

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Д.А. Быстров

Арзамасский политехнический институт (филиал)
Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева
manhattan.real@gmail.com

Аннотация. Предложен метод выбора коэффициентов передачи регулятора контура стабилизации перегрузки продольного канала летательного аппарата. Разработаны вычислительные алгоритмы адаптации и стабилизации для бортовой цифровой вычислительной машины. Работоспособность разработанных алгоритмов подтверждена результатами математического моделирования на цифровом комплексе моделирования.

Ключевые слова: система стабилизации, регулятор, канал, алгоритм адаптации, переходный процесс.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ADAPTATION AND STABILIZATION ALGORITHMS IN THE SYSTEM OF AN AIRCRAFT

Bystrov D.A.

Arzamas Polytechnic Institute (branch)
of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Abstract. Selection method of gain ratios for the aircraft longitudinal channel stabilization overload circuit regulator is offered. Computing algorithms of adaptation and stabilization are developed for the onboard digital computer. Efficiency of the algorithms is confirmed with results of mathematical simulation on a digital complex of simulation.

Keywords: stabilizing system, regulator, channel, adaptation algorithm, transient response.

Введение

Современный этап развития систем управления полетом характеризуется широким внедрением принципов адаптации, применением БЦВМ для формирования алгоритмов управления, повышением надежности средств получения и переработки информации и исполнения команд управления.

Известно, что динамические свойства летательного аппарата без бортовой системы стабилизации не обеспечивают требуемую точность управления [5]. Благоприятное влияние системы стабилизации на процесс управления проявляется в обеспечении высокого качества переходных процессов отработки входных команд управления и внешних возмущающих воздействий [7].

Целью работы является разработка алгоритмов регулятора контура стабилизации (КС) перегрузки продольного канала, являющегося частью трехканальной системы стабилизации беспилотного ЛА. Отличительной особенностью работы является практическое подтверждение важного преимущества использования БЦВМ, позволяющего реализовать принцип аппаратной унификации систем управления для разных ЛА. Синтез алгоритмов должен быть произведен с учетом структуры и аппаратной реализации уже существующей системы управления, испытанной в реальных полетах с конкретным ЛА. Требуется только за счет изменения рабочих программ алгоритмов БЦВМ обеспечить применение ЛА с другими аэродинамическими характеристиками. Разработка алгоритмов регулятора КС перегрузки является частью этой задачи.

Ранее синтез контуров стабилизации производился, в сущности, вручную. В целях сокращения времени синтеза и улучшения качества результатов в работе была поставлена и решена задача автоматизировать процесс проектирования.

Для достижения сформулированной цели поставлены и решены следующие задачи:

- произвести выбор коэффициентов передачи линейного аналогового прототипа регулятора для выбранных режимов полета;
- разработать соответствующие вычислительные алгоритмы адаптации и стабилизации для БЦВМ;
- произвести проверку работоспособности синтезированных алгоритмов с учетом всех особенностей реализации регулятора на цифровом комплексе моделирования (ЦКМ).

Основная часть

В большинстве случаев КС короткопериодического движения беспилотного летательного аппарата строится по двухконтурной схеме [3]. При этом внутренний контур демпфирования всегда замыкается по информации об угловой скорости. Внешний контур может замыкаться по информации об угле тангажа или нормальной перегрузке.

По заданию определена исходная структурная схема КС с замыканием главной обратной связи по перегрузке. Это обусловлено ее преимуществами при решении конкретных задач, определенных в техническом задании на разработку системы управления. Эти преимущества [6] сводятся к следующему:

- более высокое быстродействие при обработке заданных значений управляющего сигнала;
- практически постоянная пропорциональная зависимость между сигналом управления (наведения) и достигаемой при этом управляющей нормальной силой во всем диапазоне применения;
- обеспечивается более высокая точность стабилизации в прямолинейных режимах полета в турбулентной атмосфере;
- при наличии интеграла по отклонению от заданной перегрузки обеспечивается инвариантность

по отношению к изменению балансирующего угла атаки в прямолинейных режимах полета;

- при построении траекторного контура стабилизации высоты его передаточные коэффициенты мало зависят от изменения динамических коэффициентов ЛА;
- простая реализация заданных ограничений на величину угла атаки и нормальных перегрузок.

