

УДК 629.735.33.015.017.28

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАГРУЗКИ РЫЧАГА УПРАВЛЕНИЯ НА ДИНАМИКУ СИСТЕМЫ САМОЛЕТ-ЛЕТЧИК

Л.Е. Зайчик

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского
Российская Федерация, 140180, Московская область, Жуковский, ул. Жуковского, 1
E-mail: zaichik@tsagi.ru

К.Н. Гринев

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского
Российская Федерация, 140180, Московская область, Жуковский, ул. Жуковского, 1
E-mail: kirill_grinev@mail.ru

П.А. Десятник

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского
Российская Федерация, 140180, Московская область, Жуковский, ул. Жуковского, 1
E-mail: desiatnik_pavel@mail.ru

Д.К. Крылов

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского
Российская Федерация, 140180, Московская область, Жуковский, ул. Жуковского, 1
E-mail: ttut6@mail.ru

Ключевые слова: система загрузки, рычаги управления, градиент загрузки, демпфирование, модель летчика, система рука рычаг.

Аннотация: Представлены данные экспериментальных исследований влияния характеристик загрузки рычага управления (градиент загрузки, демпфирование) на параметры модели летчика. Дан анализ частотных характеристик модели летчика, идентифицированных в задаче компенсаторного слежения по крену, который показал чувствительность модели нейромышечной системы к изменению градиента загрузки. Благодаря этому, частота среза разомкнутой системы рука-рычаг остается постоянной для градиентов загрузки, оцениваемых летчиками как оптимальные. Демпфирование загрузки не оказывает какого-либо заметного влияния на частотные характеристики системы рука-рычаг.

1. Введение

Разработанный теоретический подход к выбору оптимальных величин характеристик управляемости и загрузки рычага управления (РУ) является мощным инструментом, объединяющим динамические свойства самолета, характеристики чувствительности управления и характеристики загрузки РУ [1]. Однако он основан на субъективных оценках летчика управляемости самолета. Объективных данных, подтверждающих оптимальность этих характеристик, пока не существует. В настоящее время модели летчика широко и успешно применяются для объективной оценки пилотажных свойств самолета [2, 3]. Модели летчика описывают действия летчика, которые осуществляются через рычаг управления. Естественно предположить, что характеристики загрузки РУ влияют на динамику системы самолет-летчик и

управляющие действия летчика, что может отразиться на изменении модели летчика. Данная работа направлена на определение влияния характеристик загрузки на модель летчика и ее составных компонентов и определение объективных доказательств оптимальности выбираемых летчиками характеристик загрузки.

2. Методика эксперимента

Целью экспериментальных исследований являлось определение влияния градиента загрузки и демпфирования РУ на параметры модели летчика.

Работа проводилась на пилотажном стенде ПСПК-102 ЦАГИ. Рассматривались два типа РУ: штурвал и боковая ручка управления (БРУ). Движение рычага управления под воздействием усилий от летчика воспроизводилось с помощью электромеханической системы загрузки в соответствии с уравнением:

$$(1) \quad m\ddot{X} + P^x\dot{X} + P^xX + P_0\text{sign}(X) + P_{\text{тр}}\text{sign}(\dot{X}) = P_{\text{л}}$$

В экспериментах варьировался градиент загрузки P^x и демпфирование P^x ; масса РУ, предварительный затяг и трение в экспериментах не изменялись ($P_0 = P_{\text{мп}} = 0$).

В экспериментах участвовали 3 оператора и 2 летчика-испытателя.

Идентификация параметров модели летчика производилась в задаче компенсаторного слежения за визуальной ошибкой по крену. Структура модели летчика в задаче компенсаторного слежения представлена на рис. 1. Для идентификации всех подсистем модели летчика (центральной нервной системы Y_{cns} , системы рука-рычаг Y_{lm}) дополнительно к визуальному входному сигналу $i(t)$ вводился входной сигнал по усилию $f(t)$ (спектры этих сигналов были различны).

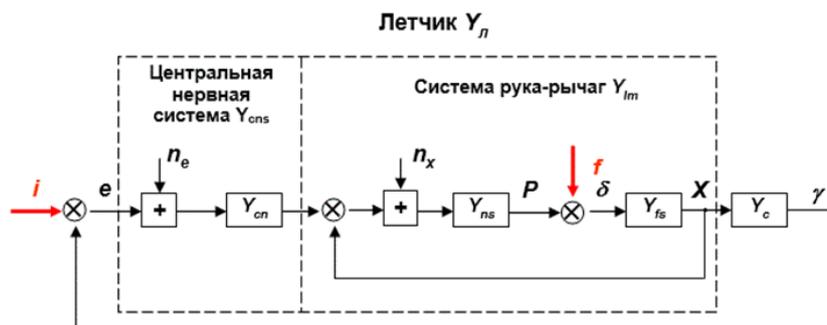


Рис. 1. Структура модели летчика в задаче компенсаторного слежения по крену.

Идентификация частотных характеристик различных компонент модели летчика проводилась по специально разработанной программе, основанной на методе преобразования Фурье. Пример полученных частотных характеристик приведен на рис. 2.

