

А.49

63

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И Я Ф 76 - 97

А.Н.Алешаев, Б.А.Баклаков, М.М.Карлинер,

С.П.Петров, Б.М.Фомель

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ЭВМ НЕЛИНЕЙНЫХ
СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА ЭЛЕКТРОМАГ-
НИТОВ НАКОПИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
физики СО АН СССР
ИНВ. № _____

Новосибирск

1976

А.Н.Алешаев, Б.А.Баклаков, М.М.Карлинер, С.П.Петров,
Б.М.Фомель

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ЭВМ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ
ТОКА ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ НАКОПИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

А Н Н О Т А Ц И Я .

Расширение класса экспериментов на накопителях заряженных частиц требует уменьшения нестабильности магнитного поля в поворотных магнитах накопителей. Это приводит к необходимости улучшения качества систем стабилизации тока электромагнитов. Поведение таких систем при больших возмущениях вследствие существенной нелинейности может значительно отличаться от их поведения в линейном режиме. При наличии более чем одного нелинейного элемента в многоконтурных системах высокого порядка их анализ целесообразно проводить путем численного моделирования на ЭВМ. Для моделирования нелинейных систем авторегулирования создана программа *NREG*, позволяющая достаточно оперативно исследовать свойства этих систем на ЭВМ средней мощности. Разработана также программа *FREQ* для расчета логарифмических амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик линейных систем.

Применение программы проиллюстрировано на примере исследования и усовершенствования систем стабилизации тока электромагнитов накопителя ВЭЩ-2М.

В в е д е н и е

Проведение тонких физических экспериментов на электрон-позитронных накопителях ВЭШ-2М, ВЭШ-3, экспериментов по электронному охлаждению протонного пучка на установке НАП-М и др. потребовало обеспечения нестационарности магнитного поля в электромагнитах этих установок не более $1 \pm 2 \cdot 10^{-5}$. Долговременная нестационарность поля не должна быть больше $1 \cdot 10^{-4}$.

Повышение требований к стабильности магнитного поля привело к необходимости усовершенствования систем стабилизации тока электромагнитов. В ходе работы по созданию усовершенствованных систем стабилизации выяснились некоторые особенности таких систем. Наиболее существенной особенностью является важная роль нелинейности элементов системы в определении условий устойчивости и качества регулирования.

Системы питания электромагнитов накопителей ввиду их большой мощности (до 1,5 МВт) предполагают использование в качестве выходных элементов электромашинных генераторов, либо многофазных тиристорных преобразователей (см. например, [1, 2, 3]). Выходное напряжение этих устройств содержит пульсации в широком спектре частот (кратные частоте вращения якоря электромашинного генератора или частоте питающей сети тиристорного преобразователя) и кратковременные броски, связанные с нестационарностью питающего напряжения. Подавление пульсаций напряжения до необходимого уровня при помощи пассивных фильтров технически трудно осуществить ввиду низкой

частоты пульсаций и большой величины выходного тока (до 25 кА). Как электромашинный генератор, так и тиристорный преобразователь не обладают достаточным быстродействием для компенсации пульсаций выходного напряжения по цепям управления.

Эти свойства источников питания обуславливают введение в блок-схему системы стабилизации параллельных контуров регулирования напряжения, позволяющих расширить полосу пропускания системы. Вспомогательный контур обратной связи по напряжению позволяет лучше подавить возмущения в виде бросков сетевого напряжения, которые не проходят через корректирующие цепи главного контура регулирования тока. Для иллюстрации сказанного на рис. 1 приведена блок-схема системы стабилизации тока электромагнита накопителя ВЭШ-2М, усовершенствованная по сравнению с ранее описанной в [2].

В этой схеме кроме основной цепи стабилизации тока имеется параллельный контур для подавления пульсаций и цепь обратной связи по напряжению.

Ряд элементов в этой схеме при анализе переходных процессов требует учета их нелинейности. Ввиду больших коэффициентов усиления усилители легко перегружаются и переходят в режим насыщения.

Тиристорный преобразователь и усилитель мощности в контуре подавления пульсаций имеют ограниченный предел выходного напряжения, увеличение которого крайне нежелательно ввиду существенного удорожания этих устройств, определяющих в значительной

мере стоимость всей установки.

Тиристорный преобразователь является динамически нелинейным звеном системы регулирования. Дискретность и неполная управляемость тиристорного преобразователя могут при определенных условиях привести к возникновению в системе стабилизации субгармонических автоколебаний [4].

В установившемся режиме все элементы системы находятся на линейных участках их статических характеристик. В таком режиме устойчивость системы может быть определена с помощью амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик отдельных звеньев и всей системы в целом.

Во время переходных процессов при резком изменении опорного напряжения или при воздействии на систему достаточно больших внешних возмущений отдельные элементы системы стабилизации могут выходить из линейного режима. Поведение систем стабилизации в таком режиме из-за их сложной структуры может существенно отличаться от их поведения в линейном режиме. Так, например, в системе питания электромагнитов ВЭШ-2М первоначально наблюдалось возникновение незатухающих автоколебаний после единичного броска напряжения питающей сети.

Дело в том, что ввиду большого коэффициента стабилизации устойчивость может быть обеспечена лишь при нормальной работе всех контуров системы. Только в этом случае обеспечивается необходимое для устойчивости соотношение между полосой частотной характеристики системы регулирования и постоянной времени объекта регулирования — электромагнита. При переходе в нелинейный режим вспомогательные контуры вследствие перегрузки отключаются, и система может перейти в режим релаксационных автоколебаний, что неоднократно наблюдалось нами в ходе наладки мощных прецизионных систем стабилизации.

Анализ поведения многоконтурных систем высокого порядка с несколькими нелинейными элементами в режиме больших возмущений аналитическими методами чрезвычайно затруднен. Проектирование таких систем целесообразно вести путем предварительной оценки качества

системы в линейном режиме с последующим моделированием системы при учете реальных нелинейностей звеньев.

Аналоговое моделирование прецизионных систем стабилизации неэффективно ввиду чрезвычайно широкого динамического диапазона моделируемых величин. Аналоговая модель должна фактически обладать той же точностью, что и моделируемая система. Значительно дешевле численное моделирование. К такой численной модели предъявляются высокие требования. Численная модель системы стабилизации должна допускать оперативное построение сложных блок-схем с близким к реальности описанием нелинейных и динамических звеньев. В то же время желательно обеспечить минимальные затраты машинного времени на расчет варианта при сохранении требуемой точности.

Для численного моделирования нелинейных систем стабилизации была разработана программа *NREG*, которая была использована при проектировании усовершенствованных систем стабилизации. Для предварительного анализа устойчивости таких систем в линейном режиме создана программа *FREQ*, предназначенная для расчета логарифмических амплитудно- и фазочастотных характеристик системы.

Ниже приводятся описания этих программ.

Программа *NREG*

Программа *NREG* предназначена для расчета переходных процессов в нелинейных системах регулирования произвольной сложности методом решения дифференциальных уравнений, описывающих эту систему. Приемлемое быстродействие и объем программы для класса средних машин (например, для стабилизатора тока магнита ВЭШ-2М, описываемого 13-ю дифференциальными уравнениями первого порядка с 5-ю нелинейными зависимостями) объем программы составлял 9К 24-разрядных слов, а расчет варианта при разбросе постоянных времени от $1 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-2}$ сек занимал $\sim 40+50$ мин на ЭВМ ОДРА-1305 с быстродействием 100 тыс.оп/сек) были достигнуты путем отказа от автоматического составления дифференциальных уравнений и программного контроля точности их интегрирования. Первое, как известно, приводит к опосредствованию процедуры вычисления производных переменных состояния, расчет которых требуется на каждом

шаге интегрирования многократно. Так, если i -е звено описывается типовым уравнением вида:

$$\dot{y}_k = a \cdot y_e + b \cdot y_m \quad (I)$$

то ссылка на него в блоке вычислений производных в программе с автоматическим составлением дифференциальных уравнений состоит минимально из следующих операций:

$$k = k_i$$

$$e = e_i$$

$$m = m_i$$

$$a = a_i$$

$$b = b_i$$

вычислить (I)

вместо явного написания уравнения (I) для данного звена при ручном программировании.

Программный контроль точности интегрирования еще в большой степени увеличивает количество операций на каждом шаге интегрирования, например, за счет многократного расчета с различными шагами.