Вариант с замыканием главной обратной связи по перегрузке реализован во всех системах управления разработки ОАО «АНПП «Темп-Авиа» для беспилотных ЛА и обеспечивает формирование траекторий, включающих подавляющее большинство разнообразных участков выполнения требуемых маневров. Заданная структурная схема регулятора контура стабилизации продольного канала ЛА [2] с замыканием главной обратной связи по перегрузке приведена на рисунке 1.

Контур стабилизации в данной работе является цифро-аналоговым. Внутренний контур демпфирования, замыкаемый по информации об угловой скорости, является аналоговым. Внешний контур замыкается по цифровой информации о перегрузке. Необходимая для замыкания обратных связей контура стабилизации информация поступает с датчиков первичной информации БИНС (датчика угловых скоростей (ДУС) и датчика линейных ускорений (ДЛУ)).

Известно, что ЛА является очень сложным объектом управления. Его движение описывается системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений [4]. При этом задача управления, формулируемая в математической теории управляемого движения как двухточечная задача, не может быть решена в аналитическом виде. На практике задача управления эффективно решается приближенно с использованием различных методов [1]. К ним относятся:

- декомпозиция, сводящаяся к разделению полного пространственного движения на разные группы по темпу движения или по отдельным степеням свободы;

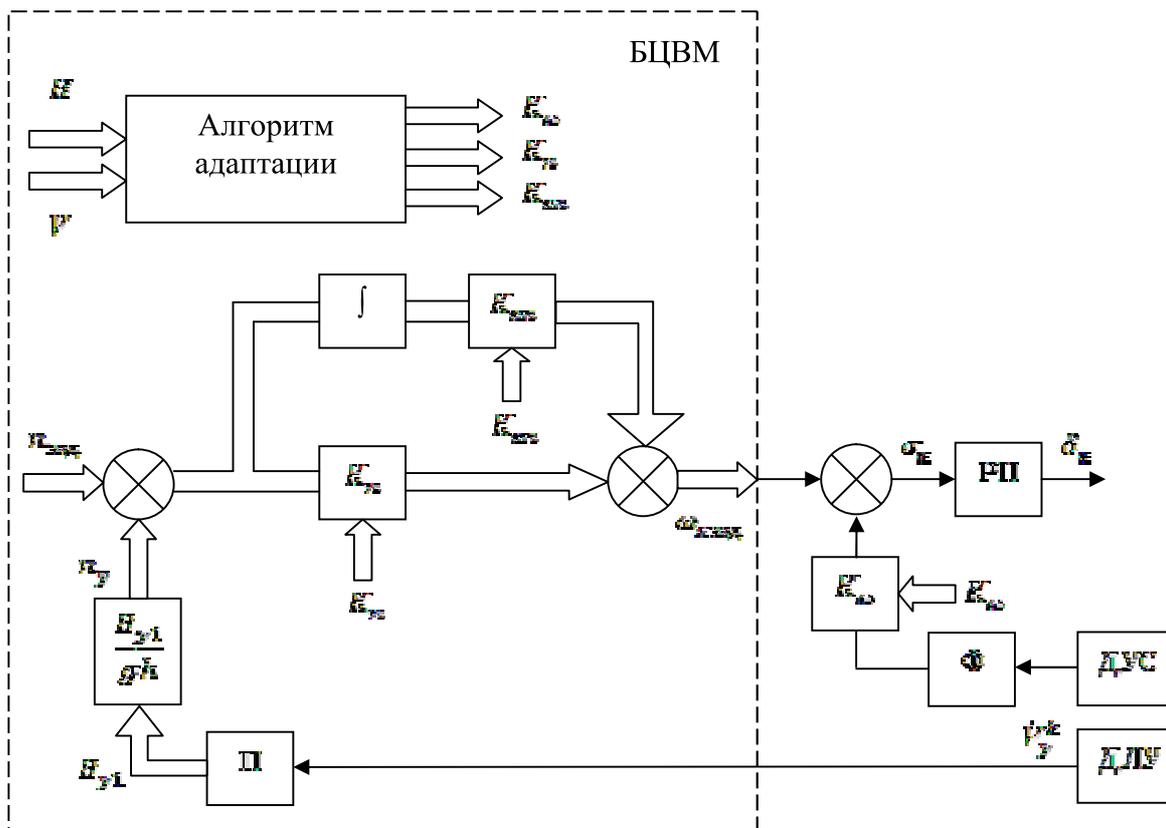


Рис. 1. Структурная схема регулятора КС

- линеаризация уравнений относительно малых отклонений координат состояния от их значений для некоторого возмущенного движения.

