

Автоматизация на базе ЭЦВМ целесообразна не только на предприятиях, серийно выпускающих измерительную аппаратуру, но также в НИИ и КБ, занимающихся ее разработкой.

О. Б. Власов-Власюк, Ю. В. Ковачич, А. М. Линец,  
Г. В. Пехтерев, А. М. Шевченко

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Разработка цифровой системы управления силовой установки, как и любой другой сложной системы, проходит несколько фаз, отличающихся содержанием и распределением объемов работ. Характерным для первых фаз является преобладание исследовательских работ.

Обычно на фазе формулирования основных принципов решения задачи затраты распределяются следующим образом [1]:

анализ задач и методов решений	— 75%
конструкторские проработки	— 25%

На следующей фазе — предварительной разработки и выбора конкретных технических решений —

анализ задач и методов решений требует 50% затрат.  
конструкторские проработки — 50%.

Ввиду сложности современных систем, подчас невозможно аналитически установить требуемые зависимости параметров в системе. В таком случае основным средством анализа задач является исследование моделей и прототипов системы на моделирующих установках (аналоговых вычислительных машинах); на цифровых вычислительных машинах и на стендовых установках.

Однако затраты на проведение работ существенно различаются в зависимости от используемых средств. Так, например, если ориентироваться на «машинный час», то для перечисленных средств соотношение стоимостей машинного часа будет в среднем равно 1:2.

Учитывая большой удельный вес исследовательских работ, высокую стоимость их осуществления, следует уделять большое внимание распределению усилий и технических средств по этапам разработки. Очевидна также перспективность и важность автоматизации исследований при проведении подсобных работ.

Целью моделирования замкнутых цифровых систем управления являются, с одной стороны, определение состава алгоритмов управления, значений числовых параметров алгоритмов, обеспечивающих заданные точности, характер переходных процессов, устойчивость, отсутствие автоколебаний и пр.; с другой

стороны, — определение параметров, характеризующих цифровую часть системы управления.

Цифровой принцип обработки информации в цифровых системах управления обуславливает существенную взаимозависимость параметров управляющей машины и числовых значений коэффициентов алгоритмов управления друг от друга и от ряда внешних факторов. Например, точность поддержания режима зависит как от структуры алгоритма управления и числовых значений коэффициентов, так и от точности представления параметров объекта, которая в цифровых системах всегда ограничена.

Вследствие этого окончательный выбор алгоритмов управления и количественных значений параметров ЦВМ (таких, например, как длина разрядной сетки) должны основываться на результатах анализа взаимозависимости параметров по системе в целом.

Для оценки качества алгоритмов управления применяют следующие показатели:

- точность поддержания режимов регулирования в переходных и установившихся процессах;
- запасы устойчивости контуров регулирования;
- характер переходных процессов;
- отсутствие нежелательных (в частности автоколебательных) режимов.

Ввиду имеющихся ограничений на весовые, габаритные и некоторые другие величины показателями БЦВМ считают: объем машинной реализации алгоритма; потребное быстродействие реализации алгоритма; требуемые объемы памяти.

По алгоритмам управления и БЦВМ имеется ряд параметров, влияющих в той или иной мере на показатели алгоритмов и БЦВМ.

Разобьем условно параметры на группу слабо влияющих и группу сильно влияющих. К первой, например, можно отнести величину временного запаздывания между моментом съема информации с датчика и моментом использования этой информации в алгоритме.

Во вторую группу отнесем следующие параметры:

- а) математическую формулировку алгоритмов управления (обычно имеется ряд вариантов для конкретного контура регулирования);
- б) численные значения коэффициентов, входящих в алгоритм управления;
- в) период дискретности при выдаче результирующей величины алгоритма;
- г) длину разрядной сетки, принятой для представления величин;

- д) численный метод реализации некоторых математических зависимостей (например, операций интегрирования и дифференцирования);
- е) тип экстраполятора, сглаживающего сигнал управления.

Перечисленные зависимости следует устанавливать, принимая во внимание величину и вид возмущений, воздействующих на замкнутые контуры системы управления.

