

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДИРЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

В.Д. Елисеев, Е.Д. Ключев, К.В. Петрин, Е.Д. Теряев

Показана возможность повышения качества директорного управления динамическим объектом благодаря использованию дополнительной информации об отклонении штурвала.

Ключевые слова: директорное управление, штурвал, человек-оператор, самолет.

ВВЕДЕНИЕ

Директорное управление (ДУ) относится к полувеликому управлению, при котором командный сигнал, формируемый вычислителем на основе информации о заданном и текущем состояниях объекта, вызывает отклонение подвижной планки на директорном приборе (ДП) или марки на экранном индикаторе. Задача человека-оператора состоит в том, чтобы в процессе ручного управления свести это отклонение к нулю или к заданному значению [1–4]. В литературе по ДУ используются различные названия подвижного элемента ДП. В настоящей статье термины употребляются в соответствии с работой [4].

В авиации директорное управление применяется, как правило, при выводе самолета на заданную высоту, полете по маршруту, при заходе на посадку [4].

Обычно рекомендуется отклонять штурвал пропорционально смещению планки, т. е. летчик должен позиционировать штурвал без использования информации об ошибке отклонения от его требуемого положения [1, 2]. Однако такое позиционирование является наиболее сложным и приводит к большим ошибкам, напряженной работе летчика и возможной раскачке самолета [3].

Цель статьи заключается в исследовании возможности повышения качества ДУ благодаря использованию информации об отклонении штурвала. Повышение качества предполагает повышение точности управления, облегчение действий человека-оператора и уменьшение времени на его предварительную подготовку и приобретение опыта.

Директорное управление осуществлялось человеком-оператором на полунатурном стенде с реальным штурвалом и двумя компьютерами для моделирования движения самолета и визуализации отклонения планки без имитации инерционности датчиков и шумов измерений. Модели датчиков принимались идеальными, так как полоса пропускания каждого датчика значительно шире полосы пропускания контура управления. Влияние погрешностей датчиков на ДУ требует специального исследования. В рассматриваемых далее примерах помехозащищенность ДУ самолетом повышается благодаря исключению сигнала перегрузки, подаваемого на ДП. Информация об отклонении штурвала получалась с помощью потенциометрического датчика с присущими ему погрешностями.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИРЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ ПЕРЕГРУЗКОЙ САМОЛЕТА

При ДУ нормальной перегрузкой (рис. 1) повышение качества процессов отслеживания оператором заданных значений перегрузки может быть достигнуто путем использования информации о разном отклонении штурвала X_p . Для этого сигнал датчика отклонения штурвала D_x , несущий эту информацию, подается на ДП (рис. 2) [5]. В данном случае не требуется сигнал ошибки $(n_c - n_y)$, если коэффициент обратной связи $K_{n/x}$ по сигналу датчика D_x равен коэффициенту передачи СШУ. Это условие выполняется, когда СШУ астатическая [6] и в ней используется сигнал перегрузки [7].

При этом оператору надо выполнить наиболее простую для него задачу позиционирования штурвала [8]. Длительность переходного процесса по

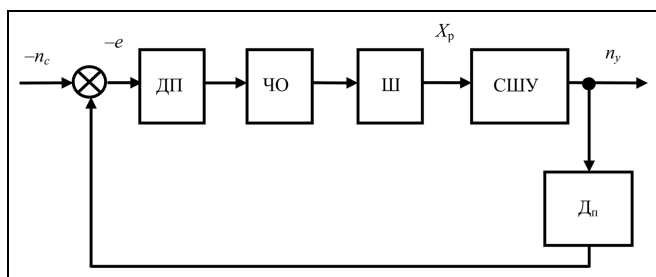


Рис. 1. Схема директорного управления нормальной перегрузкой самолета: n_c — заданное значение нормальной перегрузки; n_y — нормальная перегрузка самолета; ДП — директорный прибор; ЧО — человек-оператор (летчик); Ш — штурвал; $e = (n_c - n_y)$ — сигнал ошибки, вызывающий пропорциональное смещение планки на ДП; X_p — отклонение штурвала (ручки); СШУ — система штурвального управления нормальной перегрузкой, включающая в себя объект управления по перегрузке; D_n — датчик перегрузки

