

Р. Р. Абдулин, канд. техн. наук, зам. Управляющего директора — главный конструктор, abdulin@mnprk.ru,
Д. С. Тимофеев, канд. техн. наук, нач. сектора, tds@mnprk.ru,
А. А. Кравченко, нач. сектора, kravchenko@mnprk.ru,
Н. В. Крылов, канд. техн. наук, вед. инженер-конструктор, artsunday@mail.ru,
АО Московский научно-производственный комплекс "АВИОНИКА" имени О. В. Успенского, г. Москва,
С. Л. Самсонович, д-р техн. наук, проф., samsonovich40@mail.ru,
Н. Б. Рожнин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., rozhnin@yandex.ru,
А. П. Ларин, ст. преподаватель, aplarin@rambler.ru,
М. А. Макарин, канд. техн. наук, ассистент, mikhailmakarin@gmail.com,
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва

О кинематических и энергетических характеристиках активной безрамочной ручки управления самолетом

Статья посвящена актуальной теме построения малогабаритной активной боковой ручки управления (БРУ) летательным аппаратом и выявлению параметров, влияющих на ее характеристики потребления энергии. Проведен анализ структурных закономерностей построения кинематических схем активных БРУ. Анализ свидетельствует, что недостатком известных рамочных конструкций помимо больших габаритных размеров является различие динамических характеристик каналов при использовании одинаковых исполнительных механизмов приводов, так как масса исполнительного механизма привода, закрепленного на рамке, является нагрузкой для исполнительного механизма привода, закрепленного на неподвижном основании. По результатам анализа проведен синтез построения активной БРУ на основе использования кинематических пар, имеющих одну степень подвижности. Применены шарнирные механизмы, преобразующие вращательное движение входного звена (выходного вала исполнительного механизма привода) в качательные движения выходного звена (рукоятки БРУ) в одной плоскости. При использовании двух таких механизмов, у которых их звенья расположены перпендикулярно и соединены между собой рычагом через одноподвижные вращательные пары, получена кинематическая схема с двумя степенями подвижности. В результате предложена кинематическая схема активной БРУ, не использующая рамку. Безрамочная схема содержит два одинаковых исполнительных механизма приводов, закрепленных на неподвижном основании, при этом взаимовлияние каналов исключено. Приведен вывод передаточного числа механизма между углом поворота выходного вала исполнительного механизма и углом отклонения рукоятки. Показано, что зависимость имеет синусоидальный характер и в диапазоне рабочих углов рукоятки близка к линейной. Приведены результаты параметрического синтеза исполнительного механизма электромеханического привода БРУ, позволяющего определить минимальную мощность электродвигателя и передаточное число редуктора, обеспечивающие требуемые значения момента и скорости на выходном звене исполнительного механизма. В результате исследования специфических режимов работы активной БРУ показано, что мощность электродвигателя зависит от требуемых значений максимальной скорости перемещения рукоятки пилотом и прилагаемого к ней усилия, а также от момента инерции рукоятки.

Ключевые слова: активная боковая ручка управления летательным аппаратом, кинематическая схема с двумя степенями подвижности, исполнительный механизм привода, параметрический синтез

Введение

Управление пилотируемыми летательными аппаратами (ЛА) невозможно без ручных органов управления. Современные тенденции развития ручных органов управления направлены на создание миниатюрных механизмов управления вместо традиционных штурвалов и центральных ручек управления.

Механизм управления представляет собой устройство, подобное джойстику, имеющему две степени подвижности, которое в самолете размещается справа или слева от кресла пилота в зависимости от компоновки кабины. Такое расположение органов управления обусловило их название — боковые ручки управления (БРУ).

Впервые БРУ появились на военных самолетах с электродистанционной системой управления, что было связано с необходимостью размещения пилота в кресле под углом до 65° к вертикали для улучшения переносимости больших перегрузок, а это, в свою очередь, потребовало смещения органа управления в сторону.

Применение БРУ по сравнению с другими органами управления позволяет улучшить эргономику кабины, видимость панели приборов, упрощает доступ к рабочему месту пилота. Эти достоинства послужили основанием для их использования и в гражданской авиации.