Так как в процессе исследования и уточнения алгоритмов необходимо реализовать большое количество вариантов машинных программ, а также ввиду неизбежности ошибок при их составлении, была принята единая последовательность поэтапной подготовки и отладки программ.

Последовательность этапов изготовления рабочих программ, не связанных между собой алгоритмов, показана на рис. 1. Для простых, неразветвленных алгоритмов могут отсутствовать этапы, обведенные пунктиром. Перед зашивкой рабочей программы в постоянную память должны быть определены все коэффициенты законов управления и масштабы переменных с учетом характеристик датчиков реальной системы.

Методика отладки программ принята единой для всех алгоритмов и состоит из следующих этапов:

1. Набивка программы на перфоленте.
2. Выбор контрольных точек. Производится таким образом, чтобы процесс вычисления охватывал все возможные разветвления программы, проверку всех условий и экстремальные значения промежуточных результатов.
3. Расчет контрольных точек решения графо-аналитическими методами в десятичной системе.
4. Снятие контрольных точек решения, полученного в машине, и перевод их в десятичную систему с учетом масштабов и сравнение результатов.

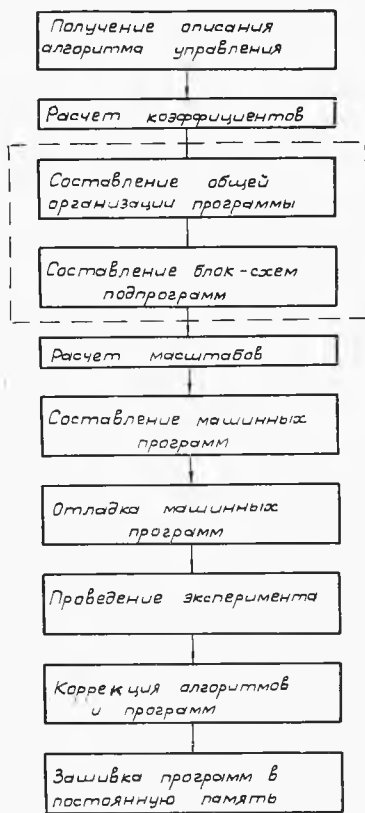


Рис. 1. Этапы изготовления рабочих программ

5. В случае несовпадения для выявления ошибок производится просчет вручную численными методами нескольких шагов машины с учетом масштабов в двоичной или в десятичной системе с последующим переводом промежуточных результатов в двоичную систему.

6. Анализ процесса вычислений по шагам.

7. Устранение ошибок в программе.

8. Коррекция алгоритма (не обязательна).

Использование блочного принципа программирования значительно упрощает составление однотипных программ и допускает независимую замену и отладку отдельных блоков программы, а также многократное использование общих частей программы. Наиболее общие и часто повторяющиеся или циклические цепи вычислений оформляются в виде самостоятельных подпрограмм (способы интегрирования или дифференцирования, счетчики, методы аппроксимации функций и т. д.).

В связи с тем, что качество и эффективность цифровой системы управления определяются как параметрами алгоритмов, так и свойствами вычислительной части системы, цель исследования заключалась в определении зависимости показателей качества управления от коэффициентов законов управления и от технических характеристик цифровой управляющей машины.

Ввиду необходимости варьирования значительного числа входных параметров эксперимента, большое внимание уделялось вопросам автоматизации и повышения оперативности проведения исследований. Особое значение приобретают способы изменения параметров эксперимента при проведении натуральных испытаний цифровых систем на стендах. В этом случае требуется за минимальное время исследовать максимальное число возможных вариантов алгоритмов управления. Любое изменение алгоритма приводит к изменению программы ЦВМ. Очевидно, что все манипуляции с программой должны быть по возможности упрощены и формализованы. В то же время нельзя заранее установить необходимые диапазоны изменения и возможные сочетания входных параметров эксперимента и составить ограниченное число вариантов рабочих программ. Поэтому машинная программа, с которой проводится эксперимент, должна иметь гибкую организацию и допускать независимое изменение параметров эксперимента в широких диапазонах. Весьма существенной характеристикой исследовательской программы является также простота и удобство работы для оператора.