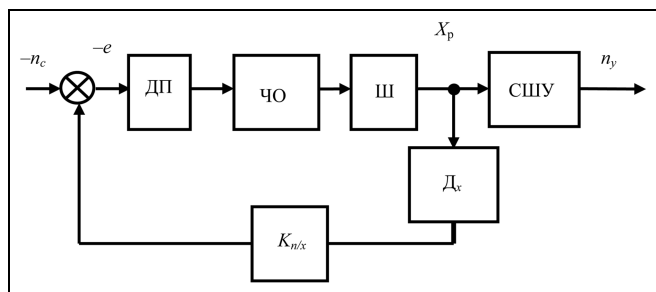


Рис. 2. Схема директорного управления нормальной перегрузкой с учетом информации о сигнале отклонения штурвала

перегрузке будет определяться длительностью выполнения этой задачи и длительностью реакции СШУ на отклонение штурвала. Алгоритм действий оператора таков, что он, отклоняя штурвал, ставит хорошо управляемую планку в нулевое положение и сохраняет положение штурвала, если заданное значение перегрузки постоянно. Если заданное значение перегрузки n_c переменное, то планка будет перемещаться, и оператору надо возвращать ее в нулевое положение отклонением штурвала.

Примеры переходных процессов отслеживания оператором при полунатурном моделировании заданных ступенчатых различных по амплитуде и знаку значений перегрузки n_c согласно схемам, представленным на рис. 1 и 2, приведены на рис. 3 и 4 соответственно. Показаны переходные процессы по перегрузке n_y , по отклонению штурвала X_p , по ошибке e на протяжении 100 с. Значения n_c и n_y регистрировались с масштабными коэффициентами, равными 1, отклонения штурвала X_p — с коэффициентом 0,2 и ошибки e — с коэффициентом 2,5.

Передаточная функция СШУ нормальной перегрузкой n_y принималась в виде

$$W_{n/x}(s) = -0,8/(s^2 + 8s + 8). \quad (1)$$

Это линейное звено второго порядка приближенно аппроксимирует динамику спроектированной астатической СШУ, удовлетворяющей тактико-техническим требованиям. Для установления факта влияния инерционности СШУ на качество ДУ высокая точность аппроксимации не требуется.

Сравнение процессов, представленных на рис. 3 и 4, где коэффициенты передачи СШУ и $K_{n/x}$ рав-

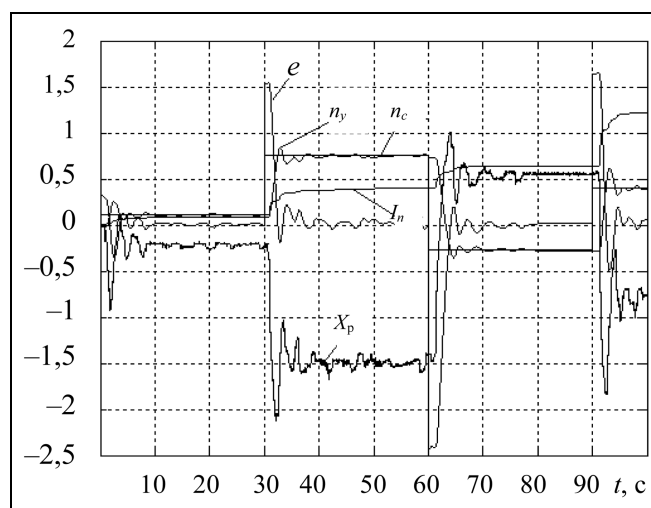


Рис. 3. Переходные процессы директорного управления нормальной перегрузкой; $e = n_c - n_y$