Опыт работы с программами Рунге-Кутты и Мерсона показал, что часто бывает выгоднее проводить интегрирование простейшими схемами без контроля точности во всей области решения с некоторым минимальным шагом.

Однако, идти по пути ручного программирования всякого нового варианта системы регулирования также невыгодно. Поиск удовлетворительного компромиссного сочетания удобств использования модели с ограниченными возможностями имеющейся в наличии вычислительной техники привел к созданию программы *NREG*.

В этой программе для всякой новой системы регулирования ее модель - блок описания дифференциальных уравнений - программируется отдельно и сочленяется с базовой частью программы после внесения в нее незначительных изменений. Базовая часть программы осуществляет интегрирование дифференциальных уравнений и служит для общения с проектировщиком, предоставляя ему возможность оперативной смены параметров системы регулирования при неизменной ее структуре. Интегрирование реализуется простой подпрограм-

мой, основанной на методе Рунге-Кутты, с заранее задаваемым шагом интегрирования. Шаг этот оценивается по минимальной постоянной времени, имеющейся в системе регулирования, и затем уточняется путем контрольных просчетов данной модели.

Блок-схема *NREG* приводится на рис.2, где штриховкой слева помечены сменные блоки, т.е. такие части программы которые необходимо программировать для всякой новой системы регулирования. Структурно в программе выделяются следующие части:

- блок ввода данных. Служит для ввода параметров конкретной модели. Позволяет использовать привычные для проектировщика обозначения вводимых величин. Вводимыми данными для *NREG* являются: параметры нелинейных функций; постоянные времени отдельных звеньев; коэффициенты усиления *линеаризованных* элементов; начальные данные для переменных состояния; параметры интегрирования, распределения полей распечатки выходных величин;
- блок преобразования входных данных. Преобразует вводимые данные к стандартному виду для хранения в общем блоке. Все остальные части программы используют только этот стандартный вид. Так, для звена, описываемого уравнением:

$$\dot{y}_2 = \frac{1}{T} (K \cdot y_1 - y_2)$$

проектировщик вводит величины постоянной времени T и коэффициента усиления K . В общем же блоке эти величины хранятся как $P_1 = K/T$ и $P_2 = 1/T$, а модельное уравнение в блоке дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\dot{y}_2 = P_1 \cdot y_1 - P_2 \cdot y_2$$

- блок организации интегрирования. Осуществляет обращение к собственно интегрирующей подпрограмме в соответствии с такими входными данными как параметры интегрирования и параметры распечатки. Здесь же при необходимости организуются ключевые режимы, когда определенные участки системы регулирования включаются или выключаются при выполнении заданных условий;

- блок *F4DERY* - сегмент описания дифференциальной модели. Представляет собой подпрограмму вычисления производных переменных состояния через сами эти переменные и нелинейные соотношения между ними;

- подпрограмма интегрирования;

- блок вывода. Служит для распечатки всех выходных величин и построения графиков переходных процессов. Выходными данными *NREG* являются: вводимые параметры (для контроля), таблицы переменных состояния в заданные моменты времени, график переходного процесса и функции управления для указанной величины.

В моделировании систем стабилизации существенным является способ описания нелинейных элементов, от которого требуется достаточная степень приближения и компактность. При расчете конкретных систем стабилизации использовались следующие нелинейные зависимости. Функция передачи нелинейного двуполярного элемента с насыщением, например, усилителя, представлялся арктангенсом:

$$F_1(x) = \frac{2A}{\pi} \operatorname{arctg} \left[\frac{x}{\left(\frac{2A}{\pi K_0}\right)} \right]$$

где A - величина выходного напряжения насыщенного усилителя, K_0 - усиление его при нулевом входном сигнале $x=0$.

Функция передачи однополярного элемента с насыщением, например, тиристорного преобразователя в упрощенном варианте, представлялась логической функцией:

$$F_2(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq 0 \\ B * [1 - e^{-x/(B/K_0)}] & \end{cases}$$

где B - выходная величина при насыщении.

Если нелинейности в системе регулирования не подвергаются дифференцированию, то дополнительные упрощения при сохранении точности могут быть получены заменой указанных функций кусочно-ломаными.

Инерционность нелинейных элементов учитывается эквивалентной постоянной времени. Так, усилитель мощности описывается

апериодическим звеном:

$$\dot{y} = \frac{1}{T_{ум}} [F_1(x) - y]$$

(x - входное напряжение, y - выходное).

Операционный усилитель общего вида (рис.3) моделировался уравнением:

$$[Z_0(p) + Z_1(p)]x(t) = Z_0(p) \cdot U_i(t) + Z_1(p) \cdot F_1(x)$$

где p - оператор дифференцирования.

При исследовании режимов работы системы стабилизации тока электромагнитов ВЭШ-2М с возможностью возникновения субгармонических автоколебаний использовалась более детальная модель тиристорного преобразователя, в которой учитывались его дискретность и неполная управляемость, что может служить причиной возбуждения этих колебаний [4].

Выходное напряжение тиристорного преобразователя формируется в этой модели так же, как и в реально используемой 6-ти фазной схеме:

$$U_{\text{вых.тп}} = U_0 \cdot \sin [\omega(t - t_{3i}) - \alpha_{3i}]$$

где U_0 и ω_0 - соответственно амплитуда и циклическая частота сетевого напряжения, t - текущий момент времени, t_{3i} - момент зажигания i -го фазного напряжения, α_{3i} - угол отсчета этого напряжения к моменту зажигания. Момент t_{3i} определяется как момент срабатывания компаратора входного и пилообразного напряжения, генерируемого для каждой фазы, начиная с момента ее возможного поджигания. Вычисление α_{3i} для 6-фазной схемы преобразования осуществляется по формуле:

$$\alpha_{3i} = \frac{\pi}{3} + \omega(t_{3i} - t_{ni})$$

где t_{ni} - момент выключения i -го пилообразного напряжения.

Диаграмма работы этой модели тиристорного преобразователя приведена на рис.4. Отсечение отрицательных полуволн выпрямляемого напряжения производится логически.

Модель достаточно компактно программируется, требуя одновременного расчета всего лишь одного пилообразного напряжения, которое в данный момент подается на компаратор и определяет момент зажигания очередной фазы.

Нетрудно видеть, что подобным образом можно запрограммировать модель тиристорного преобразователя с любым числом фаз преобразователя, учесть при необходимости их перекос или флуктуации амплитуды сетевого напряжения.

Программа *FREQ*

Программа *FREQ* предназначена для расчета логарифмических амплитудно- и фазо-частотных характеристик (ЛАЧХ и ЛФЧХ) линейных систем регулирования некоторого класса (содержание не более трех контуров). Программа состоит из модулей, осуществляющих эквивалентные преобразования участков системы регулирования [5] и допускает включение модулей, реализующих какие-либо новые преобразования. В используемом варианте *FREQ* занимает ~ 10 К 24-разрядных слов оперативной памяти. Время расчета и построения ЛАЧХ и ЛФЧХ на АЦПУ системы, состоящей из 20 типовых звеньев ~ 1 мин.

Входными параметрами для программы являются данные блок-схемы системы регулирования, представленные в стандартном виде. Ниже приводится пример такого описания для блок-схемы, изображенной на рис.5. Звенья W_1, W_2, \dots, W_7 на этом рисунке изображают главную ветвь управления, звено W_8 - ветвь параллельную звеньям W_1, W_2 главной ветви, ветвь W_{11}, W_{12}, W_{13} и ветвь W_9, W_{10} - соответственно параллельная участку W_4, W_5, W_6 цепочка и локальная обратная связь.

