

## Компьютерная имитационная модель динамики несущего винта вертолета

Цель создания имитационной модели – отработка алгоритмов управления и методов идентификации динамического состояния винта на различных режимах полета (обдувки) с возможностью контроля уровней вибраций, сил, моментов в различных точках конструкции винта при изменении характера и параметров введения управляющих сигналов в циклический шаг. Модель функционирует в среде Simulink/MATLAB с обычной и повышенной скоростью симуляции (после компиляции модели). Средняя скорость симуляции процесса: 2 мин реального времени за 5...10 минут машинного времени на компьютере средней производительности.

*Модель учитывает:*

- геометрические размеры, массу и компоненты тензора инерции лопастей, втулки, скобы, корпуса осевого шарнира, рассчитанных на основании данных документации [1];
- наличие и ориентацию горизонтального, вертикального и осевого шарниров;
- диапазон частот вращения винта – до 3,4 об/сек;
- диапазон изменения углов установки лопастей  $1^{\circ} - 14^{\circ}30'$ ;
- диапазон изменения углов поворота лопастей относительно оси вертикального шарнира  $-11^{\circ} \dots +13^{\circ}$ ;
- взлетную массу вертолета 10 тс;
- наличие ограничителей свеса лопастей и демпферов вертикальных шарниров;
- возможность изменения воздушной скорости в диапазоне 0...250 км/час непосредственно в процессе симуляции (приблизительно через векторную сумму окружной скорости лопасти и проекцию скорости потока на направление движения точек лопасти);
- возможность изменения общего и циклического шага лопастей путем независимого управления в ходе симуляции с ограничением на максимальную величину угла установки (имитация автомата перекоса);

- модель является трехмерной, т.е. обдувающий поток воздуха может быть однородным, произвольно направленным, а также изменяться по интенсивности и направлению при воздействии на каждую лопасть.;
- все силы механической природы, действующие на элементы конструкции винта: тяжести, центробежные, Кориолиса, реакции, моменты - учитываются автоматически;
- точность балансировки комплекта лопастей, может быть нарушена изменением задаваемых компонент тензоров инерции, масс или расположения центров тяжести;
- имеется возможность введения нужных гармоник в угол установки лопастей непосредственно;
- имеется возможность введения нужных гармоник в аэродинамические характеристики лопастей (имитация активных закрылков);
- модель позволяет сохранить видеозапись движения винта и все временные диаграммы.

*Модель не учитывает:*

- движения вертолета – имитируется обдувка потоком воздуха в направлении полета. Основание, на котором закреплена вращающаяся втулка, имеет массу вертолета и прикреплено к земле неподвижно. Ось втулки закреплена вертикально и неподвижно;
- сложные аэродинамические явления типа срыва потока, наличия зоны обратного обтекания и т.п. могут быть учтены заданием соответствующих соотношений для сил и моментов, приложенных к лопастям;
- изгибной и крутильной податливости, а также изгибных и крутильных колебаний лопасти, которая моделируется жестким телом с заданным центром тяжести и компонентами тензора инерции;
- трения в шарнирах. Ограничение может быть снято;
- силы сопротивления вращению винта и лобового сопротивления должны быть заданы соответствующими соотношениями;

- ограниченной мощности силовой установки и потерь главного редуктора. Для задания необходимо ввести нагрузочную диаграмму силовой установки;

Во избежание возникновения разрывных обобщенных сил и для более реалистичного моделирования ситуаций все органы управления в модели действуют силами и моментами, а не перемещениями (линейными и угловыми),

Структура имитационной модели представлена на рис.1, экран 3D визуализации движений системы при симуляции - на рис.2,3, окна регуляторов частоты вращения, общего и циклического шага – на рис.4.

Подсистема привода вращения винта представляет собой пропорциональный регулятор, получающий сигналы от датчика оборотов и рукоятки управления, плавно раскручивающий винт до заданных оборотов и поддерживающий их на заданном уровне.