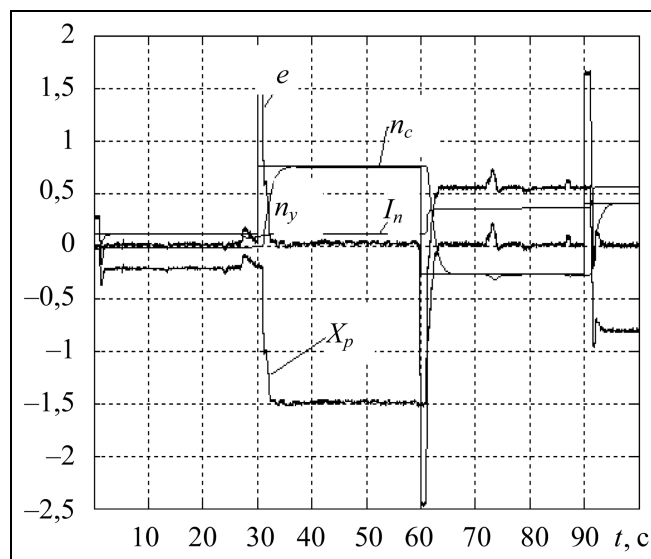


Рис. 4. Переходные процессы директорного управления нормальной перегрузкой; $e = n_c + X_p K_{n/x}$

ны ($K_{n/x} = -0,1$) согласно формуле (1), показывает, что при использовании сигнала X_p датчика отклонения штурвала процессы по ошибке e , перемещению X_p и перегрузке n_y плавные. Это объясняется тем, что контур управления, где присутствует человек-оператор, не содержит инерционную СШУ, и для оператора управление перемещением планки становится более легким и планка легко управляема. Отметим, что вместо сигнала отклонения штурвала можно использовать сигнал усилия на штурвале.

Облегчение действий человека-оператора при использовании сигнала отклонения штурвала может быть оценено с помощью интегральной квадратичной оценки скорости перемещения штурвала. Графики изменений интеграла от квадрата скорости перемещения штурвала на рис. 3 и 4 и обозначены через I_n . Значение скорости перемещения штурвала определялось с помощью дифференцирующего устройства с передаточной функцией вида $W(s) = s/(0,1s + 1)$ и регистрировалось с масштабным коэффициентом 0,05.

Из сравнения рис. 3 и 4 видно, что интегральная оценка в последнем случае примерно в два раза меньше. Это свидетельствует о меньшей напряженности в работе оператора при использовании сигнала отклонения штурвала вместо сигнала перегрузки.

Таким образом, стендовое исследование ДУ нормальной перегрузкой самолета показало возможность облегчения действий оператора (летчика) при введении сигнала отклонения штурвала в командный сигнал, подаваемый на ДП вместо сигнала перегрузки.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИРЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКОРОСТЬЮ САМОЛЕТА

Директорное управление вертикальной скоростью самолета по сравнению с ДУ нормальной перегрузкой существенно усложняется, поскольку тракт «отклонение штурвала — вертикальная ско-

рость содержит, кроме СШУ, еще и интегрирующее звено, и его передаточная функция имеет вид $W_{V_y/x}(s) = W_{n/x}(s)g/s$, где g — ускорение свободного падения, V_y — вертикальная скорость.

При ДУ вертикальной скоростью только по сигналу ошибки ($V_c - V_y$), где V_c — заданное значение вертикальной скорости, действия оператора сводятся к отклонению штурвала пропорционально этому командному сигналу [1—3]. Сложность обеспечения требуемой пропорциональности между перемещением планки ДП и отклонением штурвала отмечалась нами ранее.