С учетом того, что стабилизация осуществляется в режиме малых отклонений координат состояния, при синтезе КС используются линеаризованные уравнения в виде (1):

$$\begin{cases} \ddot{\vartheta} + a_{11} \dot{\vartheta} + a_{12} \alpha = -a_{13} \delta_e; \\ \dot{\theta} - a_{42} \alpha = a_{43} \delta_e; \\ \vartheta - \theta - \alpha = 0; \\ n_y = \frac{V}{g} \dot{\theta}, \end{cases} \quad (1)$$

где ϑ – угол тангажа;

α – угол атаки;

δ_e – отклонение руля высоты;

θ – траекторный угол.

n_y – перегрузка;

$a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{42}, a_{43}$ – динамические коэффициенты.

При разработке алгоритмов стабилизации эффективно использованы разнообразные, хорошо отработанные методы синтеза линейных систем. В данной работе поиск требуемых коэффициентов передачи регулятора контура в автоматическом режиме осуществляется с помощью библиотеки оптимизации *Matlab*. В качестве инструмента для моделирования контура стабилизации продольного движения ЛА используется *Simulink* (программная среда *Matlab*). Формульные зависимости коэффициентов передачи от скоростного напора получены в результате аппроксимации по специально разработанной программе в среде *Matlab*.

Обязательным этапом процесса разработки контура стабилизации короткопериодического движения является подтверждение работоспособности выбранных алгоритмов методом математического моделирования с максимально полным описанием моделей ЛА, составных частей КС и особенностей практической реализации в БЦВМ.

На первом этапе синтеза КС производится выбор параметров для аналогового прототипа с использованием хорошо отработанных методов синтеза непрерывных систем.

Структурная схема КС перегрузки с объектом управления, соответствующим линеаризованным уравнениям движения (1), и регулятором контура реализована в *Simulink*.

КС обрабатывает возмущающее воздействие заданной перегрузки. На вход подается единичный ступенчатый сигнал, который затем обрабатывается динамическими операторами рулевого привода, датчика угловых скоростей и противоизгибного фильтра. Во внутренний контур демпфирования включен коэффициент передачи по угловой скорости. Во внешний контур перегрузки включены коэффициент передачи по перегрузке и по интегралу отклонения от заданной перегрузки. Возмущающий сигнал обрабатывается без статической ошибки, что объясняется наличием астатического звена во внешнем контуре стабилизации перегрузки.

По существу, процесс проектирования в данной работе представляет собой определение коэффициентов передачи регулятора для каждого режима полета ЛА и их дальнейшей аппроксимации. Для любого из режимов необходимо найти такие коэффициенты, при которых переходный процесс будет удовлетворять предъявленным требованиям.

Для решения задачи поиска требуемых коэффициентов в автоматическом режиме использован GUI-интерфейс "*SISO Design Tool*" из пакета прикладных программ *Control System Toolbox* системы инженерных расчетов *Matlab*. *SISO Design Tool* (*SISO* – *Single Input/Single Output*) представляет собой графический интерфейс пользователя, предназначенный для ана-

лиза и синтеза одномерных линейных (линеаризованных) систем автоматического управления.

Для любого из режимов в несколько итераций осуществляется выбор коэффициентов передачи регулятора, при которых переходный процесс системы будет удовлетворять заданным требованиям. Данный метод определения коэффициентов позволяет путем изменения допустимой зоны процесса регулирования добиться минимальных перерегулирования, времени регулирования и нарастания.

Для завершения алгоритма выбора коэффициентов передачи составлена программа в среде *Matlab*, в которой производится аппроксимация функциональной зависимости коэффициента передачи от скоростного напора полиномом третьей степени.