С другой стороны, проведение натуральных испытаний сложных и дорогостоящих объектов в относительно тяжелых условиях работы управляющей ЦВМ на стенде требует высокой надежности и помехоустойчивости программы. Недопустима запись программы в оперативную память, подверженную сбоям

и стиранию информации при высоких уровнях помех или пропадании питания. Учитывая жесткий регламент проведения испытаний и невозможность внесения исправлений или изменений в машинную программу в ходе эксперимента, единственным возможным способом хранения программы и числовых констант следует считать запись в постоянную или одностороннюю память.

Противоречивые требования гибкости исследовательской программы, возможности вариаций в широких пределах большого числа факторов эксперимента, — с одной стороны,

и неизменяемости записанной в ЦВМ информации, — с другой, могут быть удовлетворены при помощи универсальной программы-супервизора, обеспечивающей программное изменение характеристик цифровой управляющей машины и параметров алгоритмов управления. На рис. 2 показаны реализованные способы программного изменения некоторых факторов эксперимента. Ниже перечислены функции, выполняемые программой-супервизором, и описана последовательность их выполнения.

Способ программного изменения частоты выдачи решений для 2-х алгоритмов показан на рис. 3. Константы задания частоты хранятся в постоянной памяти машины, откуда они пересылаются в рабочие ячейки программы. Выбор одной из констант производится после анализа определенных разрядов тумблерного регистра на пульте управления. Если в алгоритме присутствуют коэффициенты, зависящие от частоты выдачи решений, то по тому же признаку производится пересылка в соответствующие рабочие ячейки сразу всех взаимосвязанных величин (например, константы задания частоты, периода дискретности, значения частоты и т. д.).

При решении на ЦВМ дифференциальных уравнений, описывающих динамику управляющей части системы управления, операции интегрирования и дифференцирования могут выпол-



Рис. 2. Структура и способы изменения факторов экспериментов

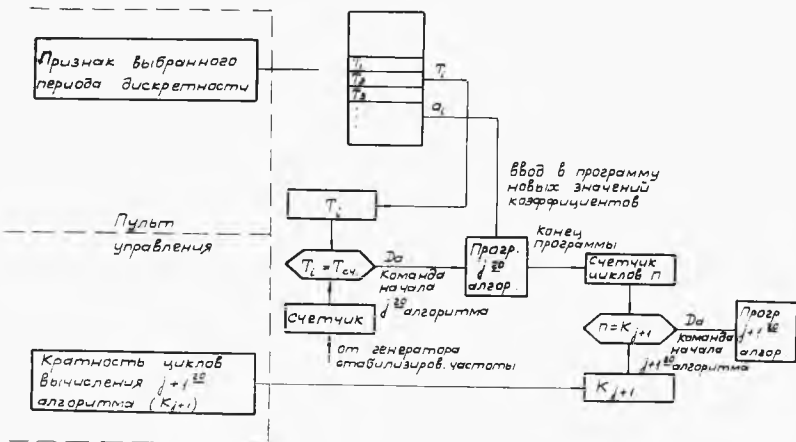


Рис. 3. Изменение частоты выдачи решений

няться различными численными методами. В этом случае для каждого оператора  $s, s^2, \dots, s^{-1}, s^{-2}, \dots$ , составляются подпрограммы вычислений, реализованные несколькими методами. Выбор метода дифференцирования или интегрирования производится в зависимости от признака, указываемого на пульте управления. Таким же образом могут быть изменены способы аппроксимации неаналитических функций, методы фильтрации помех на входе или экстраполяции на выходе.

Точность вычислений на ЦВМ определяется масштабами переменных и длиной разрядной сетки машины. Для конкретного алгоритма управления обычно заранее известны диапазоны изменения, а следовательно, и масштабы переменных. В данной работе исследовалось влияние длины разрядной сетки машины на точность вычислений. Изменение разрядности машины имитировалось ограничением числа значащих разрядов входных переменных и промежуточных результатов вычислений путем логического умножения на константы вида  $11 \dots 100 \dots 0$ , где число старших единиц равно желаемой разрядности машины. Команда логического умножения вставляется в программу после операций умножения, деления, сдвига и других, если разрядность результата может превысить желаемую.

