

Имитационное моделирование полета вертолета на режиме вихревого кольца

Предлагается способ имитирования полета вертолета на пилотажном стенде (тренажере) вертолета на режиме полета «вихревое кольцо». При моделировании использованы алгоритмы искусственных нейронных сетей. Способ позволяет выполнить моделирование характеристик нагружения несущего винта при опасном снижении вертолета.

М.Ю. ТОРОПОВ,
канд. техн. наук,
С.Я. СТЕПАНОВ
(КНИТУ-КАИ, Казань)
otosoft@yandex.ru

Вертолет, вихревое кольцо, имитационное моделирование, пилотажный стенд, тренажер

При подготовке летного состава используется тренажерная техника, которая имитирует динамику полета и характеристики систем летательного аппарата. Особенно важна роль авиационных тренажеров в обучении пилотов вертолетов. В отличие от самолетов, подъемная сила одновинтового вертолета создается несущим винтом (НВ), лопасти которого не только вращаются, но и совершают упругомаховое движение, а путевое управление осуществляется рулевым винтом. Сложный характер взаимодействия движения лопастей винтов и воздушного потока приводит к появлению особых режимов полета. Это в существенной мере усложняет решение задачи имитации динамики полета вертолета на пилотажном стенде (тренажере).

При вертикальном снижении возникает соответствующая скорость воздушного потока, направленная вверх, становясь достаточно большой, она начинает препятствовать формированию струи за винтом. При этом некоторая часть воздуха перетекает через НВ таким образом, что создается режим обтекания – режим вихревого кольца. Полет в этих условиях опасен. В летных испытаниях [1] установлено, что при некотором значении вертикальной скорости снижения ухудшается устойчивость и управляемость вертолета. Значительно возрастают отклонения ручки управления и педалей, появляются «броски» вертолета по крену, тангажу и курсу, отмечается тряска с непостоянной частотой. Наиболее ярко особенности режима выражены по каналу высоты полета. Вертикальная скорость снижения резко увеличивается (достигая приблизительно 16 м/с), возникает эффект «проваливания» вертолета.

В работе [2] показана возможность моделирования режима вихревого кольца НВ на основе нелинейной нестационарной постановки задачи, численно реализованной в рамках метода дискретных вихрей. Приведены результаты численного эксперимента по расчету аэродинамических характеристик винта на режимах вертикального снижения и снижения с малой поступательной скоростью полета при различных углах общего шага винта. Получены зависимости, позволяющие по принятому критерию идентифицировать режим вихревого кольца. Определены зоны проявления режима вихревого кольца одновинтового вертолета в безразмерных величинах:

$$\tilde{V} = \frac{V}{V_{\text{инд.ср}}}, \quad \tilde{V}_y = \frac{V_y}{V_{\text{инд.ср}}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{инд.ср}}$ – средняя индуктивная скорость на режиме висения; V – скорость поступательного полета.

Таким образом, при известной величине $V_{\text{инд.ср}}$ и $\tilde{V}$ имитируемого одновинтового вертолета можно с достаточной степенью точности оценить диапазон скоростей возникновения и интенсивности вихревого кольца.

С другой стороны, при решении задачи имитации динамики полета вертолета пилотажного тренажера вертолета непосредственное применение таких методов решения пока невозможно. Необходим другой подход, который позволит получить аналогичный результат, но со значительно меньшими вычислительными затратами.

В работе [3] представлена методология применения алгоритмов искусственных нейронных сетей при решении задач имитирования нагрузок, создаваемых винтами, планером, силовой установкой и шасси вертолета.

При помощи полученных таким образом имитационных моделей решаются уравнения движения вертолета в трехмерном евклидовом пространстве. Применение данного подхода позволило выполнить имитационное моделирование штатных режимов полета вертолета на типовом персональном компьютере со скоростью вычислений, требуемой для решения уравнений динамики в режиме реального времени. С другой стороны, при подготовке пилотов требуется отрабатывать на тренажере ситуацию попадания или вывода вертолета из сложного пространственного положения. Выполнить такое требование возможно, только дополнив модели несущего и рулевого винтов имитационными моделями нештатных режимов полета.

Цель имитационного моделирования состоит в воспроизведении поведения исследуемой системы на основе результатов анализа наиболее существенных взаимосвязей между элементами. В данном случае воспользуемся зависимостями влияния вихревого кольца на параметры нагружения НВ.