Блок Rotor Hub – втулка представляет собой твердое тело с заданными размерами (координаты точек присоединения скоб, заданные в локальной системе, порожденной втулкой), массой и моментами инерции (см. рис.5). Блок Bracket – скоба содержит также горизонтальный шарнир, ограничитель свеса и средства мониторинга угла взмаха.

Блок Rotor blade содержит твердое тело - лопасть с осевым шарниром Feathering hinge, блоки передачи управляющего сигнала и сенсора угла установки, актуатор передачи подъемной силы, приложенной к центру инерции и сенсор положения лопасти в пространстве, необходимый для определения положения относительно набегающего воздушного потока при вычислении подъемной силы. Через вход In2 производится ввод требуемого угла установки. Установка осуществляется актуатором, поворачивающим лопасть в осевом шарнире (расположен в субблоке Feathering hinge catch).

Блок Vertical hinge содержит вертикальный шарнир с корпусом, демпфер и средства мониторинга угла отклонения лопасти в горизонтальной плоскости.

Ниже даны примеры временных диаграмм простейших режимов работы модели. Первая серия диаграмм иллюстрирует процесс раскрутки винта из исходного положения (лопасти горизонтальны, лопасть №1 направлена против полета) с последовательным увеличением угла установки (рис. 6).

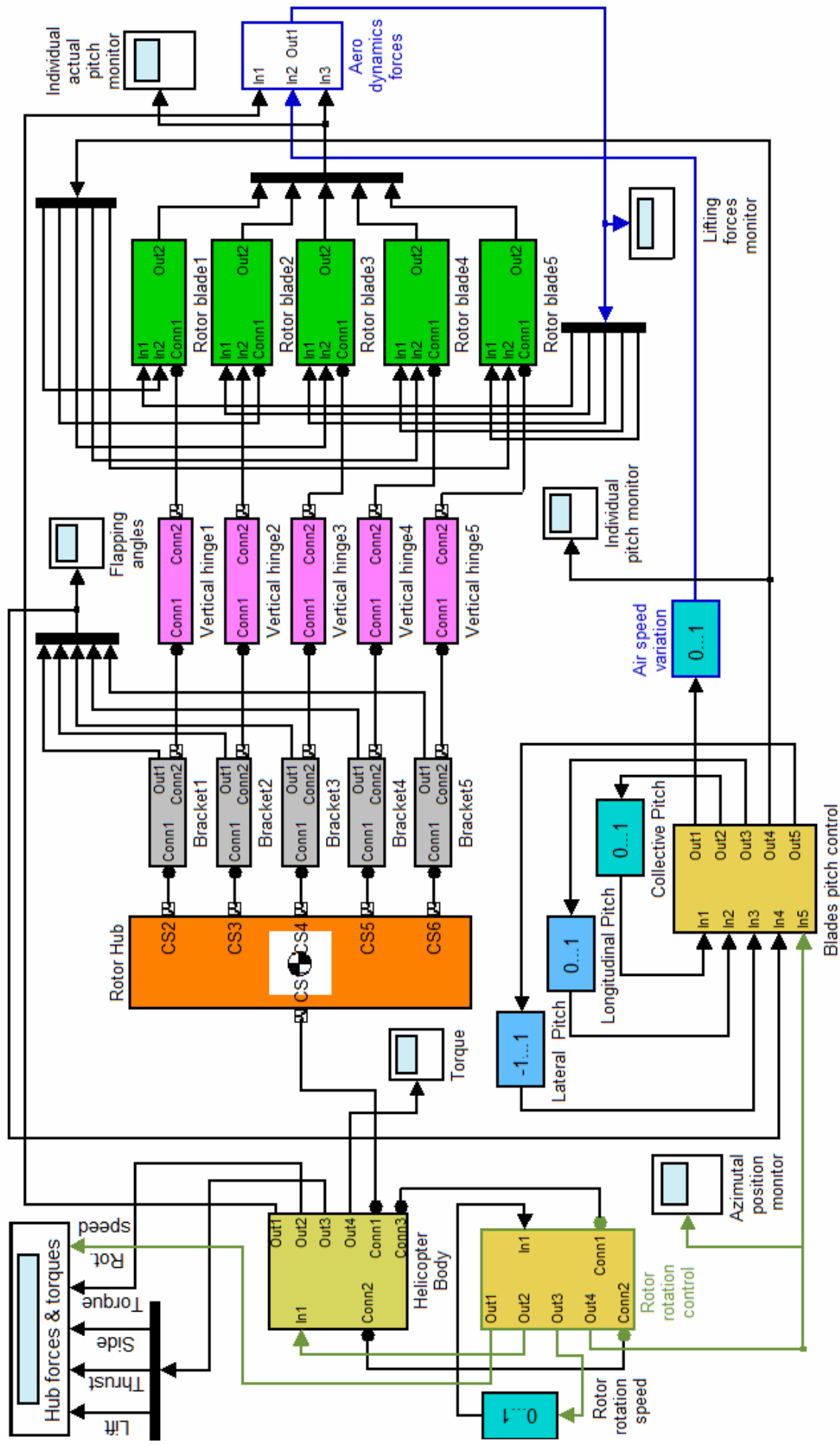


Рис.1. Структура имитационной модели пятилопастного винта вертолета МИ-8

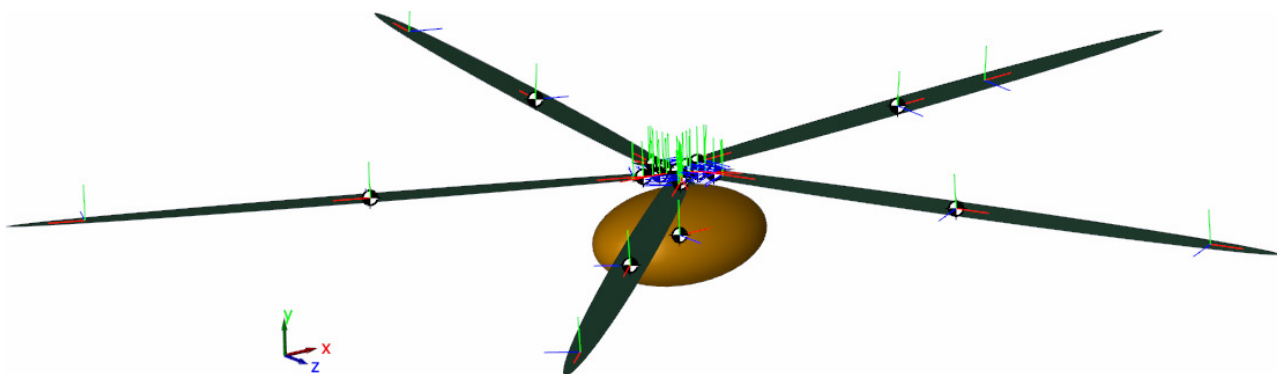


Рис.2. Общий вид 3D визуализации работы винта с шарнирно подвешенными лопастями. Стрелками показаны локальные системы координат, привязанные к центрам инерции