В связи с недостатками ДУ только по сигналу ошибки далее будем также рассматривать и сравнивать варианты формирования командного сигнала с использованием дополнительной информации в виде сигнала нормальной перегрузки [4] или сигнала отклонения штурвала, как это делалось при управлении нормальной перегрузкой в § 1.

На рис. 5 представлена схема директорного управления вертикальной скоростью, на которой показаны дополнительные связи, которые могут облегчить процесс управления. Значение командного сигнала формируется в трех видах:

$$e = (V_c - V_y); \quad (2)$$

$$e = (V_c - V_y) - (1/K_v)n_y; \quad (3)$$

$$e = (V_c - V_y) - (K_{n/x}/K_v)X_p. \quad (4)$$

При нейтральном положении ключа реализуется сигнал вида (2), при нижнем — вида (3), при верхнем — вида (4). Предполагается, что передаточная функция датчика D_v вертикальной скорости V_y равна единице.

Из схемы (см. рис. 5) и формулы (3) видно, что оператору при дополнительном использовании обратной связи по перегрузке необходимо отслеживать переменное заданное значение нормальной перегрузки в виде $n_c = (V_c - V_y) K_v$, которое формируется во внешнем контуре. В этом случае во внутреннем контуре с обратной связью по перегрузке будет отсутствовать интегрирующее звено