Известны БРУ, которые используются в самолетах *Airbus A-320*, *General Dynamics F-16*, *Lockheed Martin F-35*, *Dassault Rafale*, *Gulfstream G500*,

Bombardier CS300, MC-21 и других. Проведенный анализ схем и конструкций существующих БРУ свидетельствует об их развитии от пассивных, построенных на основе механических пружин и демпферов, к активным, использующим следящие приводы. Использование активных БРУ позволяет повысить безопасность полета и улучшить информационную осведомленность экипажа за счет обеспечения тактильной взаимосвязи между усилием, прикладываемым пилотом к БРУ, и реакцией ЛА, а также за счет синхронной работы двух ручек при отклонении одной из них (для ЛА, управляемых двумя пилотами).

В работах R. Hermans [1], D. Hanke, C. Herbst [2] рассматриваются активные БРУ, которые построены по кинематическим схемам на основе рамочного кардана, что обуславливает их большие габаритные размеры. Активная БРУ, используемая на самолете MC-21 (разработка фирмы *Ratier-Figeac*, Франция), также построена по аналогичной схеме.

Поиск новых конструктивных решений, позволяющих обеспечить независимое управление самолетом по крену и тангажу и при этом снизить массогабаритные показатели активных БРУ, является актуальной задачей.

По результатам анализа схем и конструкций активных БРУ была сформулирована задача и выявлена возможность построения кинематической схемы без использования рамочного карданного шарнира. Далее будем называть такую схему безрамочной.

Целью данной статьи является обоснование возможности построения безрамочной кинематической схемы активной БРУ с обеспечением малых массогабаритных параметров. При этом акцент сделан на двух основных задачах: на задаче разработки рациональной кинематики активной БРУ и на задаче параметрического синтеза энергетического канала привода ручки.

Кинематика активных БРУ

Проанализируем используемые кинематические схемы БРУ с целью выбрать рациональный вариант.

Наиболее простой кинематической схемой активной ручки управления с двумя степенями подвижности является схема механизма, представляющего собой рамочный карданный шарнир (рис. 1).

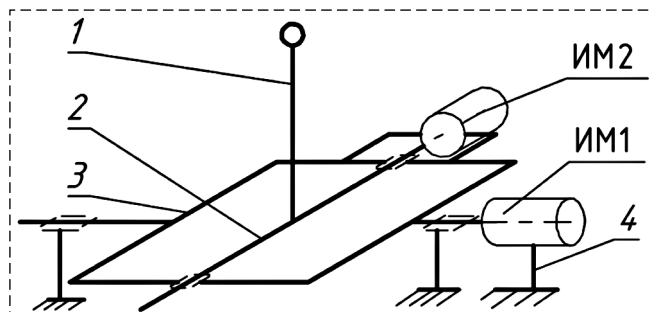


Рис. 1. Рамочная кинематическая схема БРУ

Механизм содержит рукоятку 1, жестко закрепленную на оси 2, которая имеет одну степень подвижности относительно рамки 3. При этом рамка 3 имеет одну степень подвижности относительно неподвижного корпуса 4. Ось 2 и рамка 3 приводятся в движение исполнительными механизмами (ИМ) электромеханических приводов ИМ2 и ИМ1.

Надежное функционирование любого механизма определяется его структурой. Рассмотрим этот механизм с точки зрения структурных закономерностей [3].

Согласно формуле Л. Н. Малышева [3] число степеней свободы пространственного механизма выражается числом его подвижных звеньев, числом кинематических пар с различными степенями подвижности и числом избыточных связей:

$$W = 6n - (5P_1 + 4P_2 + 3P_3 + 2P_4 + P_5 - S), \quad (1)$$

где W — число степеней подвижности; n — число подвижных звеньев механизма; $P_1, \dots, P_5$ — число одно-, двух-, трех-, четырех- и пятиподвижных пар соответственно; S — число избыточных связей.

БРУ с двумя степенями подвижности $W = 2$ содержит два подвижных звена и две кинематические пары с одной степенью подвижности. Такой механизм не имеет избыточных связей, поэтому

$$S = W - 6n + 5P_1 = 2 - 6 \cdot 2 + 5 \cdot 2 = 0. \quad (2)$$

Недостатком рассмотренной схемы является различие динамических характеристик каналов при использовании одинаковых ИМ электромеханических приводов (ИМ1 и ИМ2), так как масса ИМ2 является нагрузкой для ИМ1. Кроме того, наличие рамки обуславливает большие габаритные размеры.