Сначала вся система разбивается на участки, передаточная функция которых может быть преобразована к дробно-рациональному виду одним из имеющихся в программе модулей. Выделенным участкам в описании системы регулирования приписывается код, равный номеру соответствующего ему модуля. Участки нумеруются слева направо, параллельные ветви и локальные обратные связи - также слева направо независимо от номера участка. После этого массив входных

параметров для *FREQ* оформляется следующим образом:

$NTEST, NT, NG, NV, NB, ND, NPD, OMO$
 $L1, L2, \dots, LN$
 $a_0^1, a_1^1, a_2^1, b_0^1, b_1^1, b_2^1$
 $a_0^2, a_1^2, a_2^2, b_0^2, b_1^2, b_2^2$
 \dots
 $a_0^m, a_1^m, a_2^m, b_0^m, b_1^m, b_2^m$
 NT^1, NV^1, NO^1
 NT^2, NV^2, NO^2
 \dots
 NT^e, NV^e, NO^e

где отдельные параметры означают:

- NTEST* - номер варианта расчета,
- $NT = \begin{cases} 1 & \text{— главная обратная связь замкнута} \\ 0 & \text{— разомкнута} \end{cases}$
- NG* - число участков системы регулирования,
- NV* - число параллельных ветвей,
- NB* - число локальных обратных связей,
- ND* - число декад, заказываемое для построения логарифмических характеристик,
- NPD* - число точек в каждой декаде, которое должно быть обчислено программой,
- OMO(>0)* - нижняя циклическая частота, с которой нужно начать расчет характеристик,
- $L(i)$ - количество звеньев z в участках главной ветви, в параллельных и обратных связях,
- (\vec{a}^j, \vec{b}^j) - описание передаточной функции j -го звена
- (NT^k, NV^k, NO^k) - код k -го участка, номер параллельной ветви, имеющейся на k -м участке, номер локальной обратной связи, охватывающей этот участок соответственно. На приводимой в качестве примера блок-схеме имеется 4 участка. 1-й участок имеет параллельную ветвь номер 1, 3-й - параллельную ветвь 2 и локальную обратную связь 1, а описание участков состоит из 4-х строк чисел:

2 √ I √ 0
 I √ 0 √ 0
 5 √ 2 √ I
 I √ 0 √ 0

Так, I-я строка этих чисел означает, что после упрощения участок I будет преобразован к конечному виду 2-м модулем программы, осуществляющим сложение передаточных функций участка главной ветви и I-й параллельной ветви.

Организация вводимых данных предполагает определенное соответствие между местом звена в блок-схеме и местом описания его во входном массиве. Это позволяет однозначно осуществить алгоритм получения передаточной функции всей системы в виде отношения полиномов, который, как уже отмечалось, состоит в последовательном применении правил эквивалентных преобразований над передаточными функциями участков системы регулирования. Для приводимого примера действия программы имели бы порядок:

$$1) \quad W_r'(p) = W_1(p) * W_2(p)$$

$$W_r^3(p) = W_4(p) * W_5(p) * W_6(p)$$

$$W_{пв}^2(p) = W_{11}(p) * W_{12}(p) * W_{13}(p)$$

$$W_{oc}'(p) = W_9(p) * W_{10}(p)$$

$$2) \quad W'(p) = W_r'(p) + W_8(p)$$

$$W^3(p) = \frac{W_r^3(p) + W_{пв}^2(p)}{1 + W_{oc}'(p) * [W_r^3(p) + W_{пв}^2(p)]}$$

$$3) \quad W(p) = W'(p) * W_3(p) * W^3(p) * W_7(p)$$

При необходимости затем замыкается главная обратная связь и получается результирующая передаточная функция всей системы:

$$W(p) = \frac{z_0 + z_1 p + z_2 p^2 + \dots + z_k \cdot p^k}{q_0 + q_1 p + q_2 p^2 + \dots + q_e p^e}$$

по которой и рассчитывается:

$$\Delta AЧХ(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)|$$

$$\Delta \phiЧХ(\omega) = \arctg [\text{Im } W(j\omega) / \text{Re } W(j\omega)]$$

З а к л ю ч е н и е

Программы *NREG* и *FREQ* были использованы для анализа и моделирования системы питания электромагнита накопителя ВЭШ-2М (рис.1). На рис.6 и 7 приводятся логарифмические амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики системы стабилизации тока в линейном режиме, построенные с помощью программы *FREQ*. Моделирование системы с использованием программы *NREG* подтвердило возможность достижения в данной системе неустойчивости тока менее $1 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-5}$ (рис.8). Был установлен критический динамический диапазон усилителя УСО-2 (рис.1), вне которого в системе стабилизации могут существовать нелинейные автоколебания, как это видно на рис.9. При уменьшении динамического диапазона УСО-2 ниже критического, в режиме больших возмущений усилитель УСО-2 входит в насыщение раньше, чем усилитель мощности в параллельном канале подавления пульсаций. При этом обратная связь в контуре стабилизации напряжения разрывается полностью на время возмущения. Если динамический диапазон УСО-2 больше критического, то канал подавления пульсаций насыщается раньше, а остающаяся низкочастотная часть контура стабилизации напряжения неустойчива. Компенсация уменьшения динамического диапазона УСО-2 по постоянной составляющей сигнала ошибки осуществляется инвариантными цепочками, показанными пунктиром на рис.1. Введение инвариантности позволило также ускорить перестройку тока. Моделирование показало устойчивость системы стабилизации при изменении параметров отдельных элементов в пределах 20% (рис.10).

Спектральный анализ переходного процесса при невыполнении условий отсутствия субгармонических автоколебаний обнаружил наличие колебаний с периодами $2T$, $3T$ и $4T$, где $T = 1/6f$ характерное время трехфазного двухполупериодного тиристорного преобразователя, а $f = 50$ Гц — частота промышленной силовой сети (рис.11), что согласуется с работой [4].

Таким образом, программы *FREQ* и *NREG* позволяют достаточно оперативно оценить влияние параметров отдельных звеньев численной модели системы стабилизации тока на ее устойчивость и качество. Это позволило достичь заданных параметров в реальной системе питания электромагнитов накопителя ВЭШ-2М.

Л и т е р а т у р а

1. Баклаков Б.А. и др. "Система питания электромагнита и линз накопителя ВЭШ-3, управляемая с помощью ЭВМ", Труды третьего Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, 1973, т.П, стр.39-46.
2. Баклаков Б.А., Веремеенко В.Ф., Карлинер М.М., Петров С.П. "Стабилизатор тока питания электромагнитов накопительного кольца ВЭШ-2М", Новосибирск, 1974, Препринт ИЯФ 74-34.
3. Баклаков Б.А., Боровиков В.М., Веремеенко В.Ф., Карлинер М.М., Петров С.П. "Накопитель протонов НАП-М. II. Стабилизатор токов в цепях питания ведущего поля и корректирующих элементов", Новосибирск, 1975, Препринт ИЯФ 75-76.
4. Шипило В.П. "Субгармонические автоколебания в замкнутых системах регулирования с вентильным преобразователем" Электричество, № I, 1969г.
5. Под ред. Солодовникова В.В. "Теория автоматического регулирования", книга I "Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования", Машиностроение, 1967г, Москва.

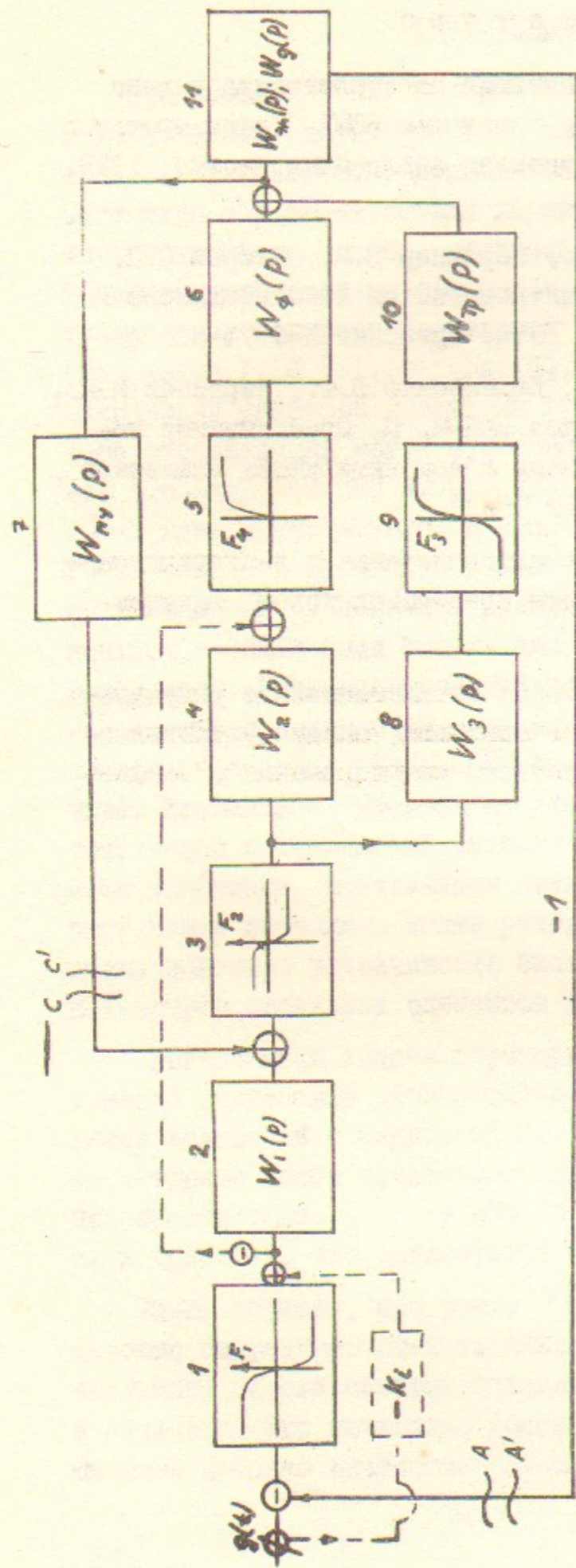


Рис.1. Блок-схема системы стабилизации тока электро-магнита ВЭШ-2М.