В результате аппроксимации получены формульные зависимости коэффициентов передачи регулятора контура стабилизации для алгоритма адаптации. Переходные процессы обработки управляющей скачкообразной единичной перегрузки в аналоговом прототипе КС с полученными коэффициентами передачи для каждого режима полета показывают, что система стабилизации перегрузки полета во всех режимах обеспечивает требуемое время переходного процесса и перерегулирование.

При разработке вычислительных алгоритмов регулятора КС были составлены рабочие программы на языке *C++* для алгоритмов адаптации и стабилизации. Алгоритм адаптации (АА) предназначен для вычисления сквозных коэффициентов передачи контура стабилизации в зависимости от условий полета. Блок-схема АА приведена на рисунке 2. Алгоритм стабилизации (АС) предназначен для формирования заданной управляющей скорости, которая является входной величиной аналоговой части КС. Блок-схема АС приведена на рисунке 3.

Для подтверждения работоспособности разработанных алгоритмов контура стабилизации перегрузки проведено математическое моделирование продольного движения ЛА на ЦКМ. ЦКМ представляет собой моделирующую программу (МП), написанную в среде программирования *Borland C++ 6.0*

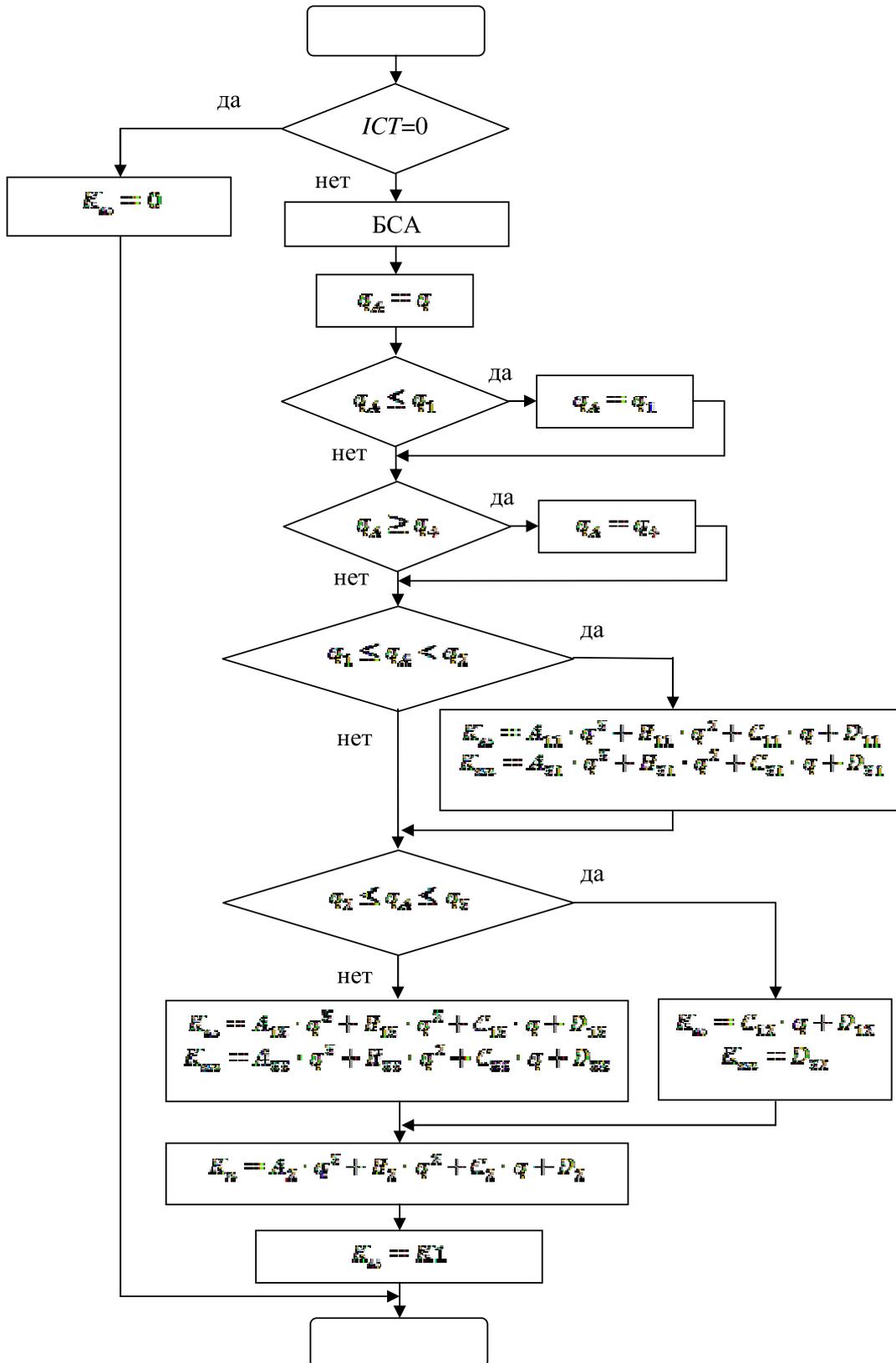


Рис. 2. Блок-схема алгоритма адаптации

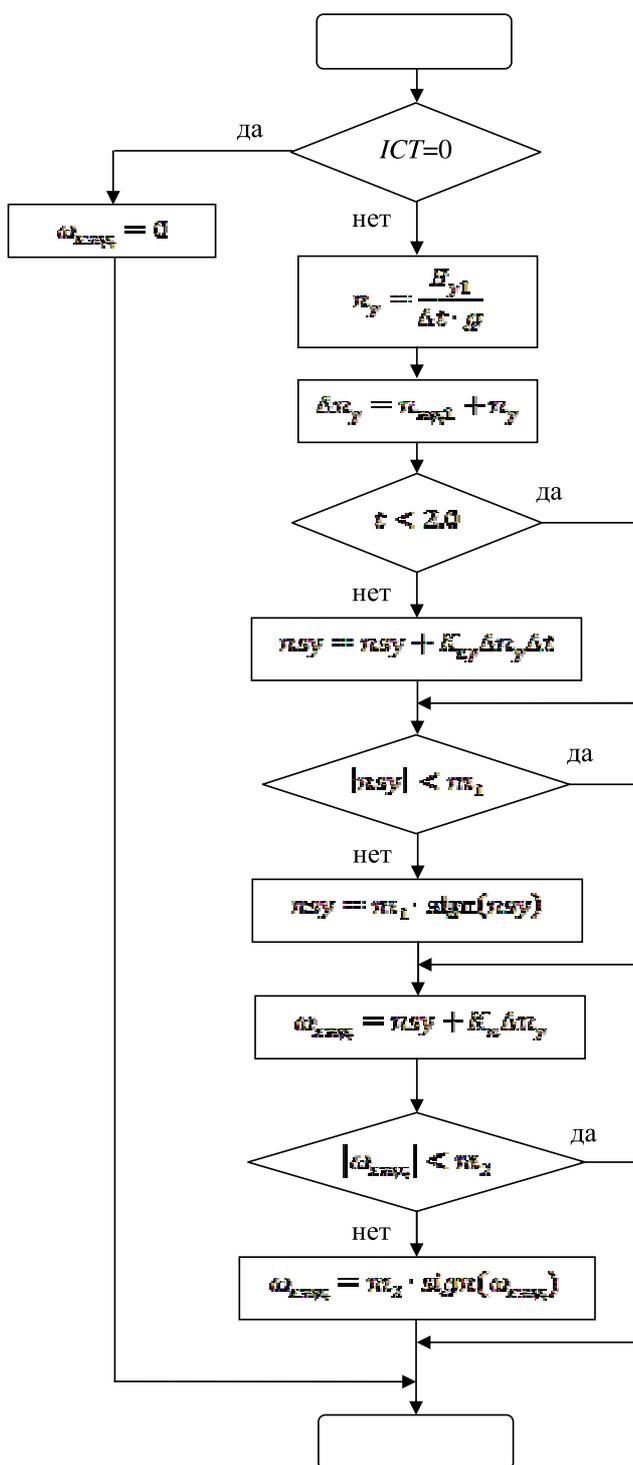


Рис. 3. Блок-схема алгоритма стабилизации

на языке C++. Выбор языка программирования связан с его применением на БЦВМ системы управления ЛА.

