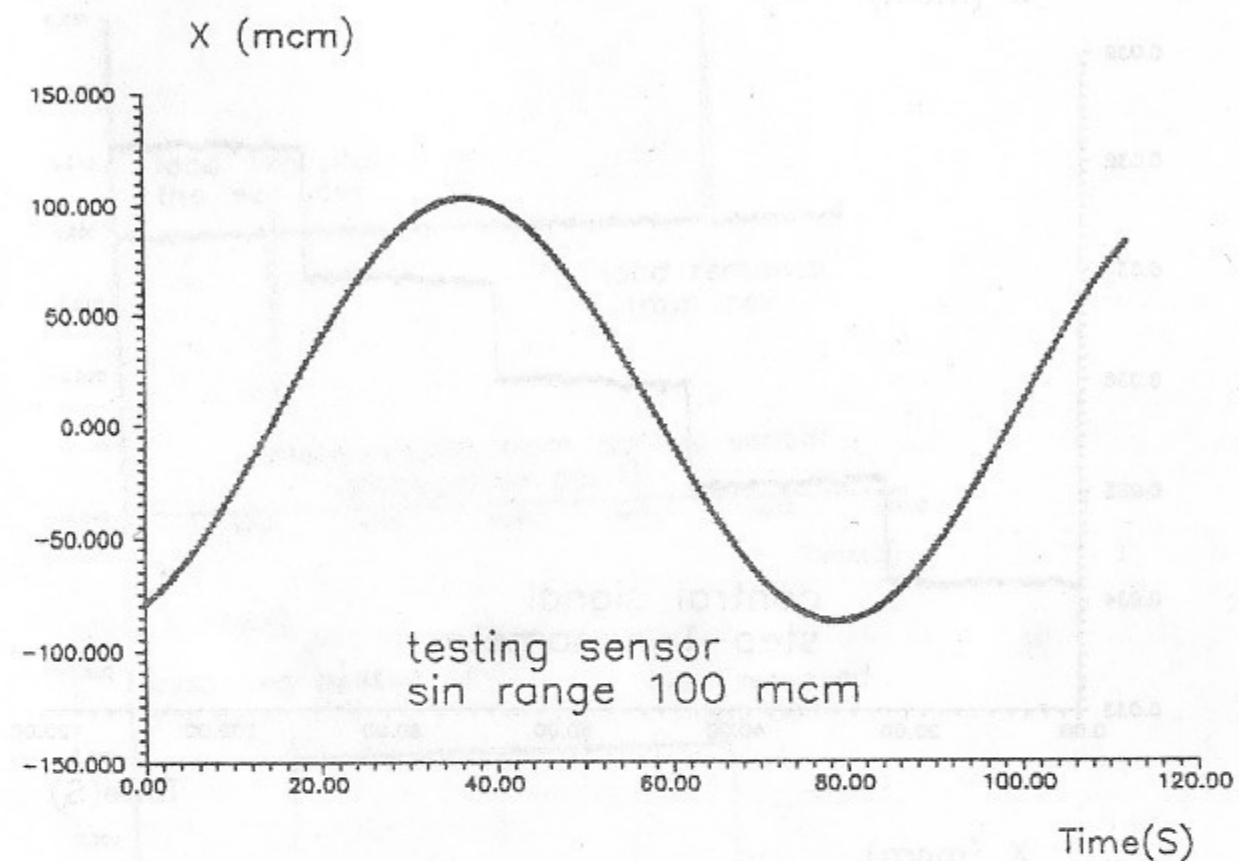


Рис. 15. Перемещения по синусоидальному закону с амплитудой ± 100 мкм и ± 10 нм. Показания контрольного датчика (Y6).