- I - усилитель ошибки основного контура УСО-1,
- 2, 4, 8 - корректирующее звено
- 3 - усилитель ошибки контура регулирования напряжения УСО-2,
- 5 - тиристорный преобразователь,
- 6 - фильтр,
- 7 - масштабный усилитель,
- 9 - усилитель мощности,
- 10 - трансформатор,
- II - электромагнит + шунт

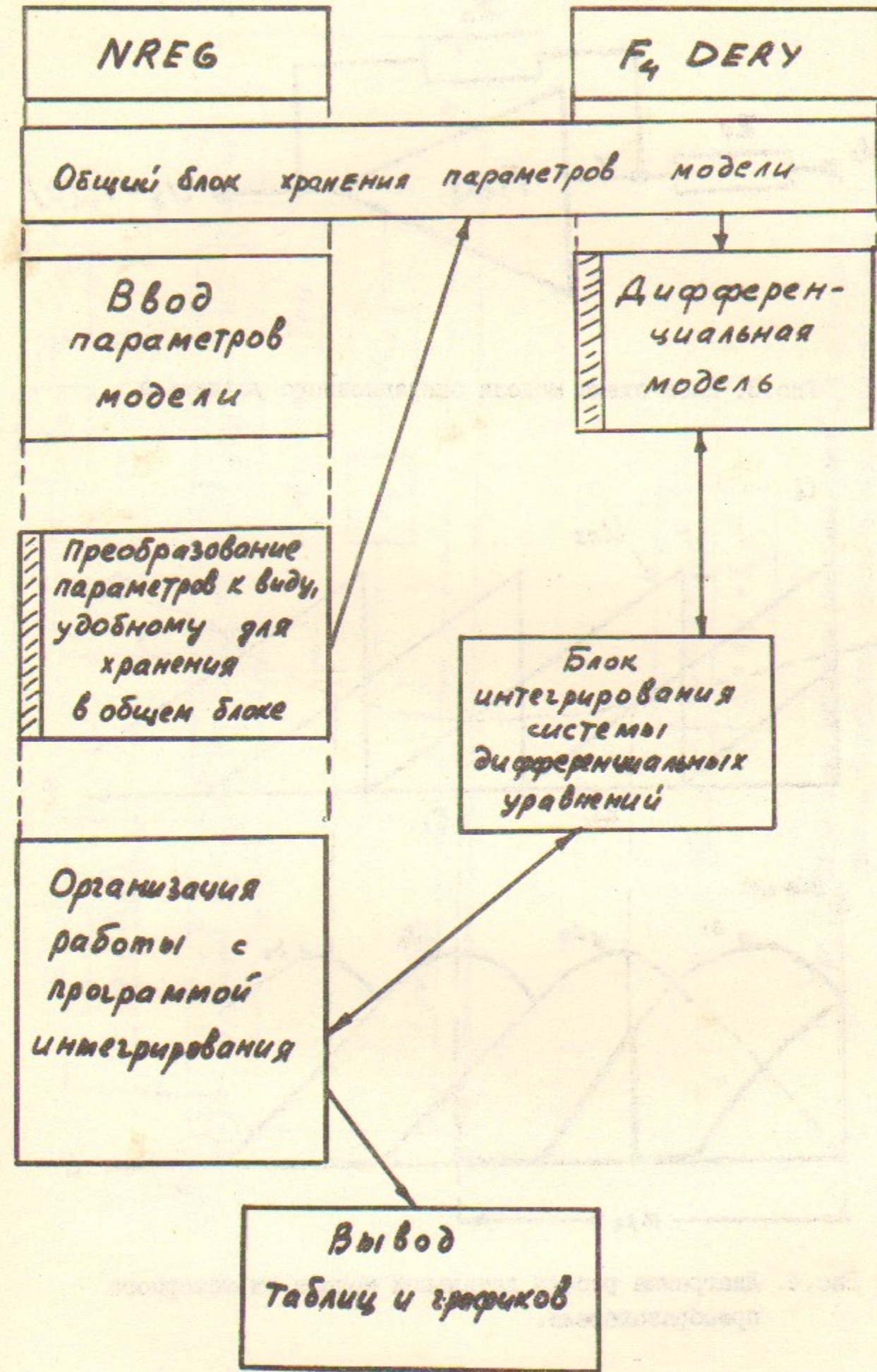


Рис.2. Блок-схема программы NREG.

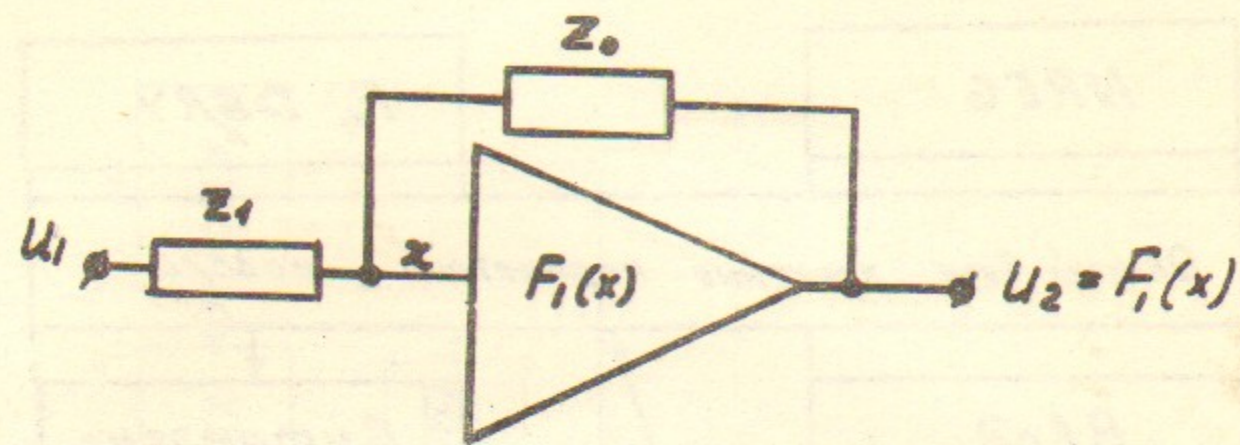


Рис.3. Блок-схема модели операционного усилителя.