Моделирующая программа является имитационной моделью высокого уровня и предназначена для отработки алгоритмов и рабочих программ БЦВМ перед проведением полунатурных и летных испытаний. Уровень моделей, используемых в МП, позволяет получить достоверные результаты для отработки алгоритмов и программ для БЦВМ. Моделирующая программа использует полную пространственную модель ОУ. При этом в ней максимально полно описаны аэродинамические, массо-инерционные и энергетические характеристики.

В ЦКМ введены модули рабочих программ алгоритмов адаптации и стабилизации. На рисунке 4 приведен переходный процесс отработки скачкообразного управляющего сигнала в стационарном режиме полета.

Анализ результатов моделирования показывает, что алгоритмы контура стабилизации перегрузки обеспечивают выполнение требований задания к качеству переходного процесса.

Вторым этапом моделирования является проверка возможности формирования управляемого движения в вертикальной плоскости после пуска с разных высот. Движение по траектории моделируется в виде временной программы изменения заданной перегрузки. Результат моделирования управляемого движения в вертикальной плоскости при $h_0 = 2000$ м приведен на рисунке 5.

Выводы

В результате разработки алгоритмов регулятора контура стабилизации перегрузки продольного канала летательного аппарата последовательно решены следующие задачи:

- произведен синтез контура стабилизации аналогового прототипа с помощью инженерно-прикладного пакета программ *Matlab*;
- осуществлен выбор коэффициентов передачи регулятора в автоматическом режиме с помощью инструмента *SISO Design Tool*, который обеспечивает выполнение требований задания к качеству переходного процесса;

