

УДК 629.7

ПАССИВНЫЕ И АКТИВНЫЕ СРЕДСТВА ПОДАВЛЕНИЯ ЯВЛЕНИЯ РАСКАЧКИ САМОЛЕТА ЛЕТЧИКОМ

А.В. Ефремов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4
E-mail: pvl@mai.ru

Е.В. Ефремов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4
E-mail: pvl@mai.ru

А.И. Щербаков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4
E-mail: pvl@mai.ru

Ключевые слова: раскачка самолета летчиком, активный рычаг управления, префильтр, ограничитель скорости отклонения рулевых поверхностей.

Аннотация: В работе приводится классификация средств подавления явления раскачки самолета летчиком. Рассматривается несколько таких средств, относящихся как к активным, так и к пассивным средствам. Приводится сравнительная оценка эффективности их использования, а также целесообразность их интеграции с активными боковыми рычагами управления, формирующими управляющий сигнал пропорционально усилиям, прикладываемым летчиком к рычагу. Исследования выполнены на пилотажном стенде МАИ.

1. Введение

Высокий уровень автоматизации современных самолетов позволяет существенно изменить их динамику, тем самым обеспечивая наилучшие пилотажные характеристики. Как следствие, это приводит к увеличению скорости отклонения рулевых поверхностей. Ограниченные возможности исполнительных механизмов могут стать причиной ухудшения гармонизации действий летчика и реакции самолета и, как следствие, возникновения явления раскачки самолета летчиком (PIO) категории 2 [1]. В некоторых случаях их возникновение приводит к авиационным происшествиям. Подавление такого явления может быть реализовано различными способами. Их можно разделить на две группы: пассивные и активные.

К первой группе относятся различные префильтры, фильтры, ограничители. Они ограничивают скорость управляющего сигнала от летчика (например, «традиционный» нелинейный префильтр [2,3]) или от входного сигнала исполнительного устройства (фильтр «Feedback-with-bypass» [4]).

Вторая группа средств для подавления PIO предполагает ограничение скорости перемещения рычага, путем динамического регулирования жесткости с использованием сигналов обратной связи. В качестве рычага, реализующего такое

регулирование, используется активный рычаг с функцией SAFE-CUE (Smart Adaptive Flight Effective).

Настоящая работа посвящена оценке эффективности использования различных средств подавления явления РЮ

2. Пассивные средства подавления явления РЮ

В настоящей работе рассматриваются нелинейный ограничитель скорости отклонения рулевых поверхностей, разработанный фирмой SAAB «Feedback-with-bypass» [4] и его модификация, разработанная в Московском авиационном институте [5]. Их структурные схемы приведены на рисунках 1 и 2.

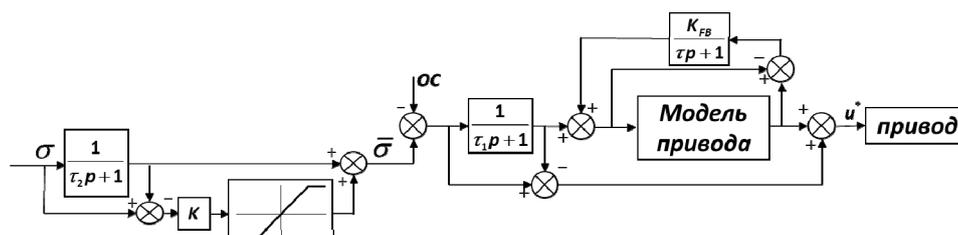


Рис. 1. Нелинейный ограничитель скорости отклонения привода «Feedback-with-bypass».

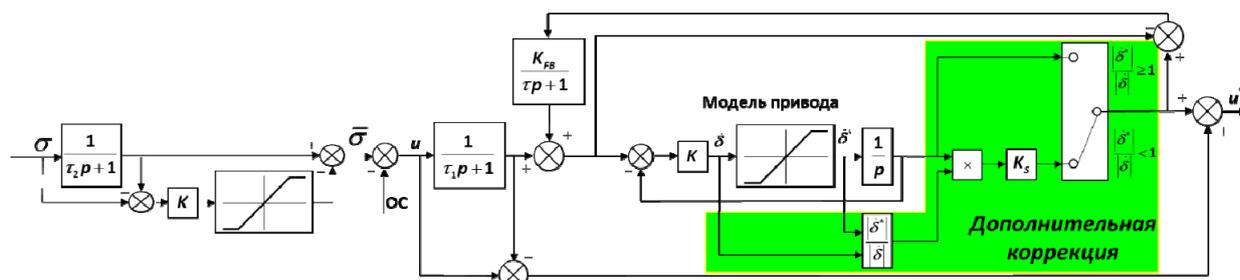


Рис. 2. Модифицированный нелинейный ограничитель скорости отклонения привода МАИ.

На рис. 1 и 2 «ОС» – сигналы обратных связей, σ – сигнал, пропорциональный управляющим действиям летчика u – сигнал, поступающий на модель привода.