Введены две зависимости – коэффициента приращения интенсивности на режиме осевого обтекания Δk_0 как функция от скорости снижения вертолета $f(\tilde{V}_y)$ (рис. 1) и коэффициента влияния скорости горизонтального полета $k_v(\tilde{V})$ (рис. 2).

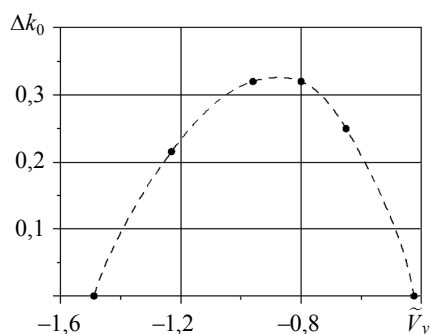


Рис. 1. Интенсивность вихревого кольца на режиме осевого обтекания

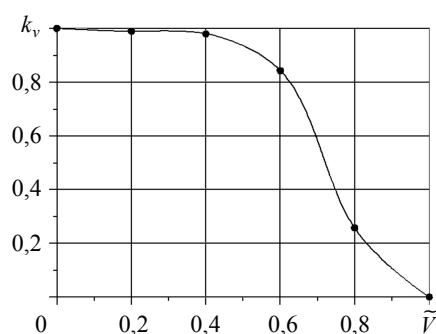


Рис. 2. Коэффициент влияния скорости горизонтального потока

Используя данные параметры, итоговый коэффициент интенсивности вихревого кольца можно представить в виде

$$\Delta k_{\text{вк}} = \Delta k_0 k_v. \quad (2)$$

В первую очередь вихревое кольцо оказывает влияние на тягу T и крутящий момент $M_{\text{к}}$ НВ. Тогда

$$\begin{aligned} T &= T^* (1 - \Delta k_{\text{вк}} k_{\text{р1}}), \\ M_{\text{к}} &= M_{\text{к}}^* (1 + \Delta k_{\text{вк}} k_{\text{р2}}), \end{aligned} \quad (3)$$

где $k_{\text{р1}}$ и $k_{\text{р2}}$ – регулировочные коэффициенты, позволяющие выполнить количественную настройку имитационной модели; T^* и $M_{\text{к}}^*$ – тяга и крутящий момент НВ, полученные без учета модели вихревого кольца.

Значения регулировочных коэффициентов можно определить, используя расчетные данные (вычисленные по численным моделям), результаты летных испытаний, опыт пилотов вертолетов в ходе исследовательских испытаний пилотажного стенда (тренажера).

Таким образом, необходимо решить задачу имитации качественных характеристик интенсивности вихревого кольца (см. рис. 1, 2). При этом необходимо обеспечить функционирование программного комплекса динамики полета вертолета в режиме реального времени.

Для решения задачи имитации характеристик интенсивности вихревого кольца выбран многослойный персептрон [4], нейроны в котором расположены слоями и имеют односторонние связи. Подстройка весовых коэффициентов проводится методом обратного распространения ошибки. При правильном построении связей и подборе весовых коэффициентов, синапсов нейронная сеть может точно вычислить любую непрерывную функцию от своих входов.

В результате обучения получены две однослойные нейронные сети с двумя нейронами в промежуточном слое (рис. 3), каждая из которых имитирует свои характеристики: интенсивность на режиме осевого обтекания (сеть 1) и влияние поступательной скорости полета (сеть 2).

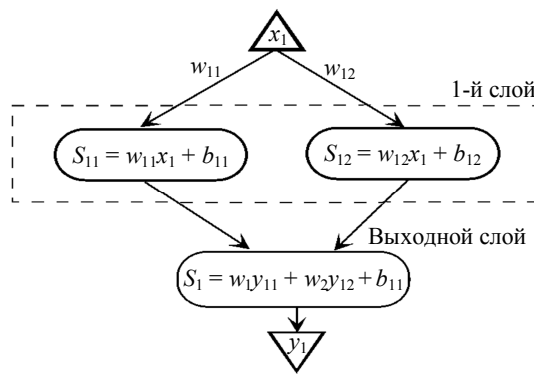


Рис. 3. Схема текущего состояния персептрона

На структурной схеме (см. рис. 3) показаны основные параметры, характеризующие состояние нейронной сети с одним промежуточным слоем. Количественные значения параметров, определяющих текущее состояние полученных сетей, представлены в таблице. В качестве активационной функции, формирующей выходной сигнал каждого из нейронов, используется сигмоид.