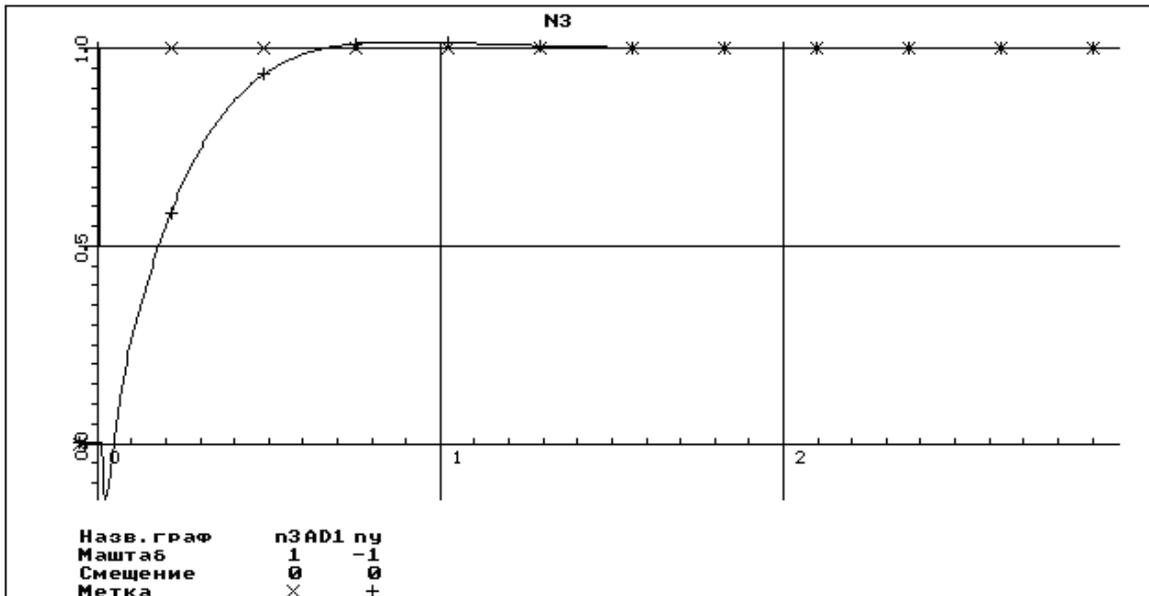


Рис. 4. Переходный процесс для режима $V=336.434$ м/с, $h=1000$ м

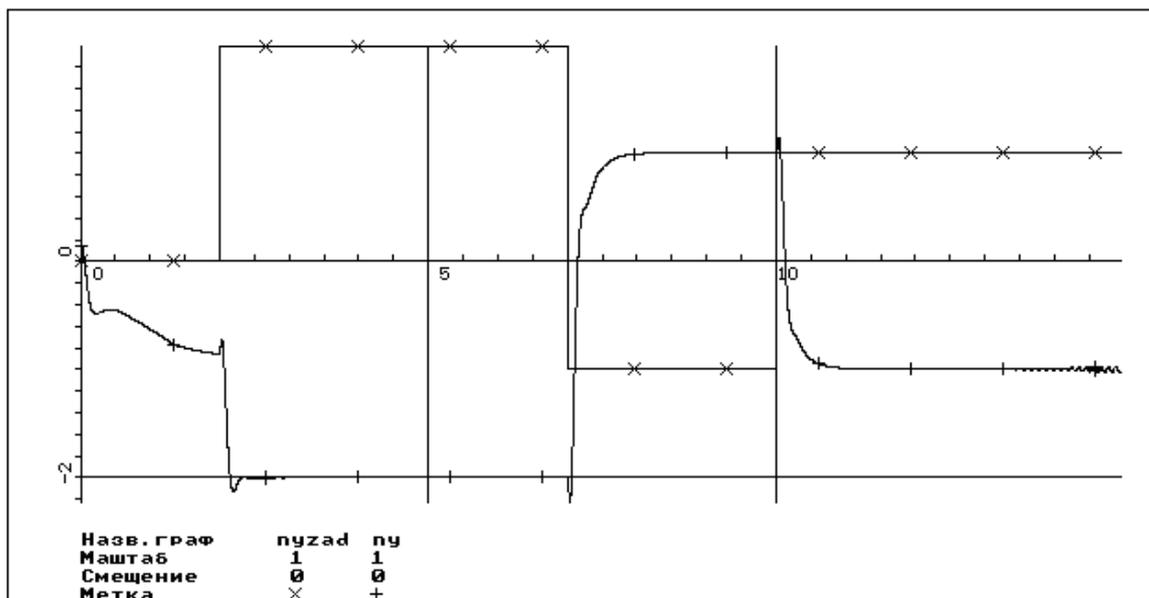


Рис. 5. Обработка управляющего сигнала по перегрузке

- получены формульные зависимости коэффициентов передачи, необходимые для алгоритма адаптации, с помощью разработанной программы, осуществляющей полиномиальную аппрок-

симацию. Вид переходных процессов обработки управляющей перегрузки в аналоговом прототипе КС с полученными коэффициентами передачи подтверждает работоспособность выбранных

структур по обеспечению устойчивости короткопериодического движения ЛА;

- составлены блок-схемы алгоритмов адаптации и стабилизации в соответствии со структурой контура стабилизации и результатами синтеза;
- разработаны модули рабочих программ в соответствии с блок-схемами АА и АС в среде *Borland C++ 6.0* на языке *C++*. Данные модули введены в цифровой комплекс моделирования. Для подтверждения работоспособности разработанных алгоритмов КС перегрузки проведе-

но математическое моделирование продольного движения ЛА на ЦКМ.

Из полученных результатов моделирования следует, что контур стабилизации перегрузки продольного канала ЛА обеспечивает качественную отработку заданных воздействий и устойчивость движения по заданной траектории.

Разработанный алгоритм регулятора КС перегрузки предполагается ввести в трехканальную систему стабилизации конкретного беспилотного ЛА.

Список литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. М.: Наука, 1975.
2. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. - М.: Наука, 1973.
3. Кузовков Н. Т. Системы стабилизации летательных аппаратов. М.: Высшая школа, 1976.
4. Лебедев А. А., Чернобровкин Л. С. Динамика полета. М.: Машиностроение, 1973.
5. Михалев И.А., Окоемов Б.Н. Системы автоматического управления самолетом. М.: Машиностроение, 1987.
6. Остославский И. В. Аэродинамика самолета. М.: Оборонгиз, 1957.
7. Топчеев Ю.И., Потемкин В. Г. Системы стабилизации. М.: Машиностроение, 1974.