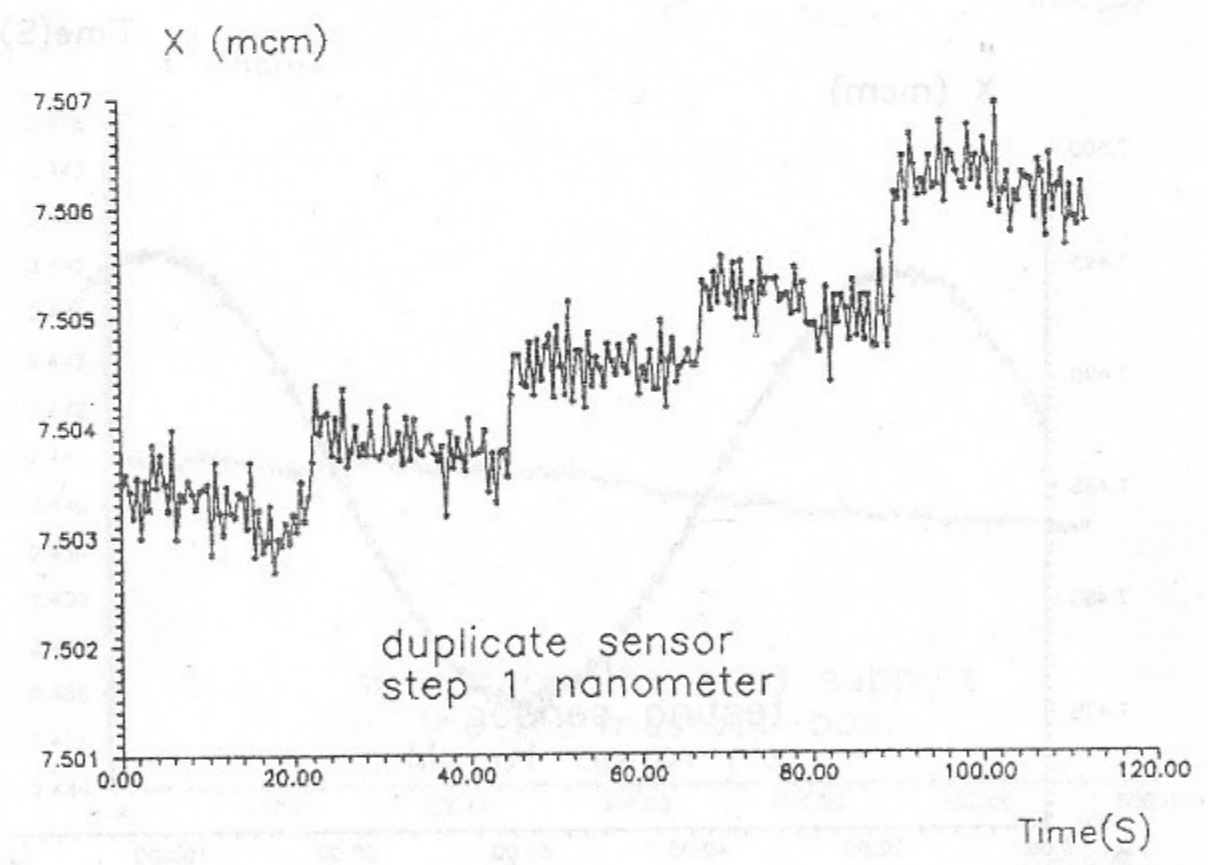