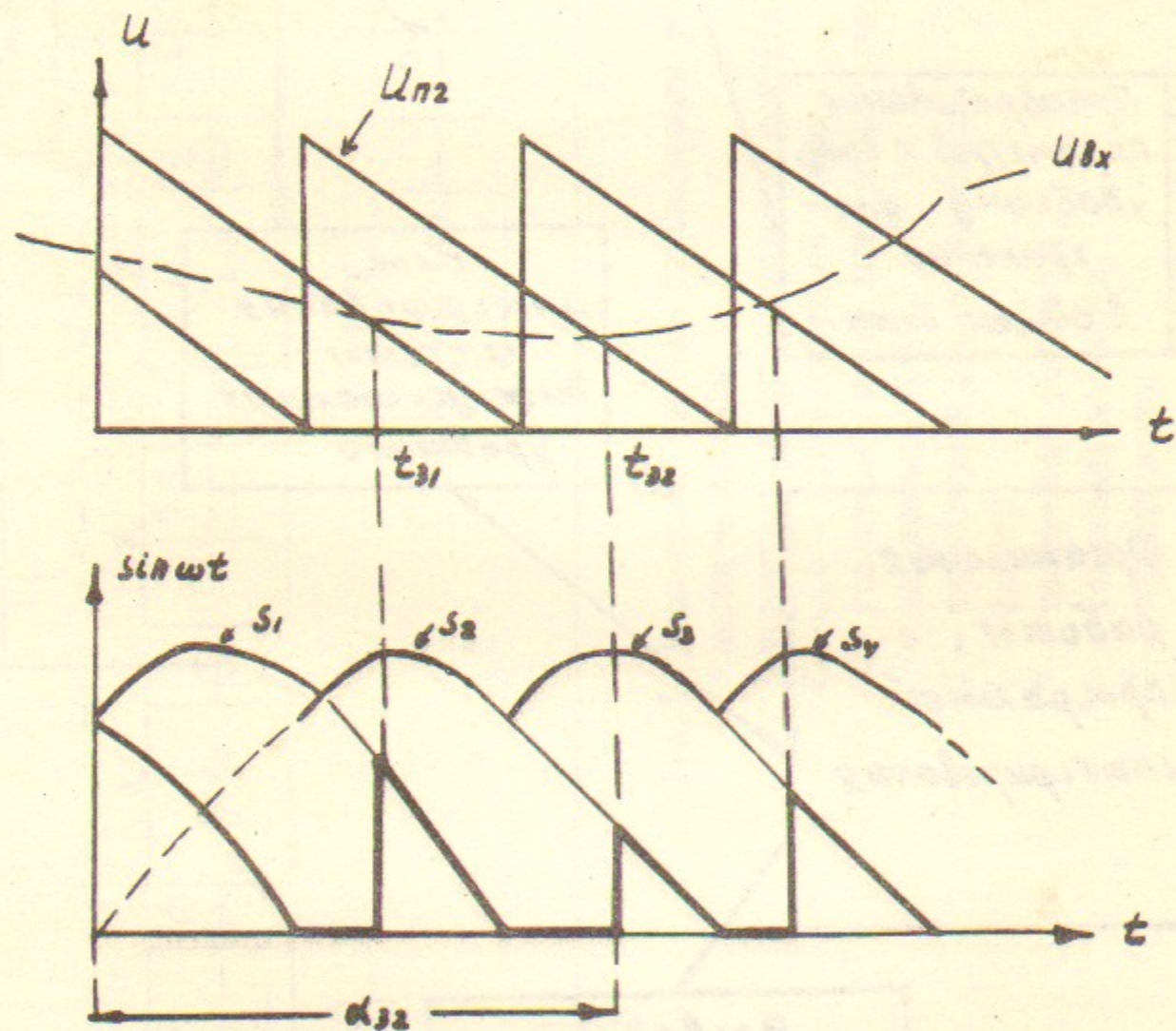
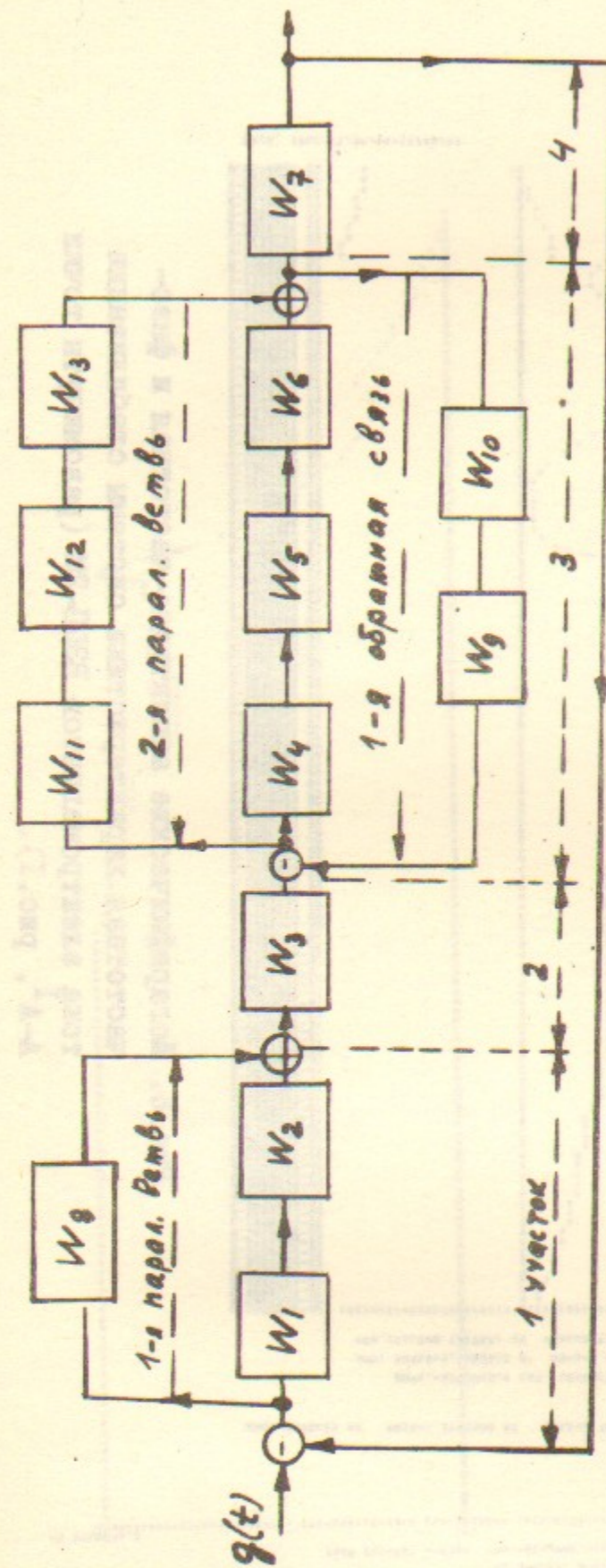


Рис.4. Диаграмма работы детальной модели тиристорного преобразователя.



$$\frac{a_0 + a_1 p + a_2 p^2}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2}$$

Рис.5. Блок-схема системы регулирования для примера в тексте. Общий вид типового звена для программы

FREQ.