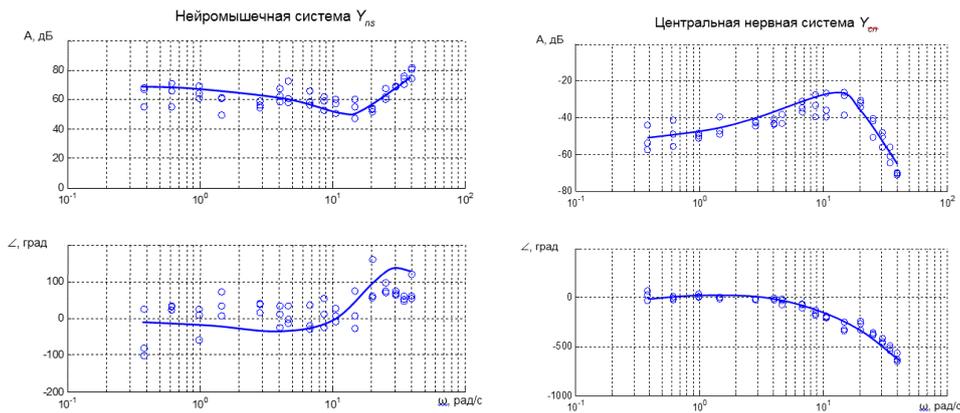


Рис. 2. Пример идентифицированных частотных характеристик различных компонент модели летчика (осредненная линия показана синим цветом).

3. Анализ полученных результатов

1. *Центральная нервная система и модель летчика в целом.* Из частотных характеристик следует, что модель летчика полностью определяется видом частотной характеристики центральной нервной системы, которая характеризуется наличием двух пиков на частотах в районе 6-8 рад/с и 18-20 рад/с, обусловленных работой системы рука-рычаг:

$$(2) \quad Y_{cns}(s) = Ke^{-s\tau} \frac{T_1s+1}{T_2s+1} \cdot \frac{1}{T_3^2s^2+2\zeta_3T_3s+1} \cdot \frac{1}{T_4^2s^2+2\zeta_4T_4s+1},$$

где: τ , T_1 , T_2 – определяют работу центральной нервной системы по отслеживанию входного визуального сигнала; T_3 , T_4 , ζ_3 , ζ_4 – определяют работу системы рука-рычаг.

2. *Нейромышечная система.* Вид частотной характеристики нейромышечной системы модели летчика одинаков и для различных типов РУ, и для различных величин градиента загрузки и демпфирования (рис. 3), и аналогичен полученным ранее в других работах [4]. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) имеет выраженный провал на частотах резонансного пика в частотной характеристике системы загрузки (между 6 и 25 рад/с). С увеличением P^x глубина этого провала увеличивается. Другими словами, нейромышечная система компенсирует резонансный пик в системе загрузки, возрастающий с увеличением градиента.

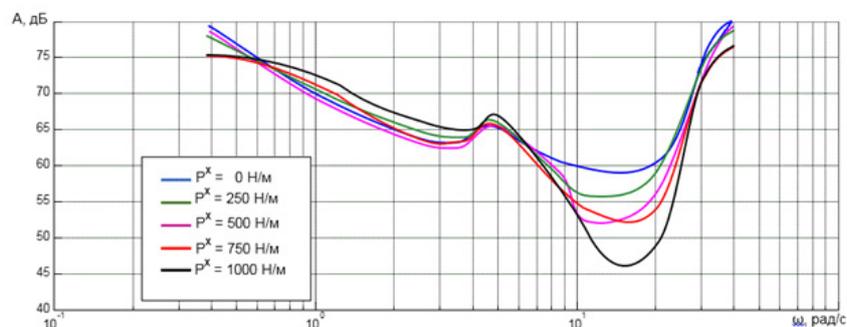


Рис. 3. Осредненные частотные характеристики нейромышечной системы в зависимости от градиента загрузки РУ (боковая ручка управления).

Как видно из рис. 4, изменение демпфирования загрузки не оказывает какого-либо заметного регулярного влияния на поведение АЧХ нейромышечной системы ни в

районе провала, ни на других частотах. Другими словами, адаптации к изменению демпфирования загрузки в системе рука-рычаг не наблюдается.

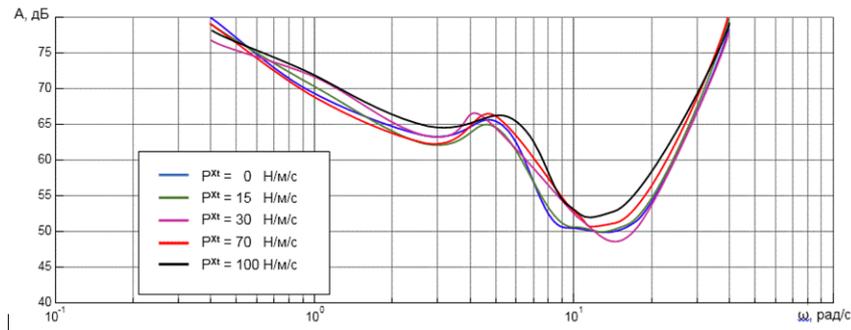


Рис. 4. Осредненные частотные характеристики нейромышечной системы в зависимости от демпфирования загрузки РУ (боковая ручка управления).