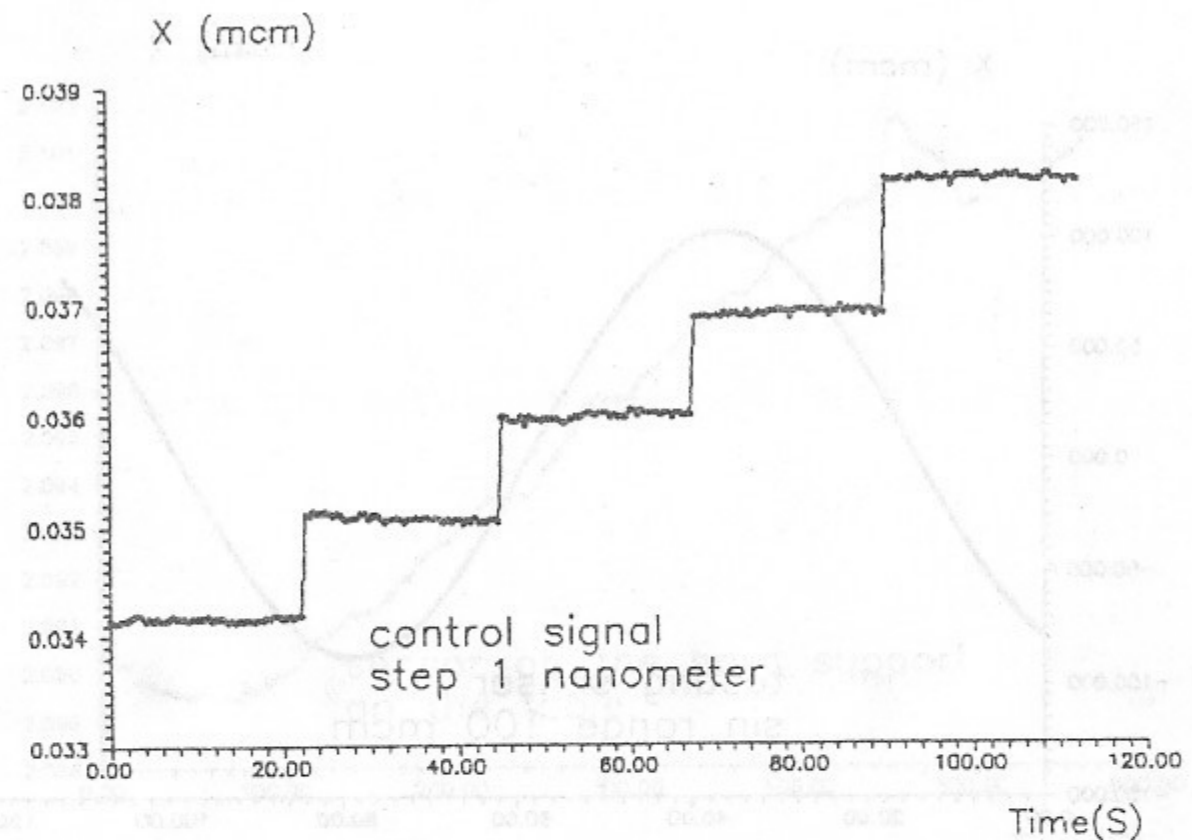