Для удобства и повышения точности регистрации результатов эксперимента в программе предусмотрены специальные меры. Ввиду широкого диапазона изменения выходных параметров системы управления обычная запись процесса на самопишущих приборах имеет низкую точность и весьма трудоемка для последующей обработки. При выводе данных из цифровой машины через ПКН и записи их в непрерывной форме на шлейфовом осциллографе можно применять масштабирование в цифровой

форме, не внося погрешностей при больших масштабах коэффициентов и малых абсолютных значениях величин, или вести запись в «растянутой шкале» (например, автоколебания или шум в установленном режиме).

Статистическая обработка результатов может вестись как в темпе процесса, так и после окончания эксперимента. В первом случае вычисляются интегральные оценки или статистические характеристики сигналов, которые регистрируются одновременно с процессом, во втором — данные записываются в буферную память, а затем печатаются в цифровой форме или выводятся во внешнюю память на магнитных или перфорационных носителях для последующей автоматизированной обработки.

Таким образом, благодаря введению в исследовательскую программу гибкой универсальной программы-супервизора, модель цифровой системы управления может рассматриваться как набор вычислительных блоков, реализующих отдельные элементы системы управления с изменяемыми точностными и динамическими характеристиками.

Изменение всех параметров и характеристик машинной программы производится по признакам, вводимым с пульта управления. Ограниченный набор значений каждой варьируемой величины хранится в постоянной, нестираемой памяти машины. Каждому параметру соответствует группа разрядов тумблерного регистра. Число разрядов в группах равно числу фиксированных значений параметра. В зависимости от включенного тумблера в каждой группе разрядов производится выбор одного из значений параметра и пересылка его в рабочую ячейку программы, закрепленную за данным параметром.

В некоторых случаях, например, при снятии характеристик системы вблизи границ устойчивости, необходимо иметь возможность плавно менять некоторые параметры, от которых зависит устойчивость системы. Это в первую очередь относится к коэффициентам законов управления и к частоте выдачи решений. Плавное изменение этих параметров осуществляется путем введения через аналого-цифровые преобразователи напряжений, снимаемых с обычных потенциометров и пропорциональных величинам изменяемых параметров.

Исследование системы управления силовой установки проводилось на экспериментальном комплексе (рис. 4) в реальном масштабе времени. Комплекс состоит из цифровой управляющей машины УМ-2, аналоговых вычислительных машин МН-14 и МН-7 и штатной аппаратуры управления.

На аналоговой машине МН-14 была набрана динамическая модель двигателя по методике, изложенной в работе [2].

Цифровая машина использовалась для моделирования БЦВМ, причем управление с помощью ЦВМ проводилось отдельно каждым из контуров двигателя, другие контуры в это

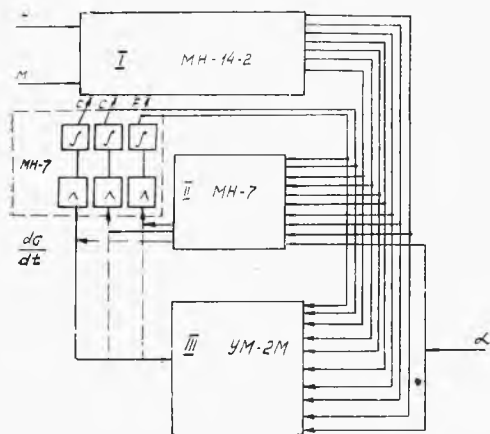


Рис. 4. Общая блок-схема комплекса

время управлялись штатными регуляторами (или их моделями).

Регуляторы форсажного топлива и площади реактивного сопла были представлены динамическими моделями, регулятор числа оборотов использовался натуральный. При исследовании каждого из контуров управления с ЦВМ, соответствующий штатный регулятор отключался от его исполнительного механизма.

В процессе исследований определялись следующие параметры.