Уменьшить габаритные размеры позволяет конструкция, в которой рукоятка БРУ распо-

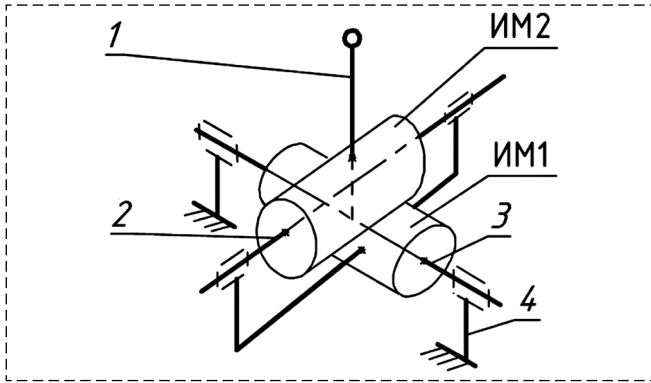


Рис. 2. Схема макета малогабаритной БРУ

ложена на оси, проходящей через точку скрещивания продольных осей электромеханических ИМ приводов (рис. 2) [4].

В этой конструкции функцию рамок выполняют корпуса ИМ приводов, что позволяет сократить габаритные размеры устройства. Однако важный недостаток рамочных конструкций сохранился. В этой компоновке ИМ привода, расположенному на основании (ИМ1), приходится вращать ИМ2, размещенный над ним, что приводит к неидентичности моментов инерции и, как следствие, разным динамическим характеристикам каналов.

Желание обеспечить идентичность динамических характеристик обоих каналов управления привело к исследованию структурных закономерностей, описываемых формулой Л. Н. Малышева (1).

Из формулы (1) следует, что построение механизма с двумя степенями подвижности за счет введения дополнительных подвижных звеньев и такого же числа одноподвижных пар приводит к образованию отрицательных избыточных связей, что нереализуемо.

Механизм с двумя степенями подвижности $W = 2$ без избыточных связей можно реализовать путем использования различного числа кинематических пар с разными степенями подвижности.

Когда число подвижных звеньев $n = 3, 4, 5$ или 6 , то построить кинематическую схему только из одноподвижных кинематических пар не представляется возможным. При таком числе подвижных звеньев необходимо использовать кинематические пары с двумя, тремя или четырьмя степенями подвижности, что трудно реализуется.

Кинематическую схему с двумя степенями подвижности, содержащую только одноподвижные кинематические пары, возможно по-

строить при числе подвижных звеньев $n = 7$ и $P_1 = 8$:

$$W = 6 \cdot 7 - 5 \cdot 8 = 2. \quad (3)$$

Рассмотрим возможность реализации кинематической схемы ручки управления с восемью парами, имеющими одну степень подвижности. Особенность схемы состоит в том, что от двух одинаковых исполнительных механизмов приводов, закрепленных на неподвижном основании, должно передаваться вращение рукоятке с двумя степенями подвижности (по двум каналам) без взаимного нагружения каналов.

Чтобы исполнительные механизмы приводов были одинаковыми, примем, что для передачи движения по каждому каналу используется одинаковое число кинематических пар $P_1 = 4$.

Известны четырехзвенные шарнирные механизмы, преобразующие вращательное движение исполнительного механизма привода в качательное движение выходного звена в одной плоскости.

На рис. 3 приведена схема с тремя подвижными звеньями ($n = 3$) [5].

Косой кривошип 1 вращается вокруг оси X-X. Качающаяся шайба 2 входит во вращательные пары с косым кривошипом 1 и звеном 3, которое вращается вокруг оси Y-Y. При вращении косого кривошипа 1 вокруг оси X-X звено 3 совершает качательное движение вокруг оси Y-Y при условии, что оси всех кинематических пар пересекаются в одной точке.