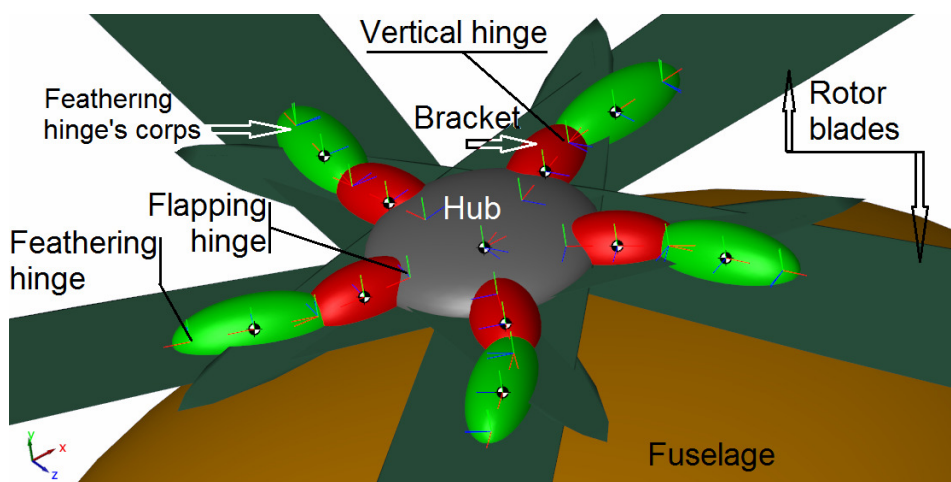


Рис.3. Увеличенный вид на втулку в начале разгона винта – заметно отставание вертикальных шарниров  
 Hub – втулка; Bracket – скоба; Rotor Blade – лопасть; Flapping hinge – горизонтальный шарнир; Vertical hinge – вертикальный шарнир; Feathering hinge – осевой шарнир

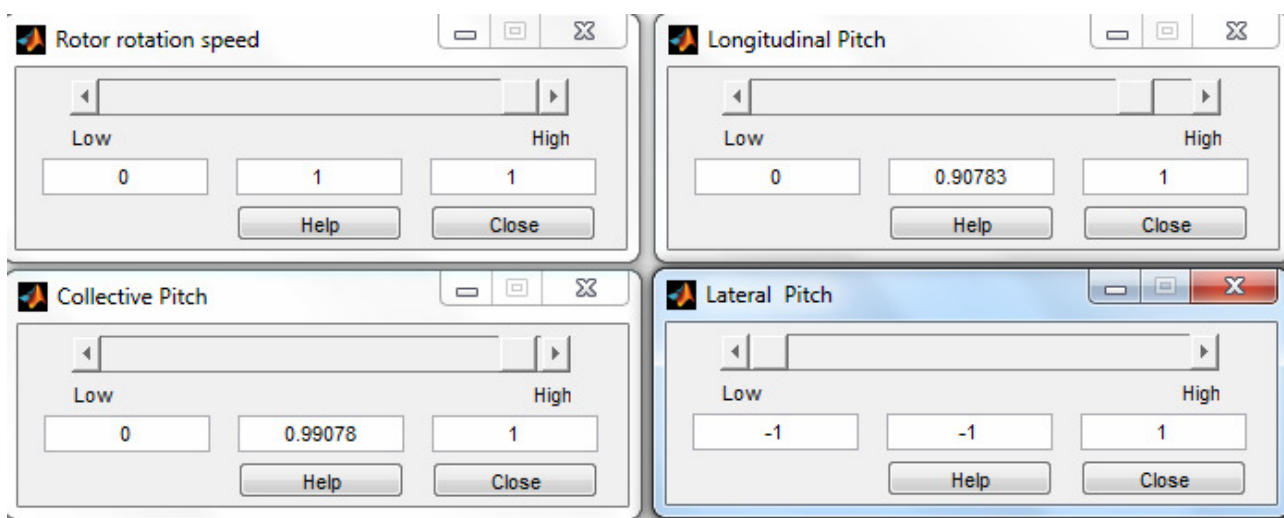


Рис.4. Движки управления скоростью вращения винта, общим и циклическим шагом (слева-направо, сверху-вниз)