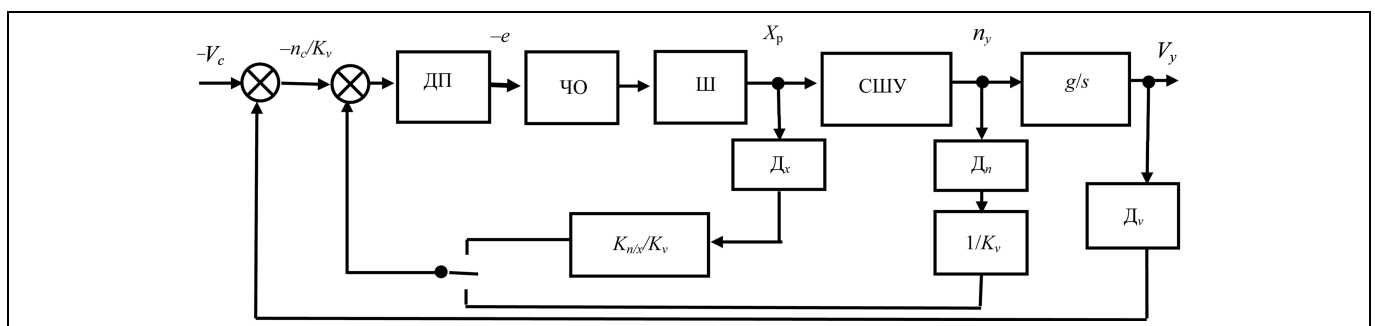


Рис. 5. Схема директорного управления вертикальной скоростью

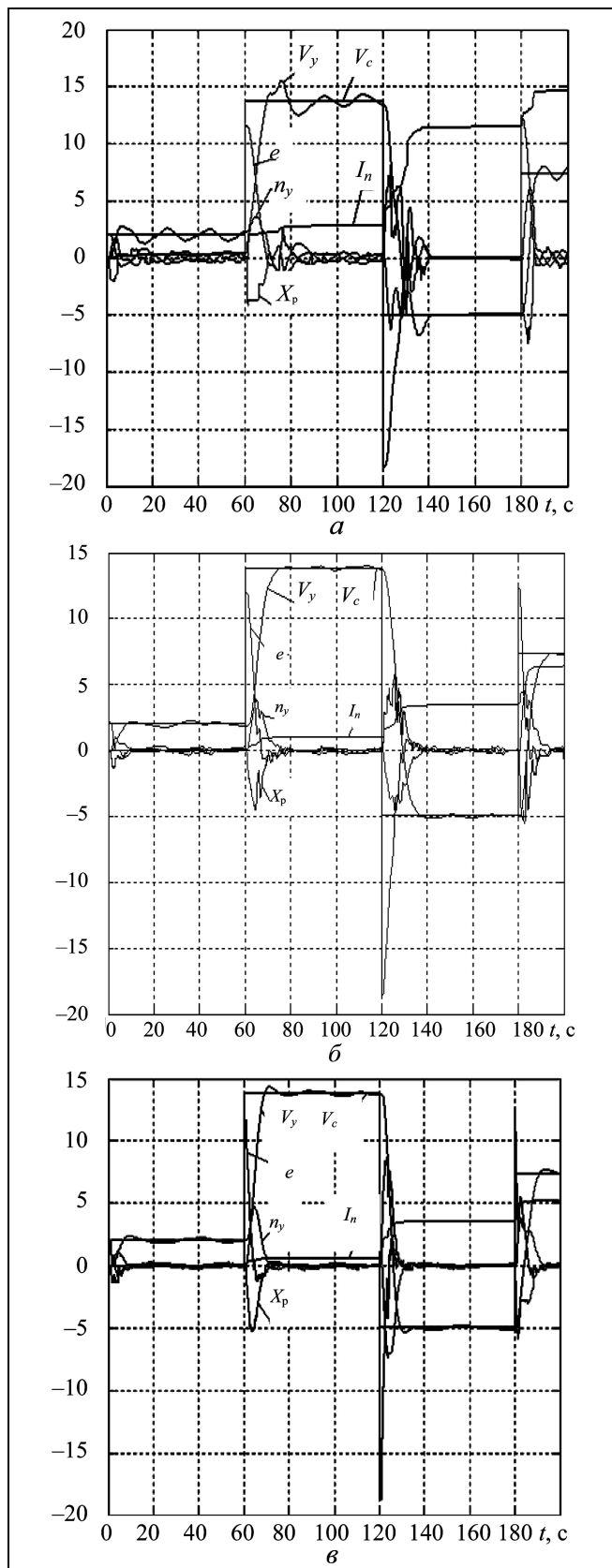


Рис. 6. Переходные процессы ДУ вертикальной скоростью; командный сигнал: а — вида (2); б — вида (3); в — вида (4)

объекта, что существенно облегчает работу оператора. Таким образом, задача сводится к более простой задаче отслеживания заданного значения перегрузки.

На рис. 6 приведены примеры процессов изменения вертикальной скорости V_y , ошибки e , нормальной перегрузки n_y , отклонения штурвала X_p и интегральной оценки I_n в соответствии с алгоритмами (2)–(4). Оператор отслеживает ступенчатые различные по амплитуде и знаку значения заданной вертикальной скорости V_c при отсутствии дополнительных сигналов (см. рис. 6, а), при использовании только дополнительного сигнала текущей перегрузки, подаваемого на ДП (см. рис. 6, б) с коэффициентом $K_v = 1/30$, при использовании дополнительного сигнала отклонения штурвала X_p , подаваемого на ДП с коэффициентом $K_{n/x}/K_v$ (см. рис. 6, в). Значения V_y , V_c , X_p и e регистрировались с коэффициентами, равными 1, n_y — с коэффициентом 9,8, а I_n — с коэффициентом 0,01.

При управлении только по сигналу ошибки (см. рис. 6, а) планка трудно управляема, так как отклонение штурвала опосредованно влияет на ее положение (через интеграл), что приводит к наибольшим ошибкам.

Как следует из сравнения процессов, представленных на рис. 6, а и б, использование дополнительного сигнала перегрузки в соответствии с формулой (3) приводит к существенному повышению точности отслеживания заданных значений вертикальной скорости. При этом интегральная оценка I_n квадрата скорости отклонения штурвала становится примерно в два раза меньше, что свидетельствует о снижении напряженности действий оператора и совпадает с оценкой самого оператора.