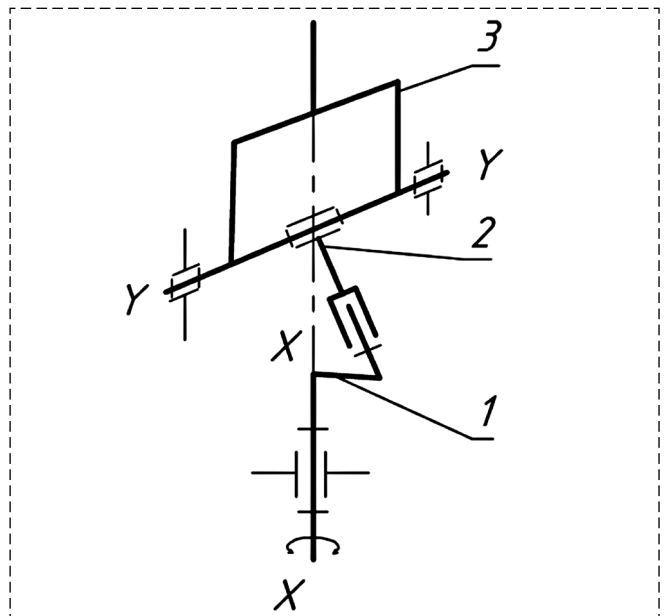


Рис. 3. Кинематическая схема механизма с качающейся шайбой и косым кривошипом

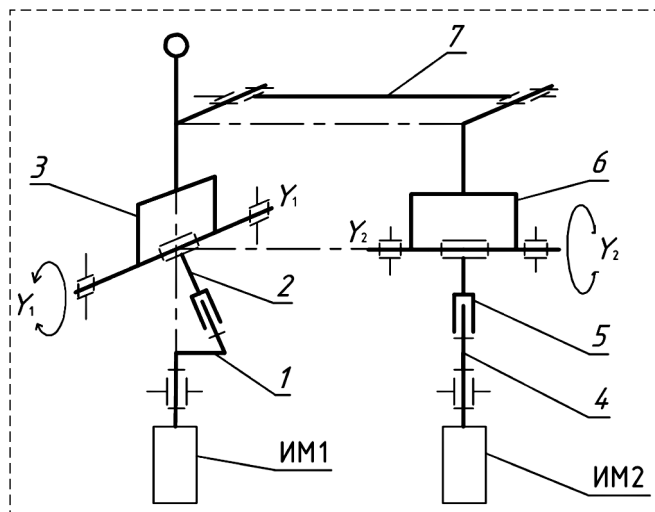


Рис. 4. Кинематическая схема ручки управления

Если использовать два механизма, выполненных по кинематической схеме, изображенной на рис. 3 (один механизм имеет подвижные звенья 1, 2, 3, а второй — звенья 4, 5, 6), так что их оси $Y-Y$ располагаются перпендикулярно, и связать эти механизмы рычагом 7 через вращательные пары, получим кинематическую схему с двумя степенями подвижности $W = 2$.

Кинематическая схема такого механизма изображена на рис. 4. Схема содержит восемь одноподвижных пар и семь подвижных звеньев.

При повороте звена 1 (работает ИМ1) и зафиксированном звене 4 (не работает ИМ2) звено 3 совершает поворотное движение совместно с рукояткой в поперечной плоскости (канал крена) и поворачивает звенья 6 и 5 относительно оси косого кривошипа 4.

При повороте звена 4 (работает ИМ2) и зафиксированном звене 1 (не работает ИМ1) звено 6 совершает поворотное движение и через рычаг 7 отклоняет рукоятку в продольной плоскости (канал тангажа), а также поворачивает звенья 3 и 2 относительно оси косого кривошипа 1. При одновременной работе ИМ1 и ИМ2 рукоятка повернется на угол, проекции которого на поперечную и продольную плоскости пропорциональны углам поворота звеньев 1 и 4 соответственно.

Таким образом, в качестве наиболее предпочтительного вы-

бран вариант кинематической схемы активной БРУ, показанный на рис. 4.

Далее рассмотрим кинематические соотношения между углами поворота вала ИМ и рукоятки.

Найдем зависимость угла отклонения рукоятки от угла поворота привода. Пусть ось привода — OA (рис. 5, а, б). Точка O является центром шарнира, в которой пересекаются оси косого кривошипа, конической шайбы и рукоятки. Угол α ($\angle AOC$) — это постоянный угол наклона косого эксцентрика шарнира. Угол θ ($\angle BAC$) соответствует углу поворота вала привода. Угол φ ($\angle AOB$) соответствует углу отклонения рукоятки.

Таким образом, при изменении угла поворота вала привода θ от 0 до π угол отклонения рукоятки φ меняет свое значение от α до $-\alpha$, причем, когда $\theta = \pi/2$, $\varphi = 0$.