Рис. 16. Демонстрация разрешающей способности. На верхнем графике показан сигнал управления на входе системы, на нижнем - показания контрольного датчика (У6).

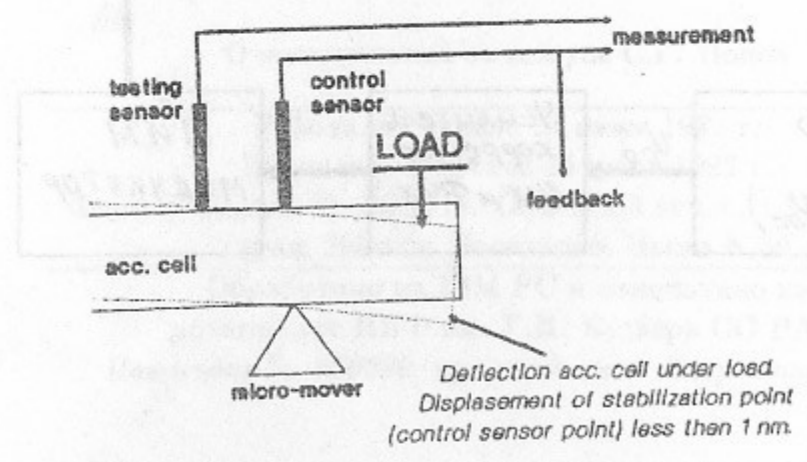
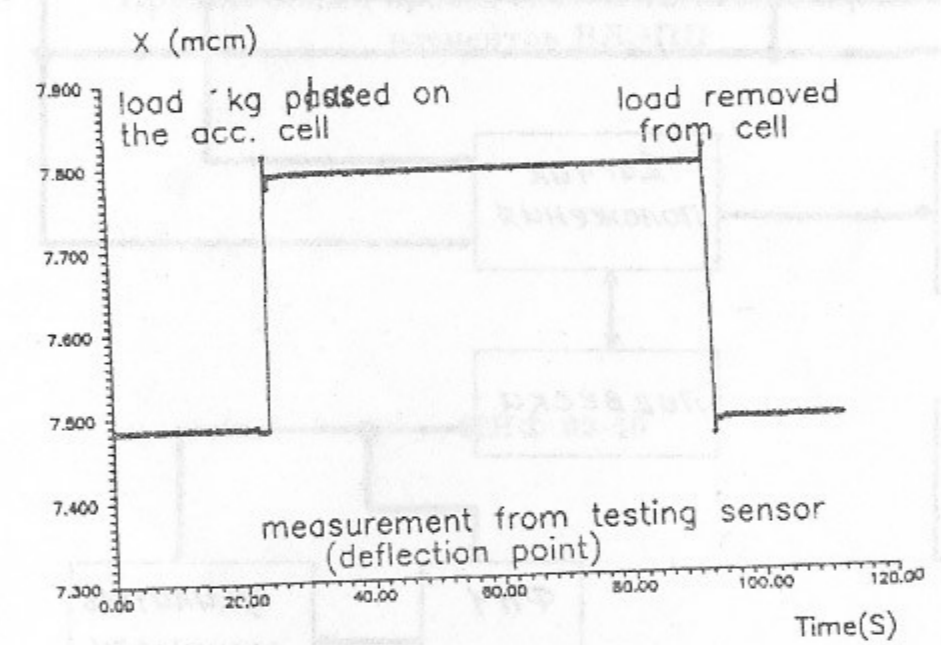
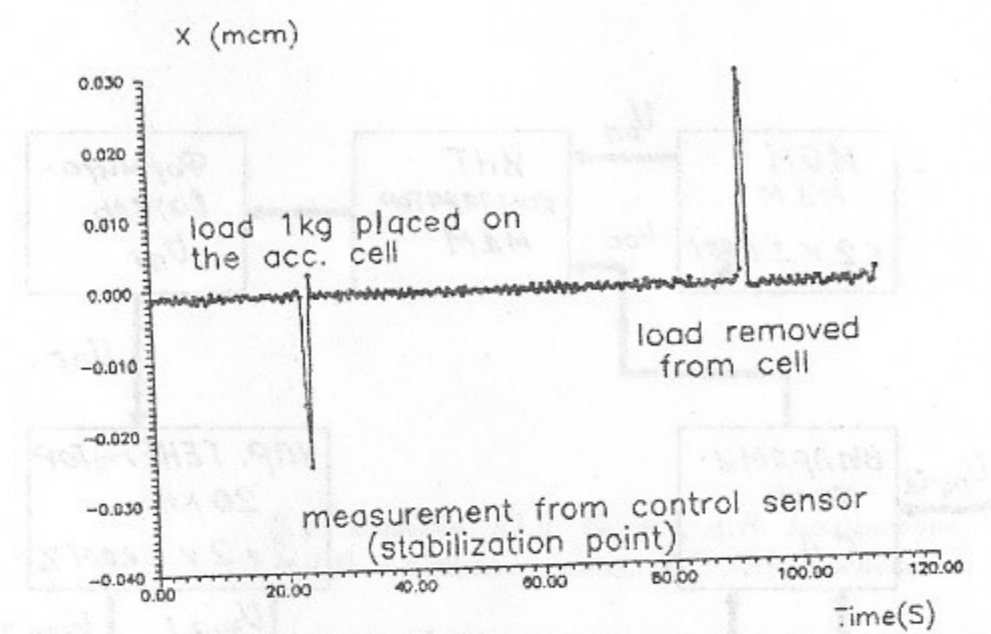
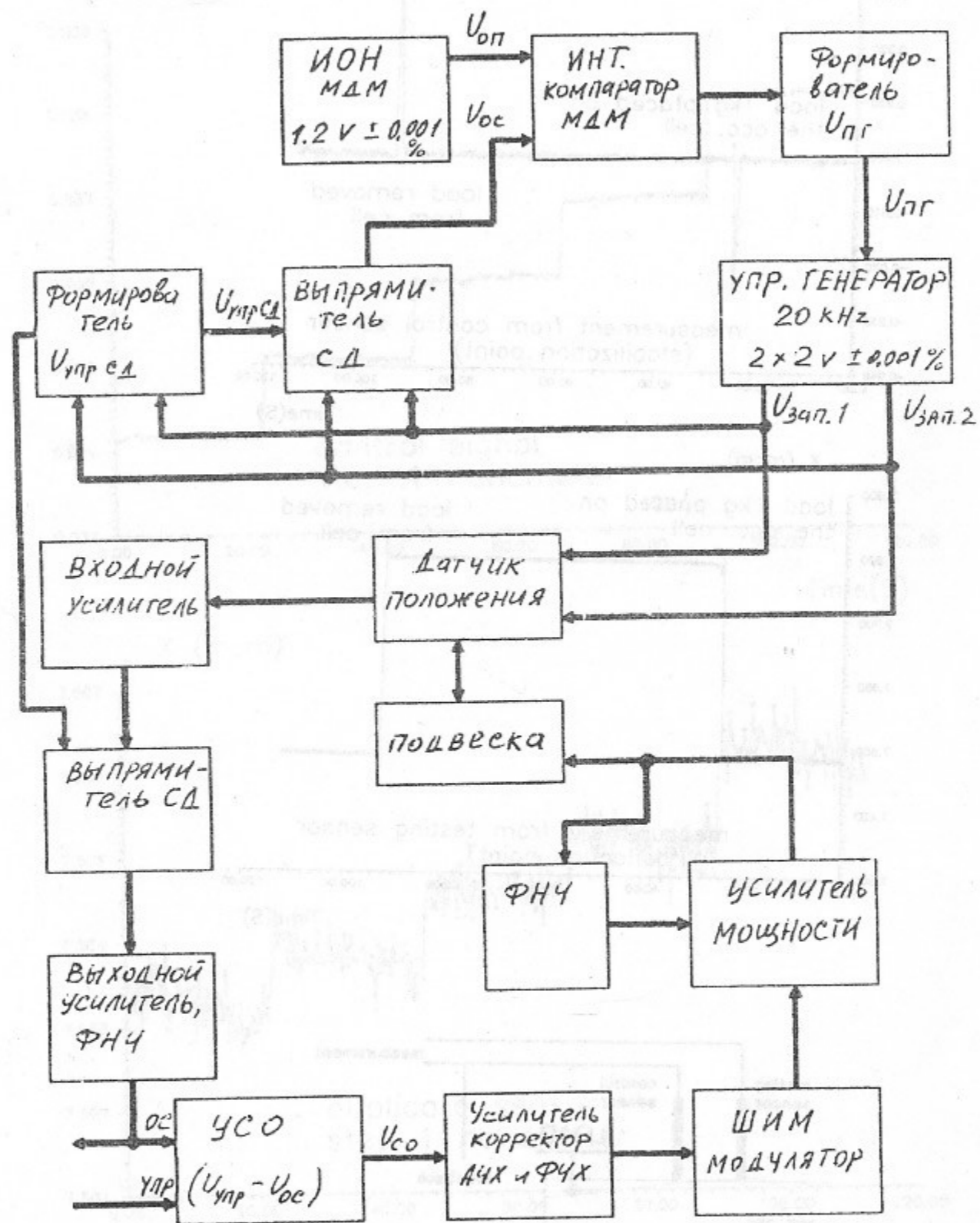


Рис. 17. Подавление внешнего статического воздействия.



В.Е. Балакин, Ю.Д. Валяев, А.В. Колмагоров,
Д.П. Красноносеньких, Л.Г. Леонтьевская

Прецизионный привод системы позиционирования
элементов ВЛЭПП

ИЯФ 92-50

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 24 июня 1992 г.
Подписано в печать 24 июня 1992 г.
Формат бумаги 60×90 1/16. Объем 2,3 печ.л., 1,9 уч.-изд.л.
Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ N 50.

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротопринтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.

Рис. 18. Функциональная схема электроники.