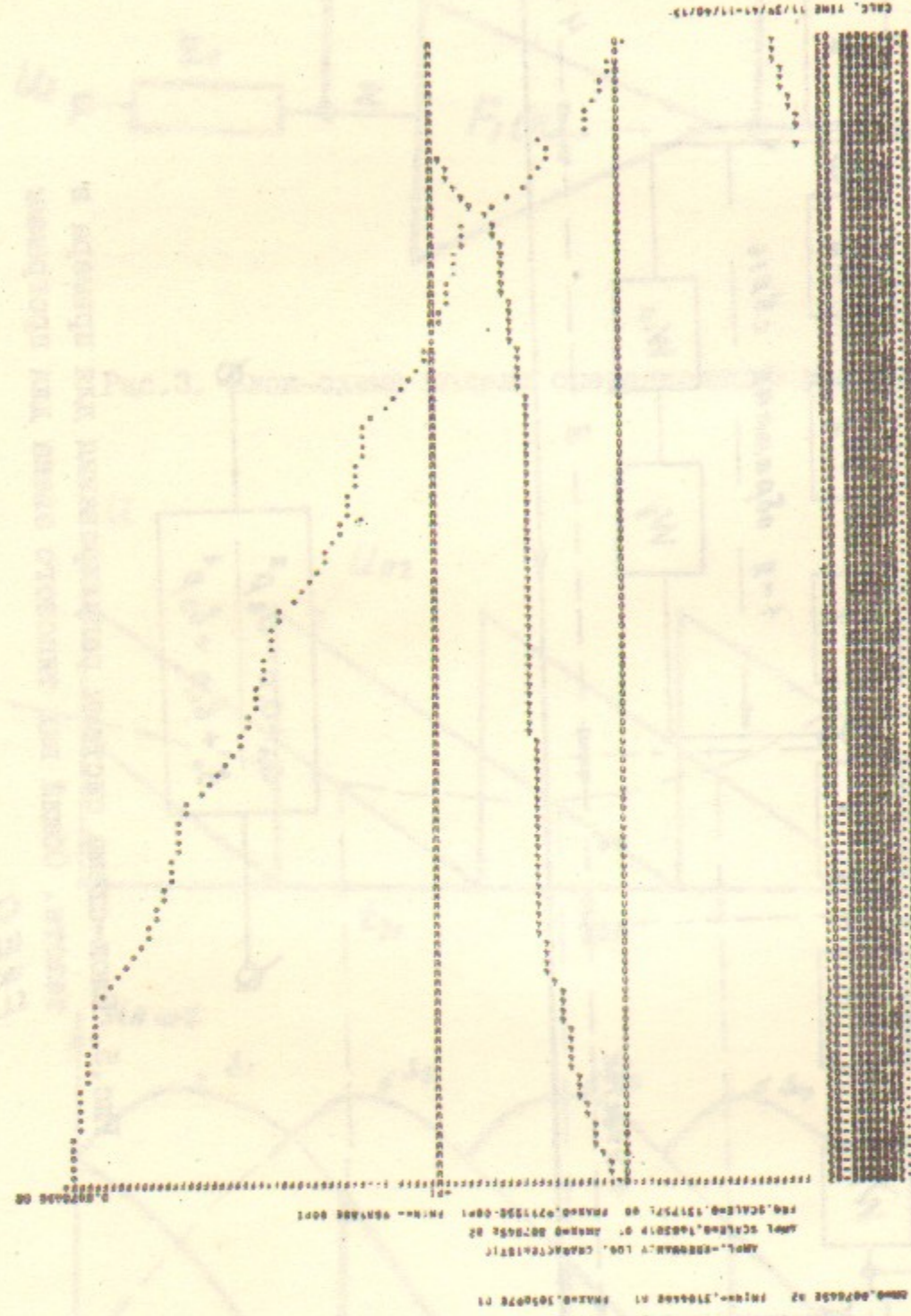


Рис.6. Логарифмические амплитудно-частотная и фазо-
 частотная характеристики системы стабилизации
 тока электромагнитов ВЭШ-2М (разомкнуты точки
 А-А', рис.1).

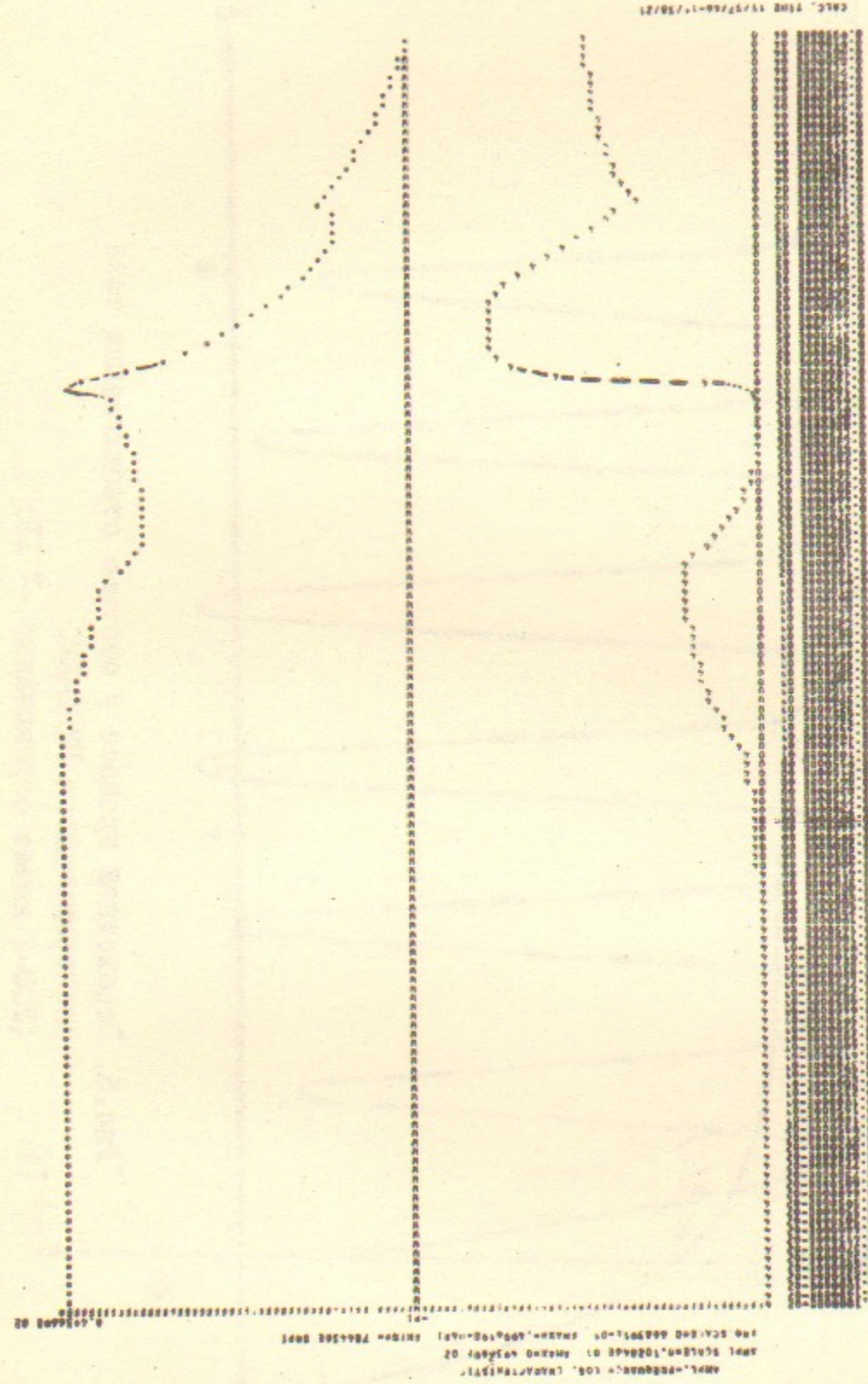


Рис.7. Логарифмические амплитудно-частотная и фазо-
 частотная характеристики системы стабилизации
 тока электромагнитов ВЭШ-2М (контур стабили-
 зации напряжения, разомкнуты точки С-С', рис.1).

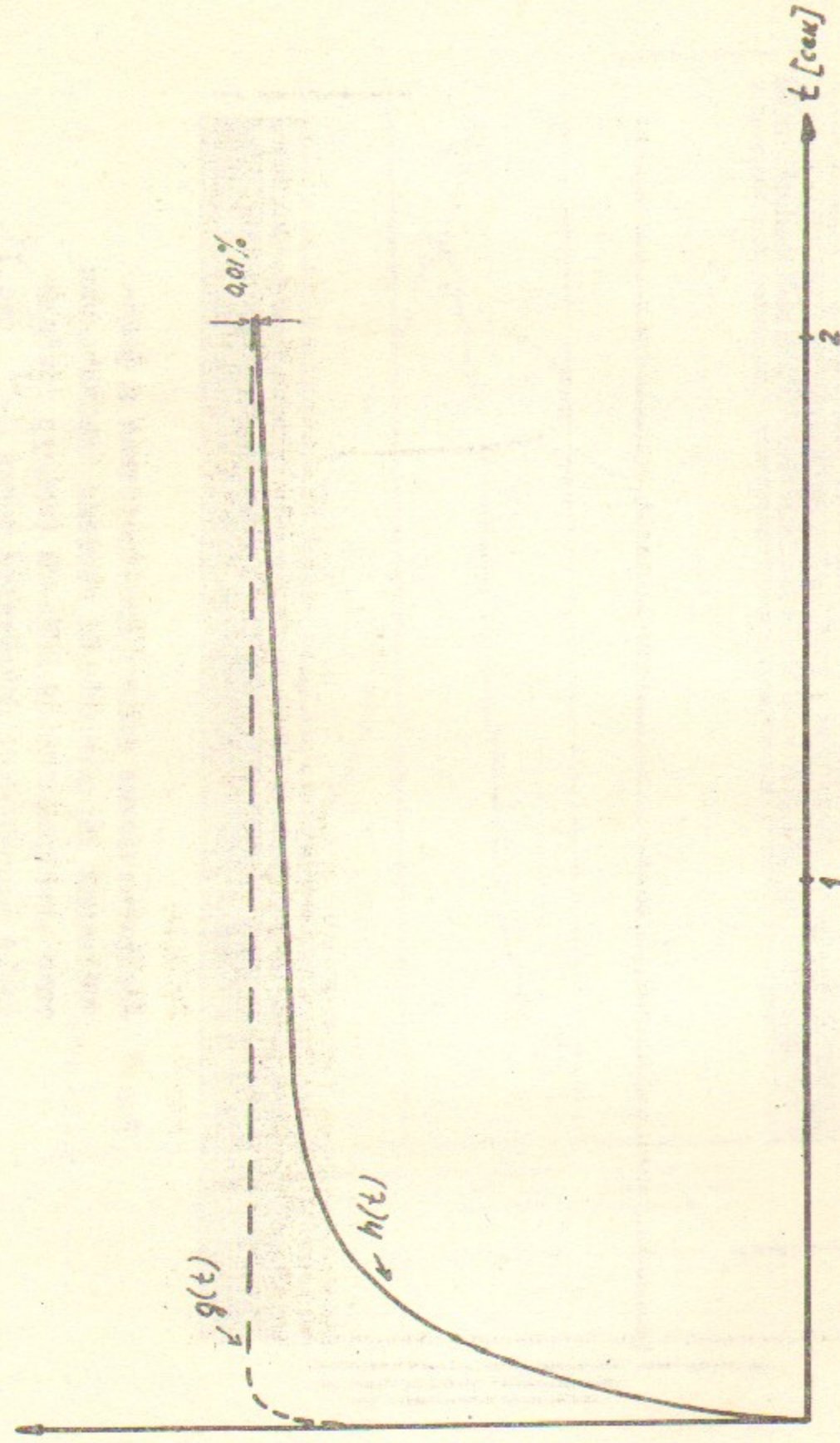


Рис.8. Переходной процесс в системе стабилизации тока электромагнитов ВЭШ-2М. (УСО-2 имеет ограничения ± 10 В)