Параметры	Сеть 1	Сеть 2	Примечание
x_1	$\tilde{V}_y$	$\tilde{V}$	Входной сигнал
w_{11}	-21,7134	-22,187386	Весовой коэффициент
b_{11}	27,89793	15,87579	Смещение
w_{12}	-29,350246	-12,597268	Весовой коэффициент
b_{12}	17,225118	11,669326	Смещение
w_1	10,177364	6,740186	Весовой коэффициент
w_2	-10,049567	3,722969	
b_1	-5,3823841	-6,105054	Смещение
y_1	Δk_0	k_v	Выходной сигнал

Результаты имитирования характеристик интенсивности вихревого кольца с учетом влияния скорости (рис. 4) сопоставимы с результатами [2].

Как показывают исследования [2], аэродинамическое нагружение лопастей существенно изменяется в течение одного оборота, что эквивалентно двум режимам работы винта за один оборот. Это делает векторы поля скоростей неупорядоченными, приводит к повышенным пульсациям тяги и, как следствие, тряске вертолета или эффекту, напоминающему болтанку.

Имитацию пульсаций можно провести двумя способами:

- 1) задание эффекта пульсаций по силам и моментам, создаваемым НВ;
- 2) прямое задание пульсаций по параметрам, определяющим пространственное положение вертолета.

При применении любого из этих способов необходимо выбрать зависимости, имитирующие пульсации параметров.

Для имитации пульсаций можно использовать уравнения вида

$$\Delta Y_i = \Delta k_0 k_v Y_i \sin \omega_0 t, \quad (4)$$

где Y_i – амплитуда пульсации i -го параметра пульсации; ΔY_i – пульсации данного параметра в текущий момент времени; ω_0 – случайная фазовая координата.

В качестве прототипа для проведения поверки выбран легкий многоцелевой вертолет с взлетным весом 3000 кг. Величина средней индуктивной скорости, создаваемой бесшарнирным НВ на режиме висения, составляет $V_{icp} = 12,5$ м/с.

Исследуются три варианта полета со снижением вертолета:

- исходная модель динамики полета без учета режима вихревого кольца;
- вихревое кольцо 1, в данном случае $k_{p1} = 1$, $k_{p2} = 0,5$;
- вихревое кольцо 2, в данном случае $k_{p1} = 0,5$, $k_{p2} = 0,5$.

В начальный момент прототип вертолета находится на режиме висения. Далее выполняется имитация полета вертолета с заданной по времени скоростью снижения (рис. 5), одинаковой для всех трех вариантов.

С 90-й секунды полета вертолет достигает скорости снижения $V_y \approx -5,3$ м/с. Начиная с данной скорости, наблюдаются эффекты, соответствующие режиму вихревого кольца, проявляющиеся наиболее ярко при скорости снижения около 12–13 м/с. Это соответствует данным [1, 2, 5]: скорость снижения может быть того же порядка, что и индуктивная скорость на режиме висения. Провал тяги НВ вследствие образования вихревого кольца влечет за собой увеличение потребного общего шага для сохранения заданного темпа снижения (5). При этом прирост величины общего шага НВ в данной имитационной модели зависит от значений регулировочных коэффициентов.

Известно, что при увеличении скорости снижения проявление эффектов вихревого кольца уменьшается, а при дальнейшем переходе НВ на режим самовращения полностью прекращается.

Аналогичную картину наблюдаем на графиках имитации полета на режиме вихревого кольца, что говорит о качественном соответствии имитационной модели вихревого кольца, предложенной в данной работе (рис. 6).

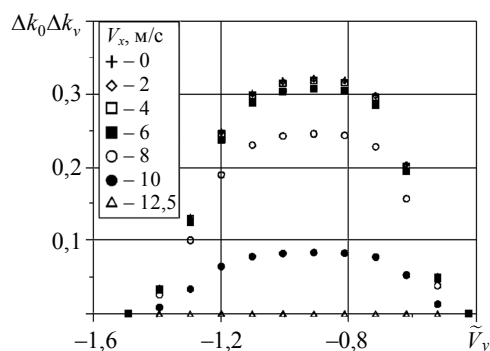


Рис. 4. Характеристики имитирования интенсивности вихревого кольца в зависимости от скоростей полета вертолета