Исследования показали, что более высокое качество отслеживания заданных значений вертикальной скорости получается при использовании дополнительного сигнала отклонения штурвала (см. рис. 6, в) в соответствии с выражением (4). Алгоритм действий оператора становится наиболее простым и заключается в приведении планки на экране ДП в нулевое положение и удержании ее в этом положении. Следует иметь в виду, что она стремится смещаться при уменьшении разности $(V_c - V_y)$, которая входит как составляющая в сигнал, подаваемый на ДП.

На рис. 6, в приведена интегральная оценка I_n квадрата скорости перемещения штурвала, показывающая, что при использовании сигнала отклонения штурвала эта оценка уменьшается примерно на 30 % по сравнению с интегральной оценкой (см. рис. 6, б), когда использовался сигнал пере-

грузки. При этом процессы отслеживания вертикальной скорости менее длительные на 20–25 % при вхождении в 5 %-ю трубку.

Таким образом, исследование процессов ДУ вертикальной скоростью самолета показывает, что использование сигнала отклонения штурвала совместно с сигналом ошибки между заданной и текущей вертикальной скоростью позволяет ускорить переходные процессы и облегчить оператору процесс управления.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИРЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОТОЙ ПОЛЕТА САМОЛЕТА

Директорное управление высотой полета только по сигналу ошибки между заданным и текущим ее значениями создает для оператора чрезвычайно большие трудности, при приведении планки в нулевое положение [9]. Это связано с тем, что в тракт «отклонение штурвала — высота полета» входит, кроме СШУ, еще и два интегрирующих звена, и его передаточная функция имеет вид $W_{H/x}(s) = W_{n/x}(s)g/s^2$.

Для повышения точности и облегчения действий оператора как обычно необходимо учитывать вертикальную скорость, что позволяет свести задачу ДУ высотой к задаче отслеживания заданной переменной вертикальной скорости.

Для этого сформируем заданное значение вертикальной скорости V_c пропорционально ошибке между сигналами заданного значения высоты H_c и ее текущего значения H с коэффициентом пропорциональности K_H :

$$V_c = K_H(H_c - H). \quad (5)$$

Схема ДУ высотой полета приведена на рис. 7, которая содержит в качестве подсхемы схему ДУ вертикальной скоростью (см. рис. 5) по заданному значению V_c согласно формуле (5). Коэффициент

усиления сигнала ошибки по высоте K_H в полунатурных исследованиях был выбран равным 0,15.

На рис. 8 представлены примеры процессов ДУ при отслеживании оператором различных по амплитуде и знаку заданных значений высоты H_c в соответствии со схемой (см. рис. 7), когда не используются дополнительные сигналы (ключ в нейтральном положении) и когда используются отдельно сигнал n_y (ключ в нижнем положении) и сигнал X_p (ключ в верхнем положении). Показаны изменения текущей высоты H , вертикальной скорости V_y , нормальной перегрузки n_y , отклонения штурвала X_p и интегральной оценки скорости перемещения штурвала I_n .

Значения H_c и H регистрировались с коэффициентами 1, X_p — с коэффициентом 4, n_y — с коэффициентом 19,6, e — с коэффициентом 2, V_y — с коэффициентом 2 и I_n — с коэффициентом 0,01.

Сравнение процессов, представленных на рис. 8, показывает, что, как и в § 1 и 2, использование сигналов перегрузки и отклонения штурвала резко меняет качество управления, так как дает более быстрые и плавные процессы ДУ и существенно облегчает действия оператора. В частности, управление с использованием сигнала перегрузки уменьшает интегральную оценку I_n приблизительно в два раза по отношению к управлению, когда дополнительный сигнал не используется.

Процессы, представленные на рис. 8, в, показывают уменьшение длительности переходных процессов ДУ высотой полета при использовании сигнала отклонения штурвала вместо сигнала перегрузки примерно на 15–20 %, а также облегчение действий оператора, что следует из уменьшения интегральной оценки скорости отклонения штурвала I_n примерно в 3 раза по сравнению со случаем использования сигнала перегрузки.