3. *Разомкнутая система рука-рычаг.* На рис. 5 приведено изменение частоты среза разомкнутой системы рука-рычаг (ω_m) в зависимости от градиента загрузки. Видно, что существует некоторый диапазон градиентов загрузки, для которых частота среза системы рука-рычаг остается постоянной. Этот диапазон изменения градиента загрузки соответствует наилучшим оценкам летчика.

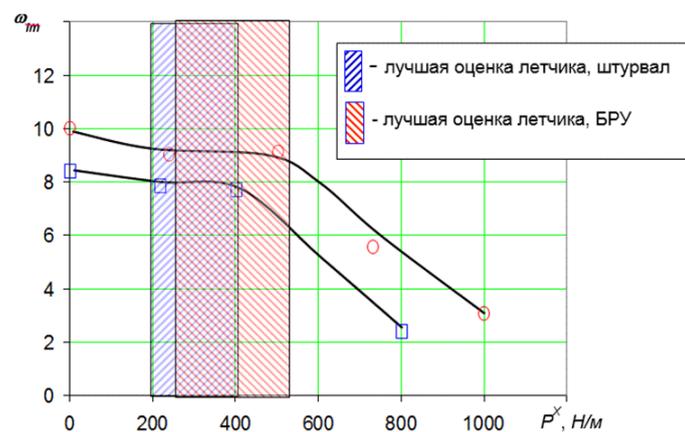


Рис. 5. Частота среза разомкнутой системы рука-рычаг в зависимости от градиента загрузки штурвала и БРУ.

При увеличении градиента сверх этого диапазона адаптационные возможности нейромышечной системы снижаются, и частота среза системы рука-рычаг начинает уменьшаться. При уменьшении градиента загрузки летчику легче создавать движения с большим коэффициентом усиления и, поэтому, частота среза увеличивается. Тем не менее, летчики негативно оценивают рычаг управления с облегченной загрузкой, т.к. ослабевает обратная связь по усилию.

Из рис. 6 видно, что с увеличением демпфирования, начиная с некоторого значения, частота среза остается постоянной, что подтверждает вывод о том, что демпфирование загрузки в рассмотренных пределах не приводит к заметному увеличению общих усилий на рычаге. Величину демпфирования, начиная с которого частота среза остается постоянной, можно считать минимально необходимой для данного градиента загрузки для обеспечения наилучших оценок летчика. Максимально

допустимую величину демпфирования необходимо выбирать из соображений предотвращения возникновения высокочастотных колебаний в системе самолет-летчик.

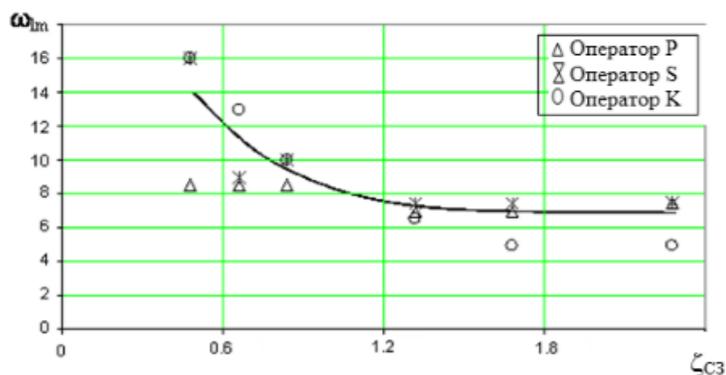


Рис. 6. Частота среза разомкнутой системы рука-рычаг в зависимости от относительного демпфирования БРУ ($P^x=500$ Н/м).

4. Заключение

Учет системы рука-рычаг в модели летчика вносит существенные изменения в общепринятый вид передаточной функции центральной нервной системы и модели летчика в целом.

Все выявленные закономерности в качественном отношении одинаковы для штурвала и боковой ручки управления.

Для диапазона градиентов загрузки, соответствующего наилучшим оценкам летчика, частота среза системы рука-рычаг остается постоянной.

Величину демпфирования, начиная с которой частота среза системы рука-рычаг остается постоянной, можно считать минимально необходимой для данного градиента загрузки для обеспечения наилучших оценок летчика.

Список литературы

1. Rodchenko V.V., Zaichik L.E., Yashin Y.P. Similarity criteria for manipulator loading and control sensitivity characteristics // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 1998. Vol. 21, No. 2. P. 307-314.
2. Neal T.P., Smith, R.E. Development of a flying qualities criterion for the design of fighter flight control systems // AIAA. 1970. P. 70-927.
3. Hess R.A. Prediction of pilot opinion rating using an optimal pilot model // Human Factors. 1977. Vol. 19, No. 5.
4. van Paassen M.M., van der Vaart J.C., Mulder J.A. Model of the neuromuscular dynamics of the human pilot's arm // Journal of Aircraft 2004. Vol. 41, No. 6.