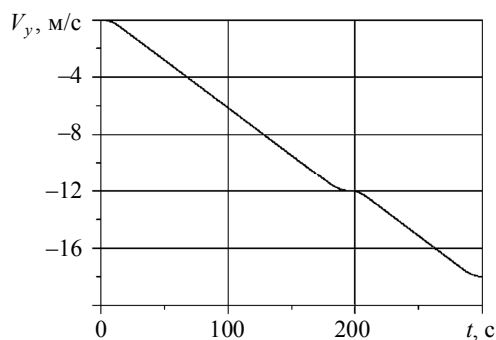


Рис. 5. Заданная скорость снижения вертолета по времени

В работе [5] показано, что на режимах вихревого кольца происходит увеличение (на 20–25 %) значения расчетного m_k по сравнению с его величиной на режиме висения. В данном случае на режиме мощность, потребная для режима висения $N_{\text{потр}}$, равна 682 кВт (рис. 7), и далее при входе в зону имитации вихревого кольца она существенно увеличивается. При этом для варианта 1 мощность $N_{\text{потр}}$ достигает приблизительно 920 кВт, что на 47 % больше, чем на режиме висения вертолета. При варианте 2 потребная мощность близка к режиму висения. Очевидно, что требуемые значения регулировочных коэффициентов $k_{p1} \approx 0,75$.

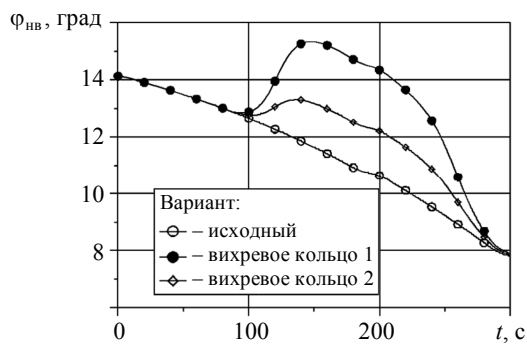


Рис. 6. Общий шаг НВ по времени

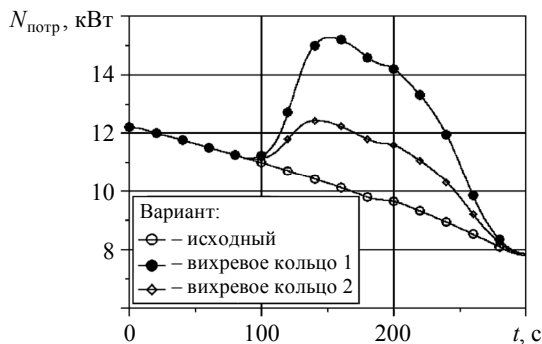


Рис. 7. Потребная мощность для полета вертолета по времени

Таким образом, разработан способ имитирования полета на пилотажном стенде (тренажере) вертолета с бесшарнирным НВ на режиме полета «вихревое кольцо». Модель позволяет выполнить имитирование снижения тяги НВ, повышения потребной мощности НВ, пульсаций и бросков вертолета при полетах вертолета в условиях, соответствующих возникновению вихревого кольца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов А.И. Аэродинамика и летные характеристики. М.: Машиностроение, 1988. 144 с.
2. Моцарь П.И., Удовенко В.А. Определение зоны режимов вихревого кольца одновинтового вертолета на основе математического моделирования // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2009. № 44. С. 33–50.
3. Гирфанов А.М., Ледянкина О.А. Методология применения искусственных нейронных сетей в задаче имитации нагружения одновинтового вертолета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 4. С. 26–30.
4. Горбань А.Н., Россиев Д.А. Нейронные сети на персональном компьютере. Новосибирск: Наука, 1996. 276 с.
5. Щеглова В.М. Нестационарное обтекание несущего винта на режимах крутого планирования и вихревого кольца // Учен. зап. ЦАГИ. Т. XLIII. 2012. № 3. С. 51–58.

Поступила в редакцию 7.09.16

Modeling of Helicopter Flight Imitation in the Vortex Ring State

M.YU. TOROPOV AND S.YA. STEPANOV

A method of imitating the helicopter flight on a flight simulator is proposed for the vortex ring state hover flight. Algorithms of artificial neural networks are used for the modeling. The method allows modeling the characteristics of the main rotor's loading during a dangerous descent of the helicopter.

Helicopter, vortex ring, imitation modeling, flight simulator