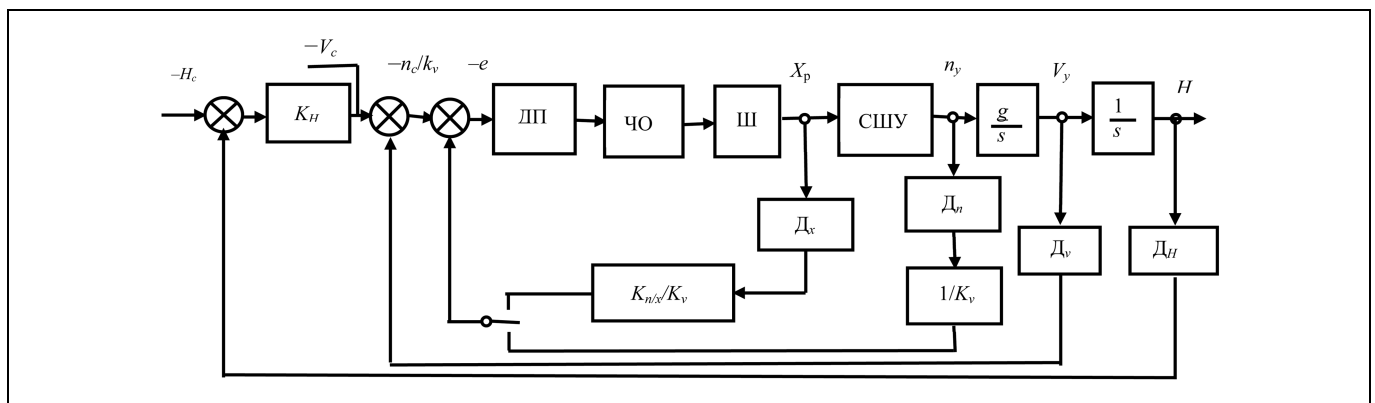


Рис. 7. Схема директорного управления высотой полета

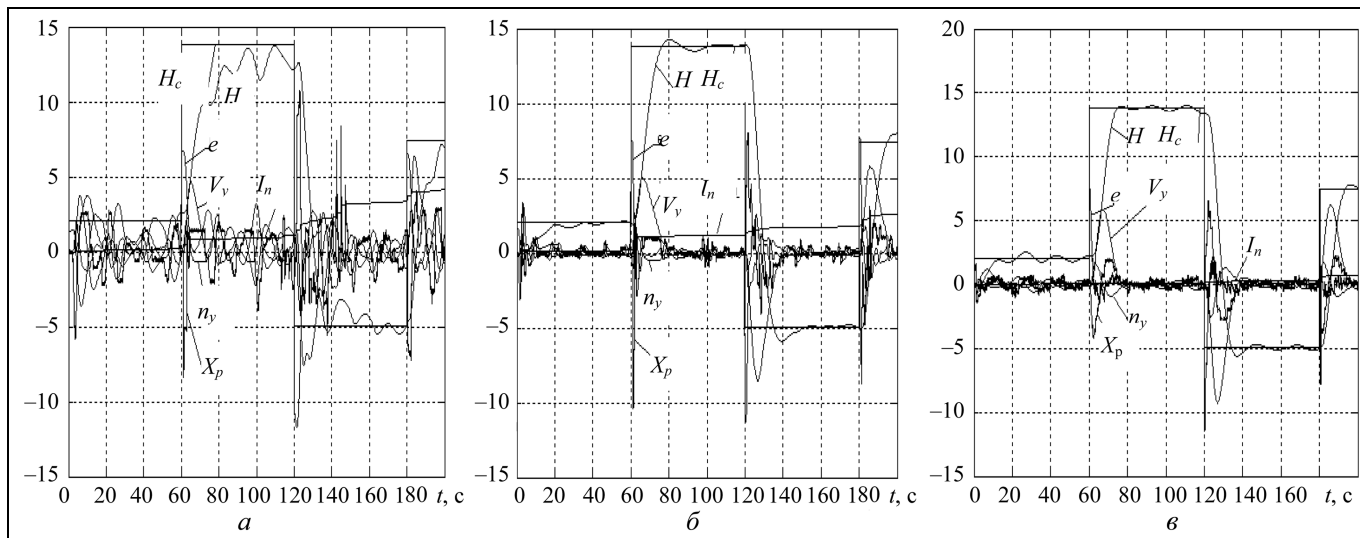


Рис. 8. Переходные процессы ДУ высотой: а — сигнал $e = (H_c - H)0,15 - V_y$; б — сигнал $e = (H_c - H)0,15 - V_y - K n_y (K = 30)$; в — сигнал $e = (H_c - H)0,15 - V_y + K X_p (K = 3)$

Таким образом, исследование процессов ДУ высотой полета самолета показывает, что дополнительное использование сигналов перегрузки и отклонения штурвала помимо сигнала ошибки между заданной и текущей высотой полета и сигнала вертикальной скорости, позволяет ускорить переходные процессы и одновременно облегчить оператору процесс управления. Использование сигнала отклонения штурвала дает более высокое качество процессов управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований установлено, что:

— динамическое качество директорного управления динамическим объектом может быть повышено при дополнительном использовании сигналов отклонений штурвала;

— директорное управление сложным динамическим объектом с сигналом отклонения штурвала сводится к простой задаче позиционирования штурвала;

— при директорном управлении нормальной перегрузкой, вертикальной скоростью и высотой полета самолета целесообразно использовать в командном сигнале вместо сигнала текущей перегрузки сигнал отклонения штурвала. При этом сигнал перегрузки необходим лишь для обеспечения астатизма системы штурвального управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. — М.: Наука, 1973. — 560 с.

2. Михалев И.А., Окоемов Б.Н., Чукулаев М.С. Системы автоматической посадки. — М.: Машиностроение, 1975. — 216 с.