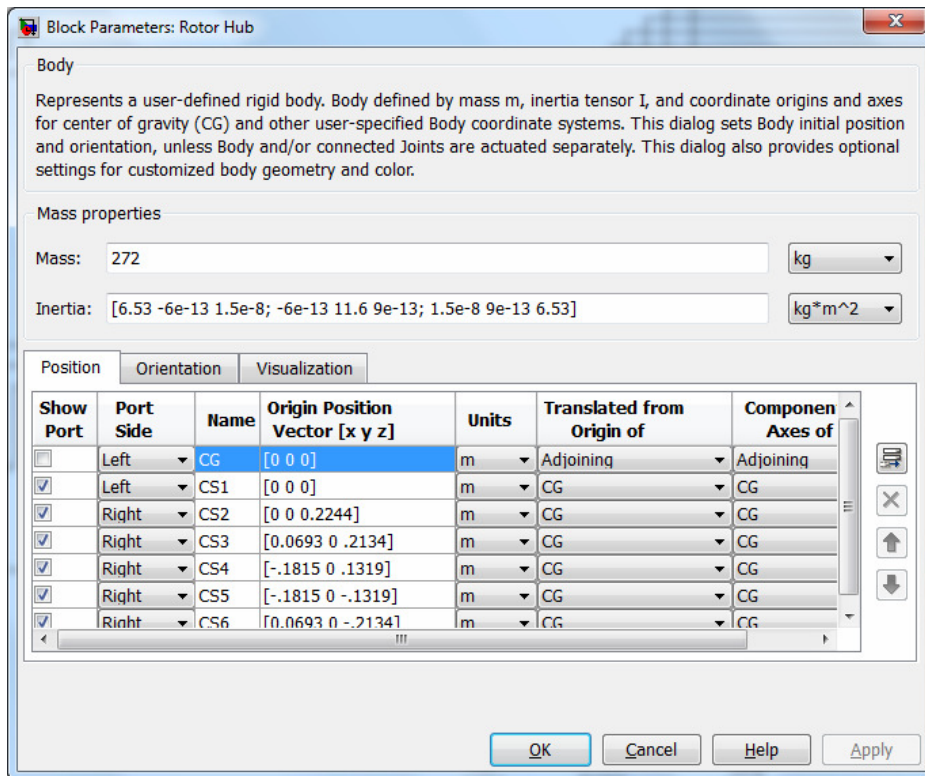


Рис. 5. Блок Rotor Hub – втулка  
(Все массо-инерционные параметры втулки рассчитаны по данным КД на вертолеты Ми-8, Ми-24)

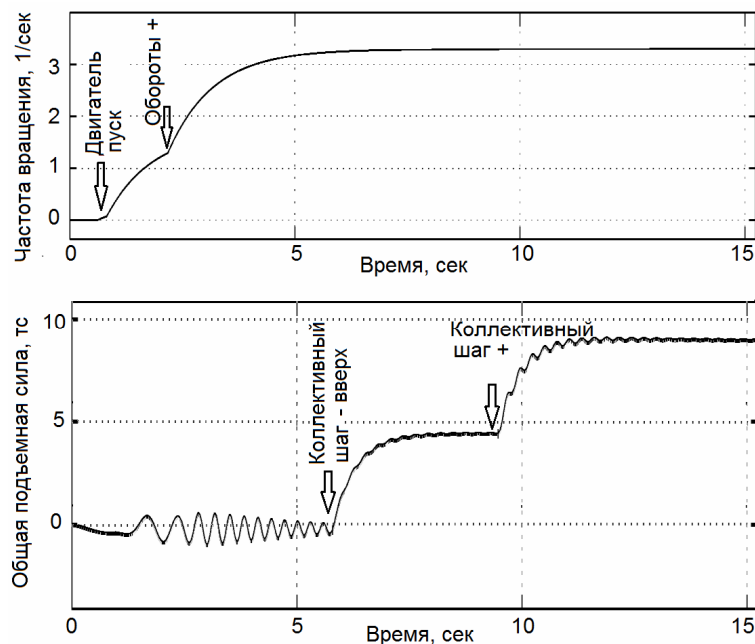


Рис. 6. Временные диаграммы частоты вращения (вверху) и подъемной силы винта (внизу)  
Двигатель запущен в момент времени 1 сек с начала симуляции, газ добавлен в момент 2,4 сек; общий шаг переведен из нейтрального положения в момент 6 сек и увеличен при 9 сек (в начальные моменты времени осцилляции подъемной силы вызваны колебаниями лопасти в горизонтальном и осевом шарнирах)

Соответствующая диаграмма углов взмаха лопастей приведена на рис.7, где интервал времени симуляции увеличен, чтобы показать циклическое изменение углов взмаха при изменении циклического шага (наклон вперед конуса винта). На диаграмме также хорошо виден начальный участок диаграммы, где колебания вызваны падением изначально ориентированных горизонтально лопастей на ограничители свеса. Соответствующая диаграмма циклического изменения углов установки дана на рис. 8.