1. Область устойчивой работы замкнутых контуров управления (определялась по критическому значению коэффициента усиления соответствующего контура). Неустойчивым состоянием считается такое, при котором устанавливаются незатухающие или слабозатухающие колебания входных или выходных параметров. Критическое значение коэффициента усиления системы управления для этого состояния складывается из следующих составляющих:

$$K_{кр} = K_{цвм} K_M K_{и} K_1,$$

где  $K_{цвм} = \frac{\Delta u_{вых}}{\Delta u_{вх}}$  — коэффициент усиления ЦВМ;

$K_M$  — масштабный коэффициент модели;

$K_{и}$  — постоянная интегрирования исполнительного механизма;

$K_1$  — коэффициент усиления вспомогательного усилителя.

Области устойчивой работы для всех замкнутых контуров управления определялись по указанной методике при различных частотах выдачи решений и различной длине разрядной сетки вычислителя (БЦВМ).

2. Качество переходных процессов в системе регулирования оценивалось по осциллограммам при действии возмущения путем изменения давления воздуха  $P_1$  на входе в двигатель.

Изменение давления воздуха производилось с постоянной скоростью, вызывающей изменение расхода топлива со скоростью  $0,5 G_{max}$  за сек.

Из осциллограмм определялись:



- а) максимальные отклонения регулируемых величин при возмущении системы;
- б) число перерегулирований за время переходного процесса;
- в) время установления переходного процесса;
- г) отклонения регулируемых величин в установившемся режиме работы при различной длине разрядной сетки.

Переходные процессы регистрировались при различных сочетаниях высот и скоростей полета. При этом изменялась частота выдачи решений ЦВМ, длина разрядной сетки, а также коэффициенты усиления звеньев системы регулирования.

Был рассмотрен следующий ряд алгоритмов управления по отдельным контурам ТРДФ.

Стабилизация числа оборотов осуществлялась дозированием топлива в основной контур по закону

$$G_T = f_1 \left( n_{\text{зад}}, n, P_2^*, \frac{dn}{dt} \right).$$

Разгон и сброс числа оборотов производился в зависимости от скорости изменения числа оборотов по закону

$$G_T = f_2 \left( \frac{dn}{dt} \text{ зад}, \frac{dn}{dt}, P_1^* \right).$$

Законы дозирования топлива при стабилизации, разгоне или сбросе числа оборотов отличаются зависимостью заданного значения скорости от приведенного числа оборотов.

При стабилизации

$$n_{\text{зад}} = F(d_1, T_1^*, M),$$

при разгоне или сбросе

$$\frac{dn_{\text{зад}}}{dt} = F_{p.c} (n_1, T_1^*).$$

Дозирование топлива в форсажный контур двигателя производилось в соответствии с законом

$$G_{T.\phi} = f_3(G_T, G_{\phi}, P_2^*, \gamma).$$

Заданное значение  $\gamma$  является функцией положения ручки управления

$$\gamma = f_4(\alpha_{\text{рул}}).$$

Ограничение давления и температуры газов осуществлялось путем ограничения расхода топлива основного контура двигателя.

На режимах ограничения давления  $P_2$  и температуры  $T_3$  дозирование топлива производилось следующим образом:

$$G_i = f_5(P_{2\text{зад}}^*, P_2^*) \text{ при } P_2^* > P_{2\text{зад}}^*$$

$$G_i = f_6(T_{3\text{зад}}^*, T_3^*) \text{ при } T_{3\text{зад}}^* < T_3^*$$

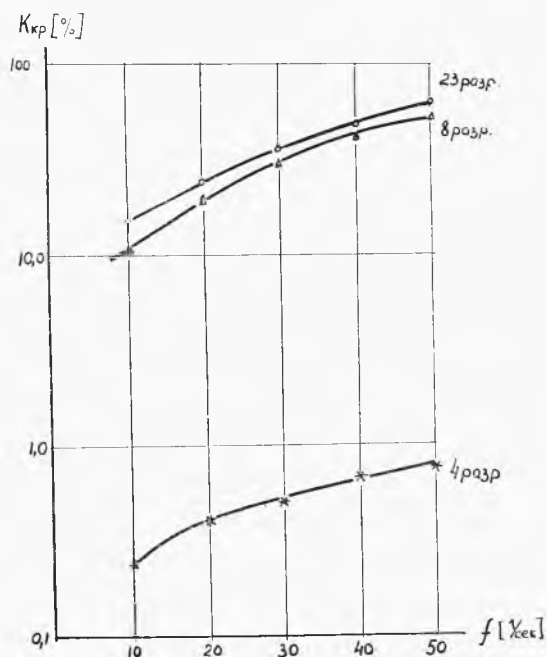


Рис. 5. Зависимость  $K_{кр}$  от частоты  $f$  и длины разрядной сетки для контуров оборотов

Заданные значения давлений и температуры определяются из условий обеспечения безопасных режимов работы двигателя при любых сочетаниях высот и скоростей полета.