Найдем зависимость угла φ от угла θ :

$$\begin{aligned} |OA| &= 1; \\ |AB| &= |OA|\operatorname{tg}\varphi = \operatorname{tg}\varphi; \\ |BC| &= |AB|\operatorname{tg}\theta = \operatorname{tg}\varphi\operatorname{tg}\theta; \\ |AC| &= |OA|\operatorname{tg}\alpha = \operatorname{tg}\alpha; \\ |BC| &= |AC|\sin\theta = \operatorname{tg}\alpha\sin\theta; \\ \varphi &= \operatorname{arctg}\frac{|BC|}{|OA|} = \operatorname{arctg}\frac{\operatorname{tg}\alpha\sin\theta}{\operatorname{tg}\theta} = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\alpha\cos\theta). \end{aligned}$$

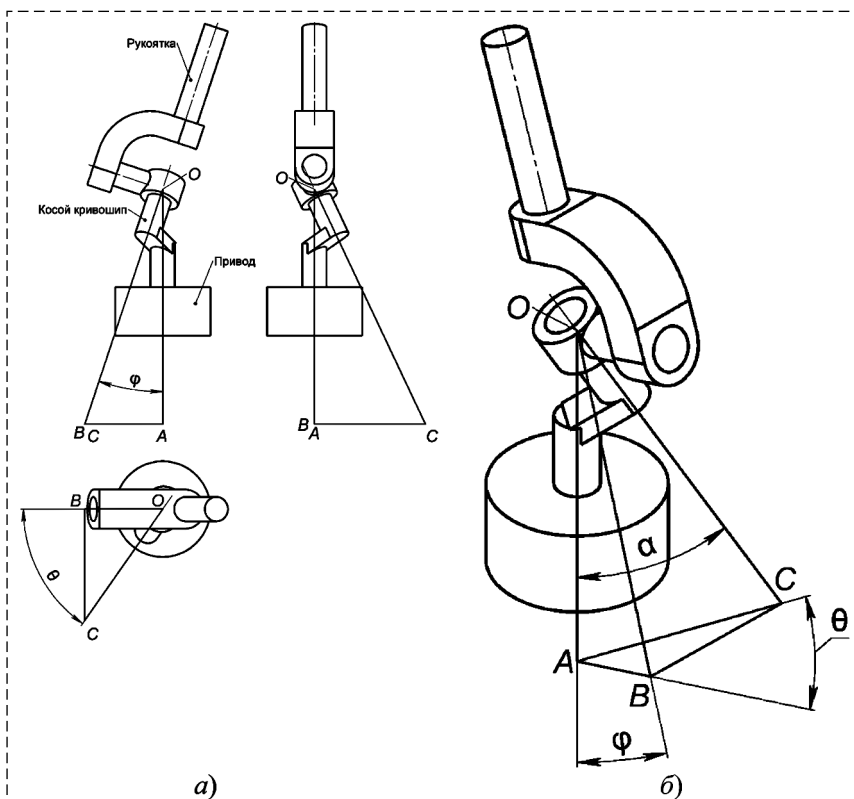


Рис. 5. Геометрическая интерпретация шарнира

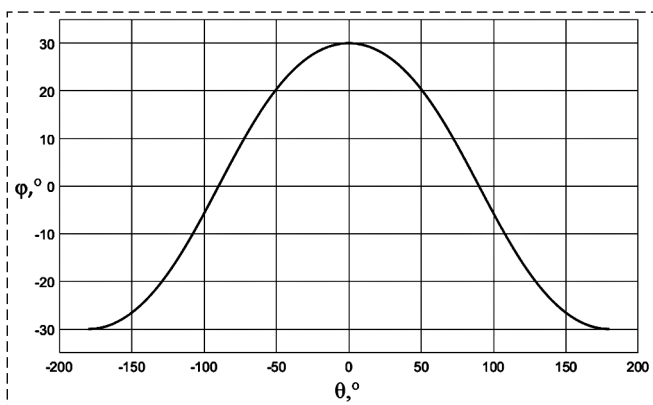


Рис. 6. График зависимости угла отклонения рукоятки от угла поворота привода при $\alpha = 30^\circ$

График данной зависимости при $\alpha = 30^\circ$ показан на рис. 6.

В диапазоне рабочих углов $\pm 20^\circ$ зависимость между углами будет близка к линейной, а передаточное отношение изменяется от 1,73 в нейтральном положении до 2,3 в крайнем.

Параметрический синтез ИМ электромеханических приводов БРУ

Для выбранной кинематической схемы БРУ проведем параметрический синтез энергетического канала привода, задача которого состоит в том, чтобы выбрать элементы ИМ, гарантирующие возможность воспроизведения требуемого закона движения объекта управления (рукоятки БРУ) при минимальной мощности исполнительного двигателя (ИД) [6].

Параметрический синтез ИМ включает в себя решение следующих задач:

- 1) расчет максимальной граничной мощности $P_{\max \text{ гр}}$ — минимально возможного значения максимальной механической мощности исполнительного двигателя;
- 2) поиск граничного диапазона передаточных чисел редуктора $q_1, \dots, q_2$;
- 3) поиск оптимального передаточного числа редуктора $q_{\text{опт}}$.

Электромеханические приводы БРУ предназначены для решения двух основных задач — активное нагружение управляемой пилотом БРУ и перемещение рукоятки в режиме автопилота, либо при парной работе двух БРУ для "ведомой" ручки. Исходя из этого с использованием заданных режимов управления полетом ЛА, для которого разрабатывается БРУ, могут быть определены исходные данные на разработку ИМ, а именно:

1) максимальное развиваемое усилие $F_{\max}$ на рукоятке в точке, отстоящей от центра вращения ВР на расстояние l ;

2) максимальная угловая скорость отклонения рукоятки $\Omega_{\max}$ при максимальном усилии;

3) отработка гармонического закона движения рукоятки с амплитудой φ_m и частотой ω при максимальном моменте нагрузки на рукоятке $M_{\max}$.

Параметрический синтез ИМ необходимо провести для двух типовых законов движения: произвольного закона движения рукоятки (п. 2 исходных данных) и гармонического закона движения рукоятки (п. 3 исходных данных).

Требования на произвольный закон движения отражают работу активной БРУ в условиях, когда привод создает непрерывное усилие на рукоятке согласно кривой нагружения, противодействующее усилию перемещения рукоятки пилотом. Гармонический закон движения отражает работу пассивной (ведомой) БРУ в условиях повторения углов поворота активной (ведущей) БРУ. Момент инерции рукоятки в этом случае будет основной составляющей момента сопротивления нагрузки.

При выборе двигателя следует учитывать особенности его работы в составе изделия. Особенностью работы БРУ является создание непрерывного момента сопротивления руке пилота при нулевой скорости. И здесь решающую роль играет не столько максимальная мощность двигателя, сколько значение момента при нахождении рабочей точки в области непрерывной работы.

Все расчеты проводятся по методикам, изложенным в работе [6].

Расчеты показывают, что для ИМ приводов БРУ именно произвольный закон движения является определяющим для выбора мощности ИД.

При расчете максимальной граничной мощности необходимо знать значения электромагнитной $T_{\text{я}}$ и электромеханической $T_{\text{дв}}$ постоянных времени двигателя, который еще не выбран. Это противоречие легко решается, если предположить серию, из которой будет проводиться окончательный выбор двигателя. Согласно методике, изложенной в работе [6], необходимо взять либо средние, либо максимальные значения постоянных времени для данной серии двигателей.

Далее для произвольного закона движения (выше уже говорилось, что он является опре-

деляющим при выборе мощности двигателя) рассчитываются эквивалентные угловая скорость $\Omega_{\text{э}}$ и момент сопротивления нагрузки $M_{\text{с.н.э}}$ выходного вала привода:

$$\begin{aligned}\Omega_{\text{э}} &= \Omega_{\text{max}} + T_{\text{дв}}\varepsilon + T_{\text{я}}T_{\text{дв}}\dot{\varepsilon}; \\ M_{\text{с.н.э}} &= M_{\text{с.н.с}} + J_{\text{н}}\varepsilon + T_{\text{я}}J_{\text{н}}\dot{\varepsilon},\end{aligned}$$

где ε — значение углового ускорения выходного вала привода; $J_{\text{н}}$ — момент инерции нагрузки, в нашем случае равный моменту инерции рукоятки; $M_{\text{с.н.с}} = F_{\text{max}}l$ — статический момент сопротивления нагрузки.

Если значения ε и $\dot{\varepsilon}$ в исходных данных не заданы, их можно приравнять к нулю. Тогда $\Omega_{\text{э}} = \Omega_{\text{max}}$.

Для учета КПД редуктора η значения $J_{\text{н}}$ и $M_{\text{с.н.с}}$ подставляются в расчетные формулы, деленными на КПД, которым необходимо задаться исходя из типичных значений для предполагаемого типа редуктора. В результате получается:

$$M_{\text{с.н.э}} = \frac{M_{\text{с.н.с}}}{\eta}.$$

Максимальная граничная мощность $P_{\text{max гр}} = \Omega_{\text{э}} M_{\text{с.н.э}}$.

Полученный результат $P_{\text{max гр}}$ еще не гарантирует нам выполнения требуемого движения. Это связано с возможной неточностью задания параметров требуемого закона движения привода и нагрузки, с разбросом параметров ИД, необходимостью обеспечения переходных состояний требуемого движения. Все это приводит к целесообразности некоторого увеличения мощности ИД по сравнению с $P_{\text{max гр}}$. Избыток механической мощности ИД определяется отношением q_2/q_1 , называемым шириной диапазона передаточных чисел редуктора, обеспечивающего требуемый момент на выходном валу ИМ. В результате этот избыток рассчитывается как

$$P_{\text{н}^*} = \frac{\left(\frac{q_2}{q_1} \text{sign}[P_{\text{max гр}}] + 1 \right)^2}{4 \frac{q_2}{q_1} \text{sign}[P_{\text{max гр}}]},$$

где $P_{\text{н}^*}$ — отношение максимальной механической мощности ИД к ее граничному значению.

Задавая ширину диапазона передаточных чисел q_2/q_1 (как правило, на этом этапе зада-

ются величиной $q_2/q_1 = 1,5 \div 2$), можно определить требуемое значение $P_{\text{max гр}}$ как

$$P_{\text{max гр}} = P_{\text{н}^*} P_{\text{max гр}}.$$

На следующем этапе, согласно методике [6], выполняется поиск граничного диапазона передаточных чисел редуктора $q_1 \dots q_2$ и оптимального передаточного числа редуктора $q_{\text{опт}}$ (в связи с громоздкостью формул приводить их в данной статье не будем).

По результатам проведенного параметрического синтеза ИМ выбирается тип (марка) ИД и рассчитывается конкретное передаточное число редуктора, оптимизированное по какому-либо критерию, например, минимума угла рассогласования следящего привода.

Далее выбирается тип редуктора и проводится расчет.

Заключение

Предложено построение кинематической схемы БРУ по безрамочной схеме, которая позволяет сократить массогабаритные показатели и улучшить динамические характеристики управления за счет исключения взаимовлияния приводов.

Установлено, что кинематическая связь (передаточное число) между выходным валом ИМ привода и углом поворота рукоятки является числом не постоянным, а изменяется при отклонении рукоятки на $\pm 20^\circ$ от 1,73 в нейтральном положении до 2,3 в крайнем.

Мощность ИД электромеханических приводов активной БРУ зависит от требуемой максимальной скорости перемещения рукоятки пилотом и заданного максимального усилия, а также от момента инерции рукоятки.

Результаты работы, приведенные в данной статье, являются основой для разработки активной БРУ отечественного производства. Благодаря возможности гибкой настройки режимов загрузки и алгоритмов работы такая ручка может быть применена в управлении самолетом или вертолетом как военного, так и гражданского назначения.

Список литературы

1. Hermans R. L. Design of an actuated side stick controller for the SiMoNa research simulator. Delft: Delft University of Technology, 1999. 154 p.

2. Hanke D., Herbst C. Active sidestick technology — a means for improving situational awareness // Aerospace science technology. 1999.

3. Фролов К. В., Попов С. А., Мусатов А. К. и др. Теория механизмов и машин / Под ред. К. В. Фролова. М.: Высшая школа, 1987. 496 с.

4. Самсонович С. Л., Огольцов И. И., Крылов Н. В., Ларин А. П., Рожнин Н. Б., Макарин М. А., Степанов В. С., Оболенский Ю. Г., Кривко В. А., Дмитриев А. В. Боковая

ручка управления самолетом. Патент РФ № 2571992. Оpubл. 27.12.2015, Бюл. № 36

5. Кожевников С. Н., Есипенко Я. И., Раскин Я. М. Механизмы, справочник. Изд. 4-е / Под ред. С. Н. Кожевникова. М.: Машиностроение, 1976. 784 с.

6. Полковников В. А. Предельные динамические возможности следящих приводов систем управления летательных аппаратов. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 472 с.

Kinematic and Power Characteristics of the Active Frameless Aircraft Control Sidestick

R. R. Abdulin, abdulin@mnpk.ru, D. S. Timofeev, tds@mnpk.ru, A. A. Kravchenko, kravchenko@mnpk.ru,
N. V. Krylov, artsunday@mail.ru,
AVIONICA Joint Stock Company, Moscow, 127055, Russian Federation,
S. L. Samsonovich, samsonovich40@gmail.ru, N. B. Rozhnin, rozhnin@yandex.ru,
A. P. Larin, aplarin@rambler.ru, M. A. Makarin, mikhailmakarin@gmail.com
MAI, Moscow

Corresponding author: Kravchenko A. A., Head of sector,
AVIONICA Joint Stock Company, Moscow, 127055, Russian Federation
e-mail: kravchenko@mnpk.ru

Accepted on May 29, 2018

The article is devoted to the actual topic of a small-sized active aircraft control sidestick design and identification of parameters that influence its energy consumption characteristics. The analysis of structural regularities of active control sidestick kinematics design is carried out. The analysis demonstrates that the disadvantage of the known frame constructions, apart from the large dimensions, is the difference in the dynamic characteristics of the channels when using the same actuators, because the mass of a frame mounted actuator is the load for a fixed base mounted actuator. According to results of the analysis, a synthesis of the active control sidestick building based on using of kinematic pairs having one degree of motion was carried out. Hinged mechanisms were used that convert rotational motion of the input link (the actuator output shaft) to the swinging motion of the output link (the control sidestick handgrip) in a single plane. When using two such actuators, so that their links are located perpendicularly and connected to each other by a lever through one-degree-of-freedom rotating pairs, a kinematic scheme with two degrees of motion is obtained. As a result the kinematic scheme of an active control sidestick which don't use a frame is offered. The frameless scheme contains two identical actuators mounted on the fixed base, at that the interference of channels is excluded. The derivation of the actuator gear ratio between the rotation angle of the actuator output shaft and the handgrip deflection angle is given. It is shown that this dependence is of a sinusoidal type and that it is close to linear in the range of the handgrip operating angles. The given results of the parametric synthesis of the control sidestick electromechanical actuator allow to determine the electric motor minimum power and the gear ratio providing the required values of torque and speed at the actuator output link. In consequence of the research of the active control sidestick specific operation modes it is shown that the electric motor power depends on the required values of the maximum speed of the handgrip movement by a pilot and on the force applied to the handgrip, as well as on the handgrip inertia moment.

Keywords: active aircraft control sidestick, kinematic scheme with two degrees of motion, actuator, parametric synthesis

For citation:

Abdulin R. R., Timofeev D. S., Kravchenko A. A., Krylov N. V., Samsonovich S. L., Rozhnin N. B., Larin A. P., Makarin M. A. Kinematic and Power Characteristics of the Active Frameless Aircraft Control Sidestick, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 10, pp. 673–679.

DOI: 10.17587/mau.19.673-679

References

1. Hermans R. L. Design of an actuated side stick controller for the SiMoNa research simulator, Delft, Delft University of Technology, 1999, 154 p.

2. Hanke D., Herbst C. Active sidestick technology — a means for improving situational awareness, Aerospace science technology, 1999.

3. Frolov K. V., Popov S. A., Musatov A. K. *Teoriya mekhanizmov i mashin* (Theory of Machines and Mechanisms.), Moscow, Vysshaya shkola, 1987, 496 p. (in Russian).

4. Samsonovich S. L., Ogoltsov I. I., Krylov N. V., Larin A. P., Rozhnin N. B., Makarin M. A., Stepanov V. S., Obolenskiy Yu. G., Krivko V. A., Dmitriev A. V. Patent RU № 2571992 27.12.2015 (in Russian).

5. Kozhevnikov S. N., Esipenko Ya. I., Raskin Ya. M. *Mekhanizmy, spravochnik* (Handbook on mechanisms edition № 4 edited by Kozhevnikov S. N.), Moscow, Mashinostroyeniye, 1976, 784 p. (in Russian).

6. Polkovnikov V. A. *Predelnye dinamicheskie vozmozhnosti sledyashchikh privodov sistem upravleniya letatelnykh apparatov* (Maximal dynamic capabilities of servo actuators for aircraft control systems), Moscow, MAI-PRINT, 2010, 472 p. (in Russian).