Оба ограничителя имеют две подсистемы, которые реализуют фазовое опережение в области средних и высоких частот, тем самым компенсируя запаздывание, реализуемое моделью привода, а также подсистему, которая предварительно ограничивает скорость управляющего сигнала от летчика. Модификация МАИ предполагает введение еще одной подсистемы, которая сравнивает требуемую $\dot{\delta}$ и располагаемую $\dot{\delta}^*$ скорости сигнала, поступающую на модель привода. В случае, когда $\dot{\delta}$ превышает $\dot{\delta}^*$, сигнал, поступающий на привод, уменьшается пропорционально их отношению.

Сравнительная оценка эффективности использования ограничителя «Feedback-with-bypass» и его модификации в задаче точного отслеживания угла тангажа проводилась для предельных скоростей привода 30 град/с и 15 град/с. Исследования проводились с использованием центрального и бокового рычага управления, выполняющих функции неактивного рычага (управление пропорционально перемещению – рычаг типа DSC) и активного рычага (управление пропорционально усилиям – рычаг типа FSC). В качестве объекта управления использовался статически

неустойчивый самолет, который средствами автоматизации был приведен в соответствие к динамике, соответствующей первому уровню пилотажных характеристик.

Исследования показали, что модифицированный ограничитель по сравнению с «Feedback-with-bypass» позволяет добиться лучшей точности пилотирования. Например, при использовании бокового рычага типа DSC $\dot{\delta}_{\max} = 30$ град/с в этом случае дисперсия ошибки меньше в 1.4 раза, а при 15 град/с – в 1.2. Наилучшим вариантом с точки зрения точности пилотирования и подавления явления РЮ является использование модифицированного ограничителя совместно с боковым рычагом типа FSC. При переходе от традиционного принципа управления центральным рычагом типа DSC при отсутствии каких либо ограничителей и префильтров к принципу, предполагающему использование бокового рычага типа FSC и модифицированного ограничителя, точность пилотирования улучшается в 1.6 и 2.2 раза при $\dot{\delta}_{\max} = 30$ град/с и 30 град/с соответственно.

3. Активные средства подавления явления РЮ

В настоящей работе рассматриваются три принципа реализации динамической регулировки жесткости:

- 1) Регулировка жесткости пропорционально скорости отклонения рычага [6] (см. рис. 3).
- 2) Регулирование жесткости пропорционально разнице между угловой скоростью тангажа самолета ω_z и его эталонной математической модели ω_z^* [7] (см. рис. 4).
- 3) Одновременная регулировка жесткости, пропорциональная скорости отклонения рычага и угловой скорости тангажа рассматриваемого самолета и эталонной динамики (совместная регулировка) (см. рис. 5).

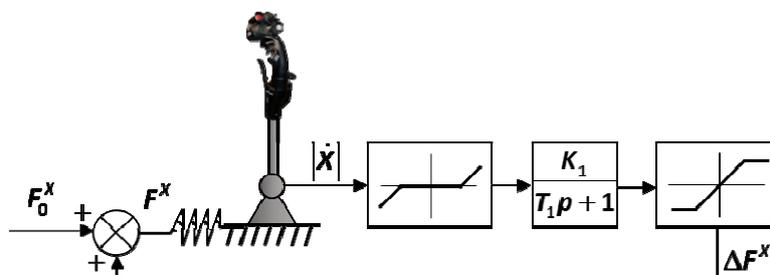


Рис. 3. Схема реализации динамической регулировки жесткости пропорционально скорости перемещения рычага.

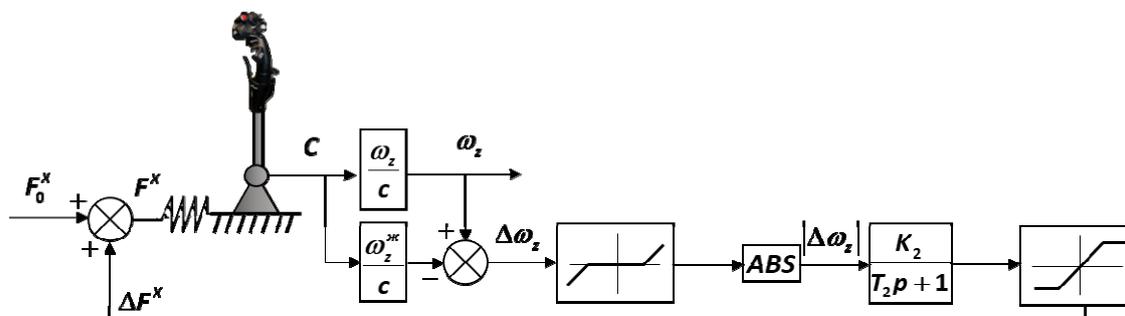


Рис. 4. Схема реализации динамической регулировки жесткости пропорционально разнице угловых скоростей.