Величина  $T_3^*$  определяется как функция переменных

$$T_3^* = F(P_1^*, T_1^*, n, G).$$

Регулировка площади реактивного сопла осуществлялась в соответствии с соотношениями

$$F_c = f_7(P_2^*, P_4^*, T_1^*, T_1^*, n, M, \Phi).$$

На рисунках 5—8 приведены результаты экспериментов.

На рис. 5 показано как меняются область устойчивой работы контура при изменении частоты выдачи решений и изменении частоты длины разрядной сетки.

На рис. 6 приведены значения критического коэффициента усиления различных контуров регулирования в зависимости от частоты выдачи решений для двух значений условий полета ( $M, H=0$  и  $M, H=100\%$ ). Как видно, значения критического коэффициента усиления изменяются примерно от 4 до 50 раз

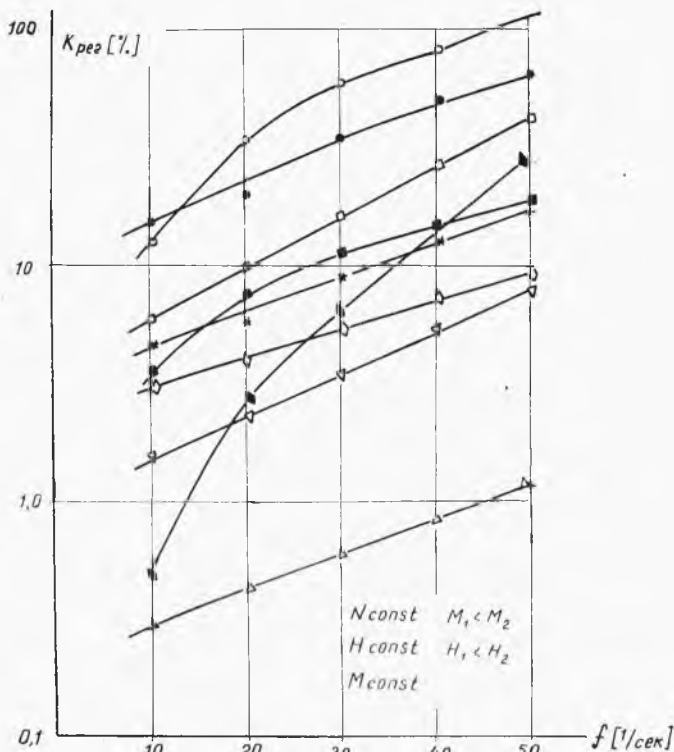


Рис. 6. Зависимость  $\kappa_{кр}$  от  $f$  для различных контуров для ограничителя режимов работы:

—○— площадь сопла; —○— форсажный контур  $M_1$ ;  $H_1$  —  $M_2$ ;  $H_2$ ; ограничитель давления — —  $M_1$ ;  $H_1$  —  $M_2$ ;  $H_2$ ; стабилизация  $n$  — \* —  $M_1$ ;  $H_1$   $H_2$ ; ограничитель температуры газов — — —  $M_1$ ;  $H_1$ .

при изменении частоты выдачи решений и более чем на порядок при изменении длины разрядной сетки.

Зависимость критического коэффициента усиления от внешних параметров показана на рис. 7.

Здесь также диапазон изменения критического коэффициента довольно большой ( $\kappa_{кр}$  изменяется почти на порядок).

Наконец, на рис. 8 приведена зависимость амплитуды колебаний створок реактивного сопла от частоты выдачи решений в режиме отслеживания заданного положения.