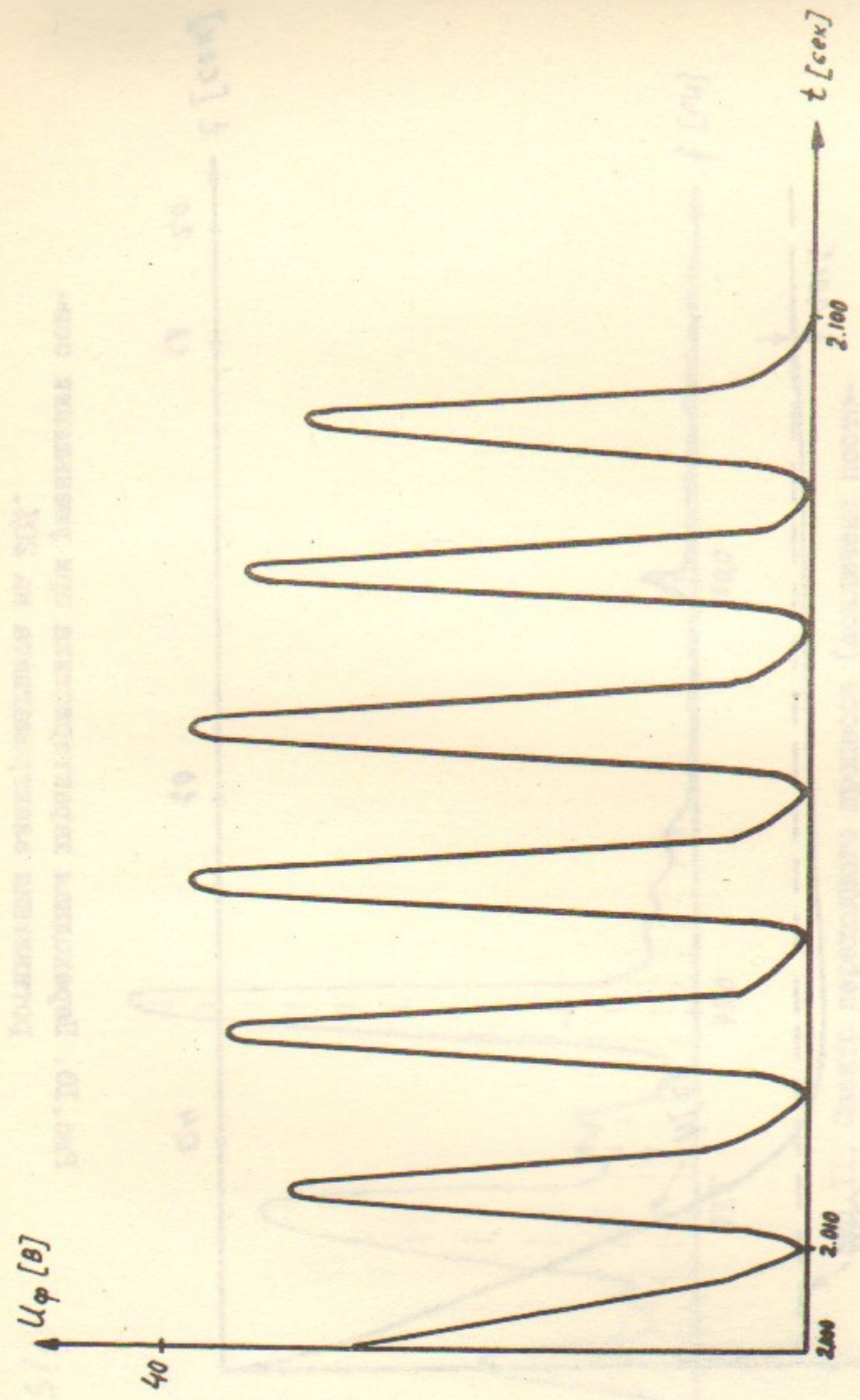


Рис.9. Выходное напряжение на фильтре в режиме замкнутой обратной связи свидетельствует о наличии нелинейного возбуждения системы (УСО-2 имеет выходное напряжение ± 10 В).

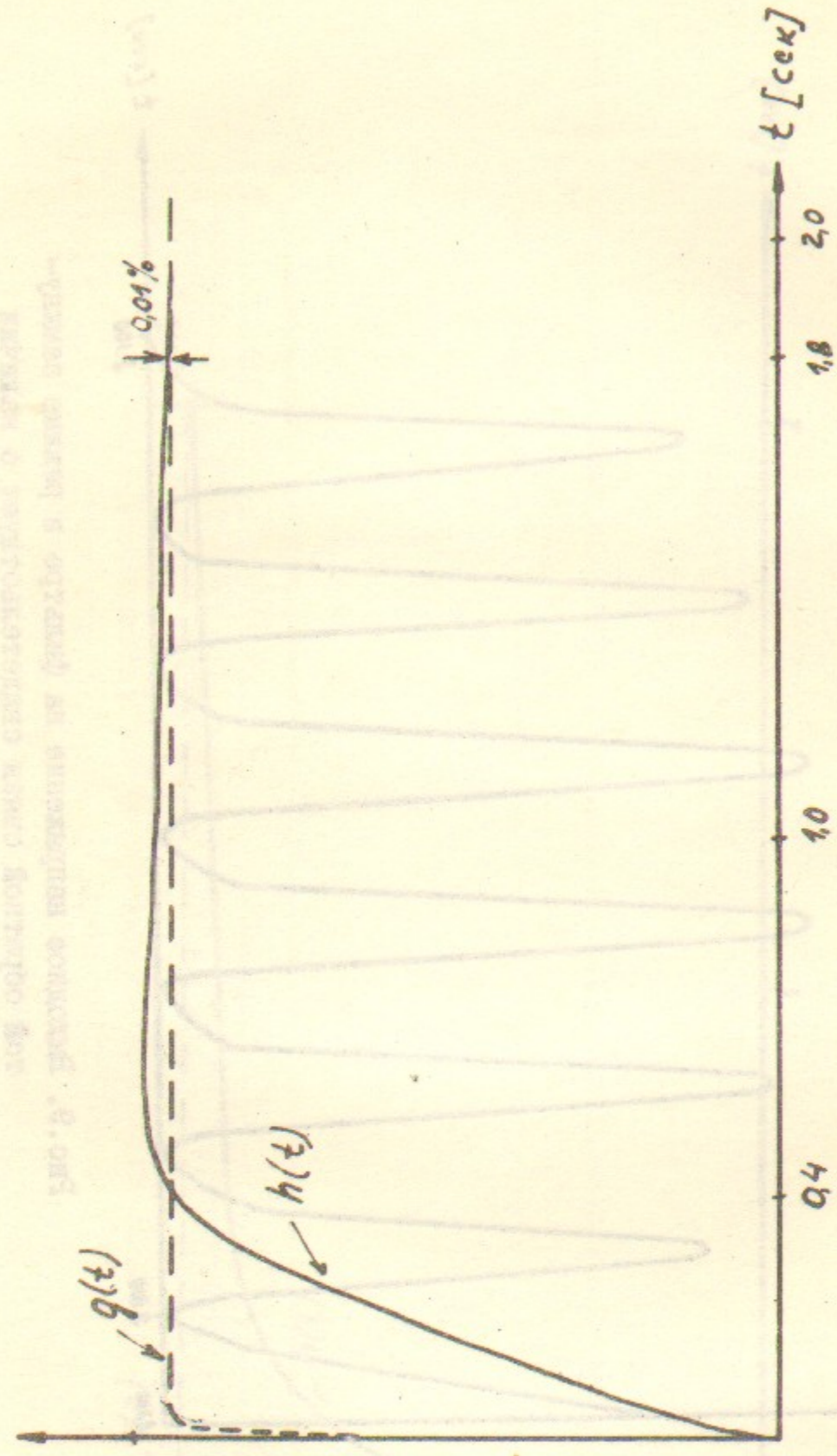


Рис. 10. Переходная характеристика при уменьшении сопротивления электромагнита на 20%.