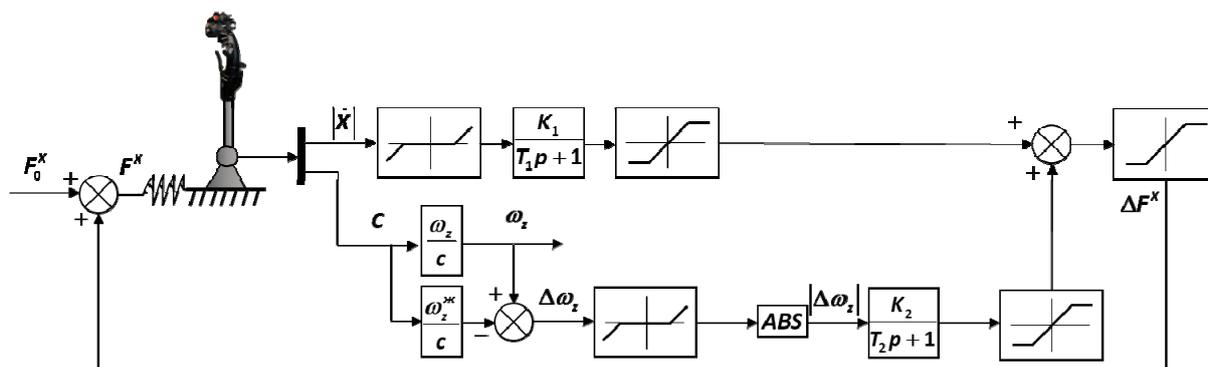


Рис. 5. Схема реализации совместной регулировке жесткости.

На рис. 3, 4, 5 c – управляющий сигнал от летчика, пропорциональный перемещению рычага или прикладываемым к нему усилиям, $|\dot{X}|$ – модуль скорости перемещения рычага, F^X – жесткость рычага

Для сравнительной оценки эффективности указанных принципов были проведены три серии экспериментов:

- 1) в стационарных условиях при управлении элементом, динамика которого соответствует 3-му уровню пилотажных характеристик;
- 2) в условиях, когда в процессе эксперимента резко снижается ограничение на максимальную скорость отклонения рулевых поверхностей при управлении объектом, динамика которого соответствовала 1 уровню пилотажных характеристик;
- 3) в условиях, когда динамика объекта управления в процессе эксперимента резко изменялась, переходя от динамики, соответствующей первому уровню пилотажных характеристик, к динамике, соответствующей третьему уровню пилотажных характеристик.

Эксперименты проводились для двух типов рычага управления и двух типов управляющего сигнала, передаваемых от рычага к системе управления, как в исследованиях пассивных средств подавления РЮ. Использовалась такая же динамика объекта управления. Его динамика была преобразована из конфигурации первого уровня в конфигурацию третьего уровня с помощью соответствующего изменения параметров системы управления.

Результаты первой серии экспериментальных исследований показали, что все три варианта динамической регулировки жесткости приводят к повышению точности пилотирования. Например, дисперсия сигнала ошибки уменьшается в 2,3 раза при переходе от центрального неактивного рычага управления к боковому рычагу с функцией FSC и совместной регулировкой жесткости.

Во 2-й и 3-й сериях экспериментов расходящиеся колебания (явление РЮ) наблюдались при использовании рычагов без регулировки жесткости. Результаты показали, что все три принципа регулировки жесткости могут предотвратить РЮ. Наиболее эффективным вариантом, обеспечивающим наименьшую дисперсию сигнала ошибки, как во 2-й, так и в 3-й серии, является использование бокового рычага с функцией FSC и совместной регулировкой жесткости.

4. Заключение

В настоящей работе был выполнен сравнительный анализ различных средств подавления явления раскачки самолета летчиком. Показано, что наиболее эффективное использование как пассивных средств подавления, так и активных обеспечивается при

их совместном использовании с боковым рычагом управления, формирующем управляющий сигнал пропорционально прикладываемым к рычагу усилиям.

Список литературы

1. McRuer D.T., et al. Aviation Safety and Pilot Control: On the Effects of Aircraft Pilot Coupling on Flight Safety. Washington D.C.: National Academy Press, 1997. 220 p.
2. Оболенский Ю.Г. Системы управления самолетами «ОКБ имени А.И.Микояна». Идеология построения, история, развитие. М.: Радис-РРЛ, 2021. Т. II. С. 313-314.
3. Бюшгенс Г.С.. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов. Наука, 1998. 703 с.
4. Rundqwist L. Rate limiters with phase compensation. Saab Military Aircraft. S-581 88 Linkoping, Sweden, 1996.
5. Efremov A.V., Efremov E.V., Tiaglik M.S., Irgaleev I.Kh, Shcherbakov A.I., Mbikayi Z. Adaptive flight control system for flight safety improvement in reentry and other high-velocity vehicles // Acta Astronautica. 2022. Vol. 204. P. 900-911.
6. Ефремов А.В. Применение методов исследований системы самолет-летчик для оптимизации пилотажных свойств и снижения вероятности появления аварийных ситуаций // Авиакосмическое приборостроение. 2007. № 7. С. 11-21.
7. Lampton A.K., Klyde D.H., Lee D.C., Schulze P.C. Preliminary Evaluation of the SAFE-Cue Warning Display for Loss of Control Mitigation // AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Kissimmee, Florida. 2015. P. 1-15.