В заключение следует отметить, что проделанные эксперименты подтвердили наличие существенного влияния параметров БЦВМ на качество процессов управления. С другой стороны, полученные зависимости позволяют обоснованно выбрать

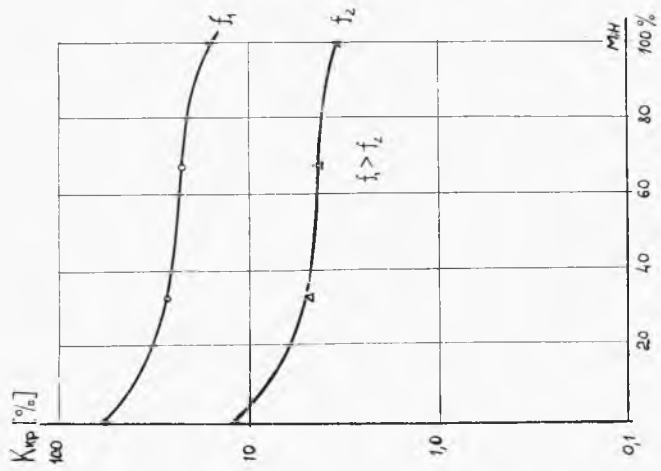


Рис. 7. Зависимость  $K_{вп}$  от внешних параметров

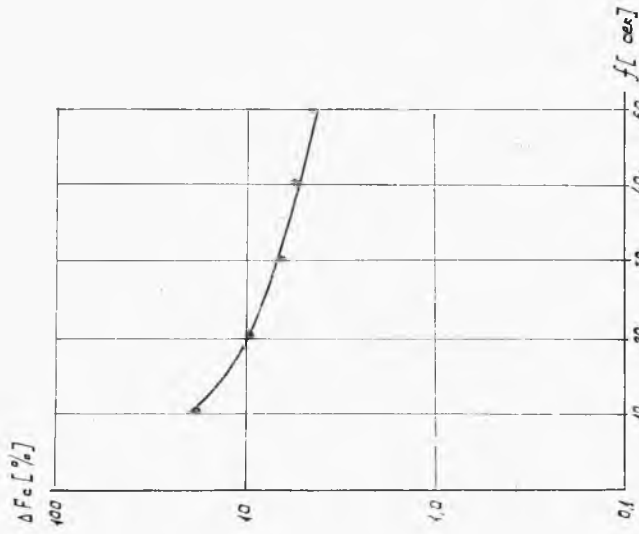


Рис. 8. Зависимость амплитуды колебаний створок сошла  $\Delta F$  от частоты  $f$

параметры алгоритмов управления и кроме этого определить возможное снижение качества при потере части вычислительной мощности цифровой системы.

Работы подобного характера составляют существенную долю по выбору параметров БЦВМ и алгоритмов управления.

Как показывает опыт, они требуют больших затрат времени и труда. Уменьшения этих показателей можно добиться только путем разработки специальной методологии проведения экспериментов и специализированных вычислительных комплексов и соответствующего программного обеспечения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Dunlap R. A., O'Keefe J. K. Systems Analysis for Space Programs. 5-th Reliability and Maintability Conf., 1966.

2. Власов-Власюк О. Б., Кочураева К. С., Пехтерев Г. В. Динамическая модель одновального ТРДФ для исследования реальной аппаратуры регулирования при широком диапазоне изменения режима работы двигателя и условий полета. Сборник статей «Автоматическое управление авиадвигателями», № 63, М., 1968.

3. Cottington R. V. The Design of a Digital Three-Term Controller as a Turbejet Engine Speed Governor using Digital Simulation Methods. Aeronaut. Res. Coun. Repts. and Mem., 1970. № 3615, p. 33.

4. Moehring J. T. Fuel control System of the GE-4 Engine for the Supersonic Transports. «SQE Preprints», s. a. № 670326, N Y.

5. Белкин Ю. С., Боднер В. А. О применении самонастраивающихся систем для оптимизации режимов работы и переходных процессов ТРДФ. В сб. «Самонастраивающиеся автоматические системы». Труды I Всесоюзной конференции по теории и практике СИС. М., 1965.

6. Шевяков А. А. Автоматика авиационных и ракетных силовых установок. «Машиностроение», М., 1965.