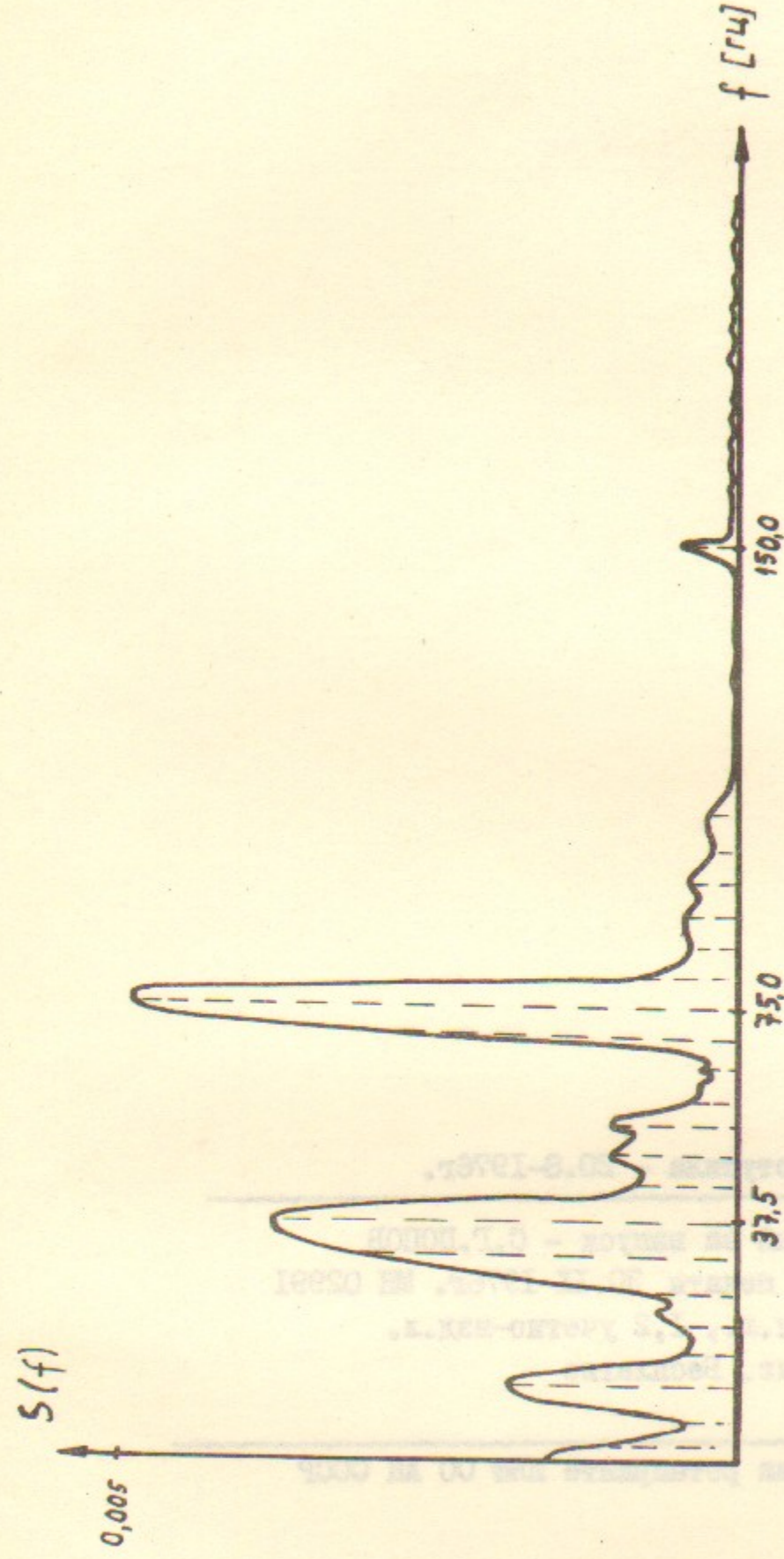


Рис. 11. Спектр переходного процесса (исключена постоянная составляющая, равная 1 В) при невыполнении условий отсутствия автоколебаний.

Результаты исследования эластичности
влияния концентрации ионизирующего излучения на
структуру макромолекулярных соединений (исследования по теме)

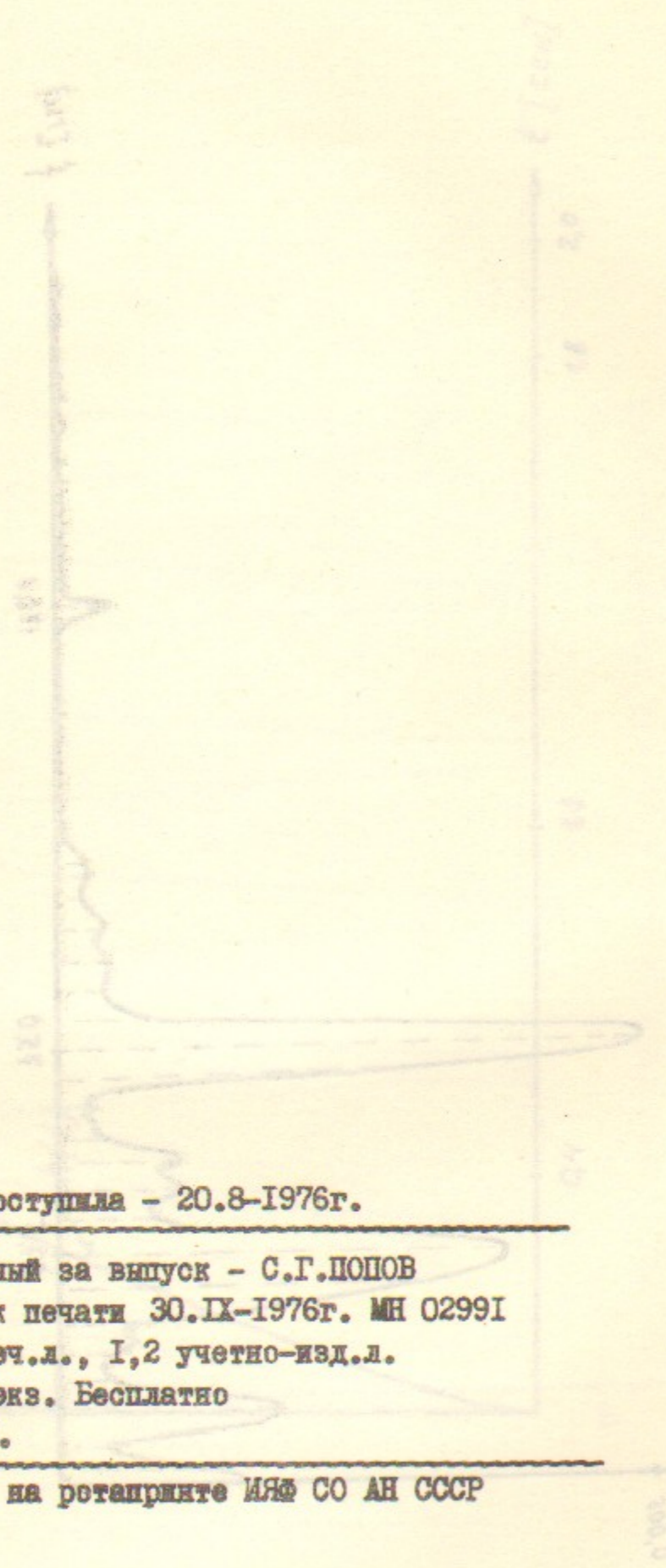


Рис. 10. Изменение концентрации ионизирующего излучения в зависимости от дозы облучения.

Работа поступила - 20.8-1976г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ
Подписано к печати 30.IX-1976г. МН 02991
Уол. 1,5 печ.л., 1,2 учетно-изд.л.
Тираж 200 экз. Бесплатно
Заказ № 97.

Отпечатано на ротапринте ИЯЭ СО АН СССР

112