3. Практическая аэродинамика маневренных самолетов. Учебник для летного состава / Под ред. Н.М. Лысенко. — М.: Воениздат, 1977. — 439 с.
4. Эргатические интегрированные комплексы летательных аппаратов / Под ред. М.М. Сильвестрова. — М.: Филиал Воениздата, 2007. — 510 с.
5. Елисеев В.Д., Похваленский В.Л., Ключев Е.Д. О способах директорного управления динамическим объектом // Тр. XVIII междунар. науч.-техн. семинара. «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации», сентябрь 2009 г., г. Алушта. — М., 2009.
6. Елисеев В.Д., Ключев Е.Д. Директорное управление продольным движением самолета с астатической системой управления нормальной перегрузкой // Тр. XIX междунар. науч. техн. семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации», сентябрь 2010 г., г. Алушта. — М., 2010. — С. 173—174.
7. Михалев И.А., Окоемов Б.Н., Чукулаев М.С. Системы автоматического управления самолетом. — М.: Машиностроение, 1987. — 240 с.
8. Разработка и исследование модели действий летчика при позиционировании ручки управления самолетом / Ю.Г. Оболенский и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2004. — № 5. — С. 70—77.
9. Микоян С.А., Корбут А.Г. Заход на посадку по приборам. — М.: Воен. изд-во Минобороны СССР, 1979. — 80 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Елисеев Валерий Дмитриевич — канд. техн. наук, науч. сотрудник, ✉ k301ter@mail.ru,

Ключев Евгений Дмитриевич — науч. сотрудник,

Петрин Константин Васильевич — ст. науч. сотрудник, ✉ kpetrin@yandex.ru,

Теряев Евгений Дмитриевич — чл.-корр. РАН, гл. науч. сотрудник,

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва.