

УДК 629.7.025: 004.942

В. Н. ДОЦЕНКО, Ю. В. КОВЕЗА, И. Г. ЛИХОШЕРСТ*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗАКРЫЛКАМИ И ПРЕДКРЫЛКАМИ

Рассмотрены пути упрощения подробной динамической модели системы управления закрылками и предкрылками с целью уменьшения времени моделирования и ресурсов вычислительной техники. Указаны основные принципы понижения порядка рассматриваемой системы нелинейных дифференциальных уравнений. С использованием указанных принципов показаны изменения в модели приводной станции и трансмиссии. Приведены результаты сопоставления результатов моделирования подробной и упрощенной модели. Отмечено, что упрощенная модель в целом удовлетворительно описывает процессы в системе управления предкрылков и закрылков.

Ключевые слова: предкрылки и закрылки, система управления, динамическая модель, пути и принципы упрощения модели, сравнение результатов.

Введение

Одной из основных составных частей системы управления закрылками и предкрылками (СУЗП) является трансмиссия, которая представляет собой сложную крутильную динамическую систему с большим числом сосредоточенных масс, соединенных элементами, обладающими определенными упруго-инерционными характеристиками.

Динамическая модель системы управления предкрылками и закрылками, рассмотренная в статье [1], представляет собой систему дифференциальных уравнений второго порядка. Представленная модель достаточно громоздка, так как количество решаемых уравнений определяется количеством степеней свободы системы, которое зависит от количества включенных в систему элементов, которые характеризуются жесткостью, демпфированием или нелинейностью. Дифференциальные уравнения включают в себя такие нелинейности, как момент сил трения, зазор, карданная передача, КПД и др.

Решение указанной системы уравнений производится численными методами в среде Matlab и занимает значительное время и ресурсы вычислительной техники. Так, время моделирования выпуска предкрылков и закрылков из одного крайнего положения в другое на компьютере Intel Core i7-930 2.8 GHz, 3.5 GB RAM составляет около 8 часов. Поэтому актуальным является вопрос об упрощении рассматриваемой модели.

Метод решения системы дифференциальных уравнений (численный алгоритм) оказывает существенное влияние не только на точность решения, но и на скорость вычислений. Обычно чем сложнее алгоритм, тем выше точность вычислений и тем больше требуется вычислительных мощностей. Применение

адаптивных алгоритмов, которые позволяют изменять шаг интегрирования, влекут за собой большие затраты времени [2]. Немаловажным является и тот факт, что малый шаг интегрирования обуславливает увеличение объема выходных данных.

Для решения практических задач можно использовать упрощенные модели, которые характеризуются малым числом степеней свободы [3]. В таких расчетных схемах некоторые участки системы считаются лишенными массы и представляются в виде деформируемых безинерционных связей. При этом тела, за которыми сохраняются свойства инерции, считаются материальными точками, в которых сосредоточена масса, или абсолютно твердыми телами [4]. Однако, стремясь к упрощению расчетной схемы, нужно иметь в виду, что пренебрежение всеми инерционными свойствами заданной системы может полностью лишить ее динамических свойств.

В настоящей статье рассмотрены пути упрощения подробной модели (ПМ) с целью уменьшения времени моделирования основных процессов, происходящих при работе СУЗП.

Основные принципы понижения порядка системы

1. Замена крутильной системы одним эквивалентным упругим безмассовым валом с расположенными на нем сосредоточенными массами, не обладающими упругими свойствами.

Замена нескольких валов одним (эквивалентным) валом осуществляется на основании двух условий:

- равенства кинетических энергий исходной модели и упрощенной;

– равенства потенциальных энергий упругих деформаций исходной и упрощенной модели.

Таким образом, пренебрегая на порядок меньшими массами, объединяя элементы, жесткость связей между которыми значительно больше других, исходя из условий равенства кинетической и потенциальной энергии, можно существенно уменьшить количество степеней свободы и получить упрощенную систему.

2. Описание некоторых динамических объектов как пропорциональных звеньев.

3. Допущение о том, что секции предкрылков и закрылков, расположенные симметрично на правой и левой консолях крыла самолета, движутся с одинаковой скоростью и отклоняются на один угол с крайним элементом трансмиссионного вала в конце консоли.

Ниже описаны способы снижения степени рассматриваемой модели с учетом изложенных выше подходов.

Моделирование элементов системы

При создании модели пониженного порядка (МПП) приняты те же допущения, что и при создании полной модели (ПМ) [1].

Основные изменения в модели касаются элементов трансмиссии, поскольку именно они описываются системой дифференциальных уравнений и создают наибольшую задержку вычислительного процесса. Остальные составные части модели, в основном логические блоки, могут быть использованы в том виде, в котором они представлены в ПМ. Это:

- интерфейс пилота (рычаг управления закрылками и предкрылками (РУЗП) с соответствующим датчиком и переключатель режима управления – альтернативный/ручной);
- датчики положения и перекося;
- модель компьютера, включающая в себя блоки управления положением, защиты от асинхронности, защиты от асимметрии, защиты от некомандного движения и сигнализации;
- модель механизма концевых выключателей;
- карданная передача (в ПМ она описана алгебраическим выражением);
- модель электрической части привода механизации крыла (ПМК);
- электрическая тормозная муфта.

Модель ПМК. В [1] описана ПМК, которая включает в себя два бесколлекторных электродвигателя (ЭД) постоянного тока с независимым возбуждением от постоянных магнитов и электрические тормозные муфты.

Упрощенная модель каждого ЭД описывается уравнениями:

$$I = \frac{U - k_{\omega} \frac{d\varphi}{dt}}{R};$$

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} J_{\delta} = M - M_{\text{load}};$$

$$M = k_m I;$$

$$M_{\text{load}} = \frac{M_{\text{pdu}}}{U_{\text{pdu}}} + M_{\text{brake}};$$

$$I_{\text{min}} \leq I \leq I_{\text{max}},$$

где I – ток в обмотке; U – напряжение в обмотке; M – электромагнитный момент; R – эквивалентное сопротивление обмотки, Ом; k_{ω} – коэффициент противоЭДС, Вс/рад; φ – угловое перемещение ротора; J_s – эквивалентный момент инерции ротора, кг·м²; k_m – коэффициент электромагнитного момента, А/Нм; M_{load} – момент внешних сил; M_{brake} – момент сил трения тормозной муфты; U_{pdu} – передаточное отношение от вала ЭД к выходному валу ПМК.

Момент нагрузки на выходном валу ПМК M_{pdu} состоит из суммарного момента нагрузки M_{load} , суммарного момента потерь M_{loss} (КПД), суммарного момента статических сил M_{static} и суммарного момента инерционной нагрузки:

$$M_{\text{pdu}} = \sum_i M_{\text{load } i} + \sum_i M_{\text{loss } i} + \sum_i M_{\text{static } i} + J \frac{d^2\varphi_{\text{tp}}}{dt^2},$$

где J – общий момент инерции трансмиссии в МПП; φ_{tp} – текущий угол поворота трансмиссионного вала.

Его можно найти из условия равенства кинетической энергии трансмиссии в ПМ и МПП:

$$J \frac{\omega^2}{2} = \sum_{i=1}^n \frac{J_i \omega_i^2}{2},$$

где ω – угловая скорость трансмиссионного вала в МПП; J_i – момент инерции i -го элемента трансмиссии в ПМ; ω_i – угловая скорость i -го элемента трансмиссии в ПМ. Пренебрегая различием угловых скоростей i -х элементов трансмиссии на переходных процессах (пуск, остановка), можно записать

$$J = \sum_{i=1}^n J_i. \quad (1)$$

Трансмиссия. МПП трансмиссий предкрылков и закрылков аналогичны. Они представлены следующей расчетной схемой (рис. 1).

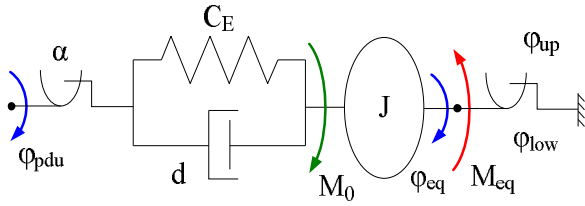


Рис. 1. Расчётная схема модели пониженного порядка трансмиссии

Система уравнений для упрощенного моделирования трансмиссии имеет вид

$$\frac{d^2 \varphi_{eq}}{dt^2} J = M_0 - M_{eq};$$

$$M_0 = \begin{cases} C_{\Sigma} (\varphi_{pdu} - \varphi_{eq}) + D \left(\frac{d \varphi_{pdu}}{dt} - \frac{d \varphi_{eq}}{dt} \right), & \text{if } \varphi_{pdu} - \varphi_{eq} \geq \alpha, \\ 0, & \text{else,} \end{cases}$$

где C_i – жесткость i -го элемента трансмиссионного вала;

φ_{pdu} – угловое перемещение выходного вала ПМК;

ПМК;

φ_{eq} – угловое перемещение конца трансмиссионного вала;

$\varphi_{up}, \varphi_{low}$ – верхнее и нижнее угловое положение конца трансмиссионного вала;

J – общий момент инерции;

D – эквивалентный коэффициент демпфирования, который определяется эмпирически по результатам идентификации ПМ. Коэффициенты демпфирования для правой и левой консоли трансмиссий предкрылков и закрылков считаются равным

$$D_{flap}^R = D_{flap}^L, D_{slat}^R = D_{slat}^L; \quad (2)$$

C_{Σ} – общий коэффициент жесткости. В трансмиссиях предкрылков и закрылков жесткости соединены последовательно, поэтому общая жесткость трансмиссионного вала определяется как

$$C_{\Sigma} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{C_i}}, \quad (3)$$

где C_i – жесткость i -го элемента трансмиссионного вала;

α – общий зазор, который определяется как сумма зазоров при последовательном соединении звеньев или как среднее арифметическое при параллельном соединении.

Общий КПД трансмиссии определяется как произведение соответствующих КПД отдельно для

каждого узла, в котором приложена нагрузка. В расчет берутся КПД элементов, через которые передается нагрузка к выходному валу ПМК от соответствующей точки приложения нагрузки.

Под эквивалентной деформирующей нагрузкой в МПП понимается такой момент сил, приложенный к концу трансмиссионного вала, который вызывает его угловое перемещение, равное перемещению в ПМ. В качестве условия эквивалентности ПМ и МПП принято условие эквивалентности работ, затрачиваемых на скручивание трансмиссионного вала.

Нагрузка и деформация трансмиссионного вала изменяются по длине в зависимости от действующей нагрузки и жесткости участков (рис. 2).

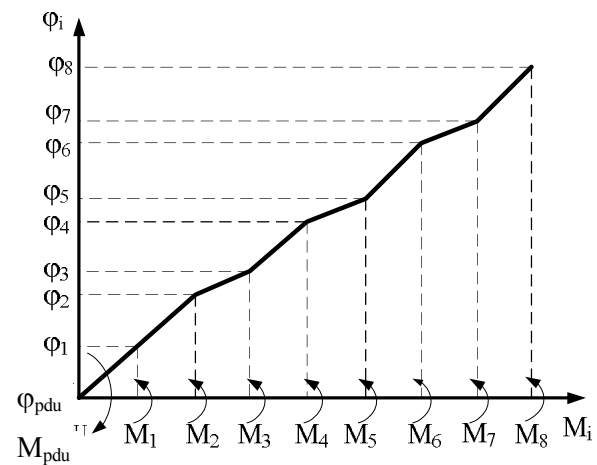


Рис. 2. Эпюра угла закручивания трансмиссионного вала при попутной нагрузке

Обозначив φ_i – угловое перемещение i -го узла, можно записать

$$\varphi_i = \varphi_{pdu} + \sum_1^i \Delta \varphi_i, \quad \Delta \varphi_i = \varphi_i - \varphi_{pdu}.$$

Тогда

$$\Delta \varphi_1 = \frac{M_1 + M_2 + \dots + M_8}{C_1}, \quad \Delta \varphi_2 = \frac{M_2 + \dots + M_8}{C_2}, \dots,$$

$$\Delta \varphi_i = \frac{\sum_{i=1}^{8-i+1} M_i}{C_i}.$$

Приравняв работы, затрачиваемые на скручивание трансмиссионного вала, получим

$$M_{eq} \Delta \varphi_{eq} = \sum_{i=1}^8 M_i \sum_1^i \Delta \varphi_i, \quad M_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^8 M_i \varphi_i}{\Delta \varphi_{eq}},$$

$$\varphi_i = \sum_i \Delta \varphi_i,$$

$$M_{eq} = \frac{M_1 \Delta \varphi_1}{\Delta \varphi_{eq}} + \frac{M_2 (\Delta \varphi_1 + \Delta \varphi_2)}{\Delta \varphi_{eq}} +$$

$$\dots + \frac{M_8 (\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \dots + \Delta\varphi_8)}{\Delta\varphi_{eq}};$$

$$\frac{\Delta\varphi_1}{\Delta\varphi_{eq}} = \frac{C_{eq}}{C_1}, \quad \frac{\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2}{\Delta\varphi_{eq}} = \frac{C_{eq}}{C_2}$$

или $\sum_i \frac{\Delta\varphi_i}{\Delta\varphi_{eq}} = \frac{C_{eq}}{C_i}, \quad M_{eq} = \sum_{i=1}^8 M_i \frac{C_{eq}}{C_i},$

где C_i – жесткость участка трансмиссионного вала, расположенного между началом трансмиссионного вала (вал ПМК) и i -м узлом.

Величину $\frac{C_{eq}}{C_i}$ можно назвать весовым коэффициентом, который указывает на вклад i -го момента сил в угловое перемещение конца трансмиссионного вала.

Для определения потерь крутящего момента в МПП используются эквивалентные значения КПД:

$$M_{loss} = \sum_i M_{loss\ i},$$

$$M_{loss\ i} = M_i \operatorname{sgn}(\omega_i) \begin{cases} \frac{1 - \eta_i^{forward}}{\eta_i^{forward}}, & \text{if } M_i \omega_i \geq 0; \\ 1 - \eta_i^{backward}, & \text{else,} \end{cases}$$

где M_i – момент внешних сил, приложенный в i -м узле; $M_{loss\ i}$ – потери крутящего момента, рассчитанные для i -го узла; $\eta_i^{forward}$, $\eta_i^{backward}$ – общие КПД прямого и обратного хода, рассчитанные относительно i -го узла;

$\omega_i = \omega_{pdu} - (\omega_{pdu} - \omega_{eq}) \frac{C_{eq}}{C_i}$ – угловая скорость элемента.

Момент статических сил трения учитывается как дополнительная нагрузка.

Перечень учтённых в МПП элементов трансмиссии и факторов влияния приведен в таблице 1.

Противооборотные тормоза предкрылков и закрылков заменены коэффициентами передачи и моделируются как пропорциональные звенья:

$$M_{wtb}(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } U_{wtb}(t - \tau) = U_{wtb}^{nom}, \\ M_{wtb}^{nom}, & \text{else,} \end{cases}$$

где $M_{wtb}(t)$ – тормозной момент как функция от времени; M_{wtb}^{nom} – номинальный тормозной момент, соответствующий номинальному напряжению U_{wtb}^{nom} ; τ – задержка в работе.

Таблица 1

Перечень учтённых в МПП элементов трансмиссии и факторов влияния

Элемент трансмиссии	Учитываемые факторы
Участок вала (торсион)	Инерция вращающихся частей - формула (1)
	Коэффициенты демпфирования - формула (2)
	Жёсткость - формула (3)
Опора	Инерция - формула (1)
	КПД
Редуктор	Инерция вращающихся частей - формула (1)
	Коэффициенты демпфирования - формула (2)
	Жёсткость - формула (3)
	Зазор
	КПД
Шарико-винтовой привод (ШВП)	Инерция вращающихся частей - формула (1)
	Коэффициенты демпфирования - формула (2)
	Жёсткость - формула (3)
	Зазор
	КПД
	Нагрузка

Сравнение результатов расчёта с помощью ПМ и МПП

На рис. 3 сопоставлены результаты моделирования с помощью подробной и упрощенной моделей электродвигателя; по горизонтальной оси отложено время, с; по вертикальной оси – угловое перемещение, град.

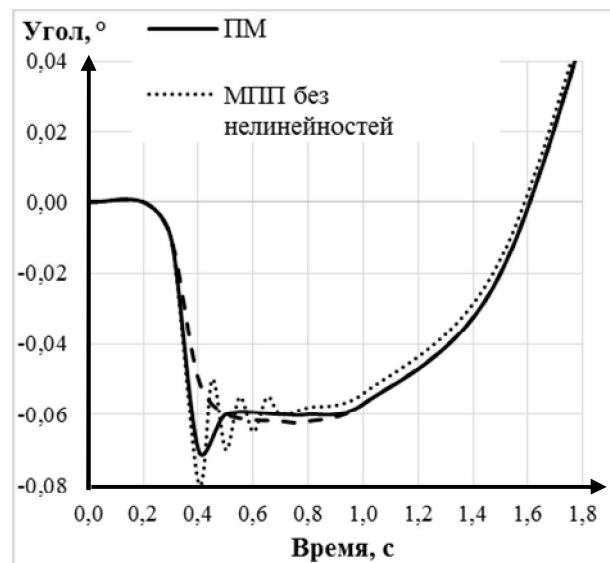


Рис. 3. Угловое перемещение конца трансмиссионного вала трансмиссии предкрылков

Выводы

1. МПП в целом адекватно описывает процессы в системе управления закрылками и предкрылками. Некоторое расхождение возникает только на быстротекущих переходных процессах, а по их окончанию, в фазе равномерного движения, результаты практически совпадают.

2. Скорость работы МПП на три порядка выше, поэтому она может быть использована при моделировании системы управления самолётом в целом.

3. Погрешность описания МПП не превышает заданной точности по углу отклонения.

4. Абсолютная погрешность между угловым перемещением конца трансмиссионного вала при расчёте с помощью подробной и упрощённой моделей всей системы не превышает $0,3^\circ$.

Литература

1. Доценко, В. Н. О создании адекватной динамической модели системы управления предкрылками и закрылками [Текст] / В. Н. Доценко, Ю. В. Ковеза, И. Г. Лихошерст // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 3 (120). – С. 10–15.

2. Дьяконов, В. П. *Simulink 5/6/7 [Текст] : Самоучитель* / В. П. Дьяконов. – М. : ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.

3. Moir, Ian. *Aircraft Systems: Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration. Third Edition [Text]* / Ian Moir, Allan Seabridge. - John Wiley & Sons Ltd, 2008. – 504 p.

4. Степанов, А. Г. *Динамика машин [Текст]* / А. Г. Степанов. – Екатеринбург : УрО РАН, 1999. – 304 с.

Поступила в редакцию 11.03.2015, рассмотрена на редколлегии 17.06.2015

СПРОЩЕНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗАКРИЛКАМИ І ПЕРЕДКРИЛКАМИ

В. М. Доценко, Ю. В. Ковеза, І. Г. Лихошерст

Розглянуто шляхи спрощення повної динамічної моделі системи керування закрилками і передкрилками з метою зменшення часу моделювання і ресурсів обчислювальної техніки. Вказано основні принципи пониження порядку даної системи нелінійних диференціальних рівнянь. З використанням вказаних принципів показано зміни в моделі приводної станції і трансмісії. Приведено результати зіставлення результатів моделювання повної і спрощеної моделі. Відмічено, що спрощена модель в цілому задовільно описує процеси в системі керування передкрилків і закрилків.

Ключові слова: передкрилки і закрилки, система керування, динамічна модель, шляхи і принципи спрощення моделі, порівняння результатів.

SIMPLIFIED DYNAMIC MODEL OF HIGH-LIFT CONTROL SYSTEM

V. N. Dotsenko, Yu. V. Koveza, I. G. Lykshosherst

The ways of simplifying of the detailed dynamic model of the of high-lift control systems (HLCS) are considered to reduce simulation time and computing resources. The basic principles of the system of nonlinear differential-equations order reducing are described. Using these principles the changes in power drive and transmission models are shown. The comparison of detailed and simplified models' simulation results is presented. It is noted that a simplified model satisfactorily describes the processes in the HLCS.

Keywords: slats and flaps, control system, dynamic model, principles of the model simplifying, comparison of results.

Доценко Владимир Николаевич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: dov1202@ukr.net.

Ковеза Юрий Владимирович – канд. техн. наук, доц., доцент кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: koweza@ukr.net.

Лихошерст Иван Григорьевич – аспирант кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: lykshosherst@gmail.com.