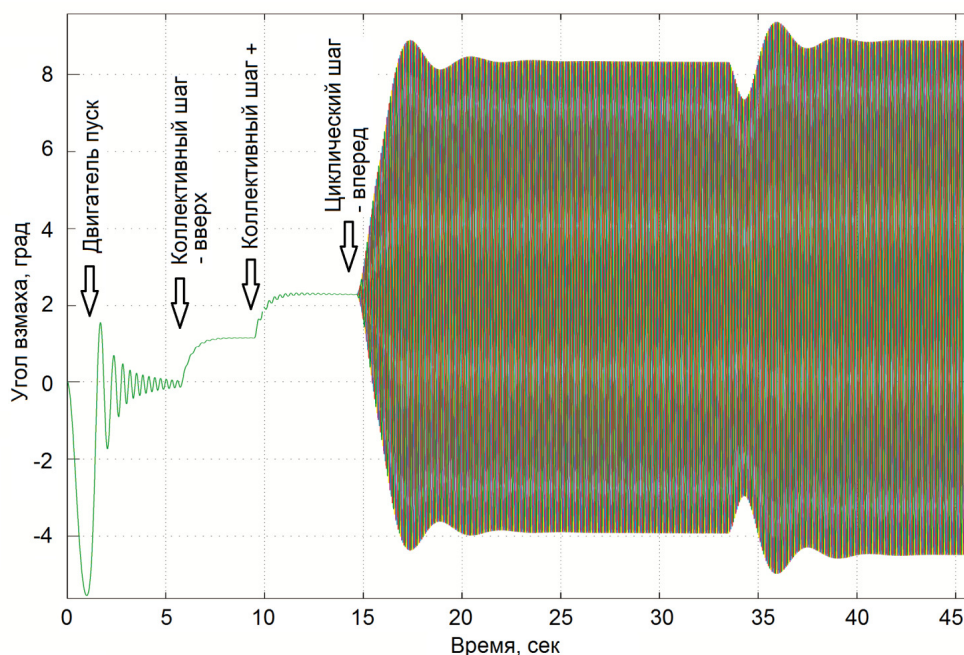


Рис. 7. Временная диаграмма углов взмаха лопастей при раскручивании винта, изменении общего и циклического шага

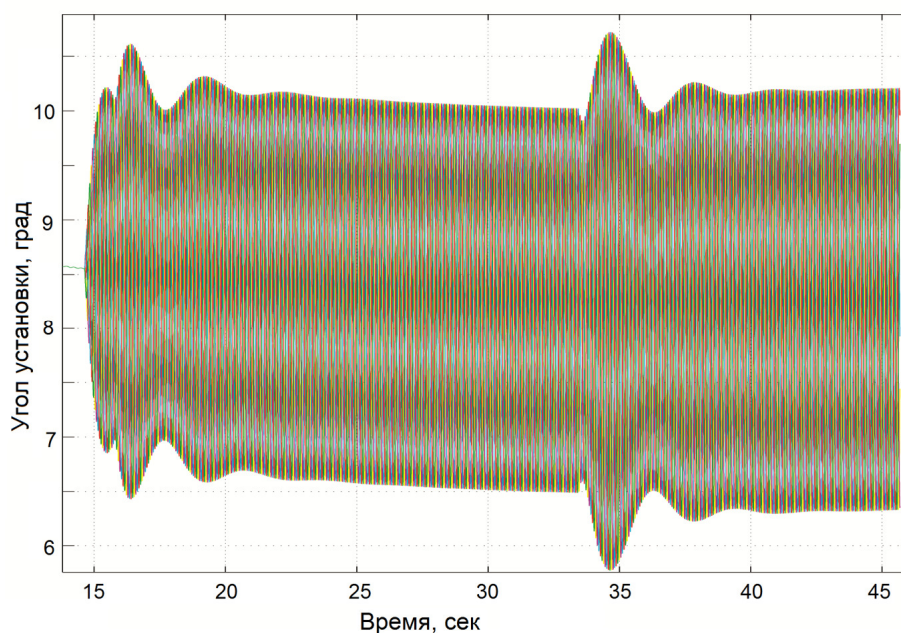


Рис. 8. Временная диаграмма углов установки лопастей изображенная, начиная с момента изменения циклического шага

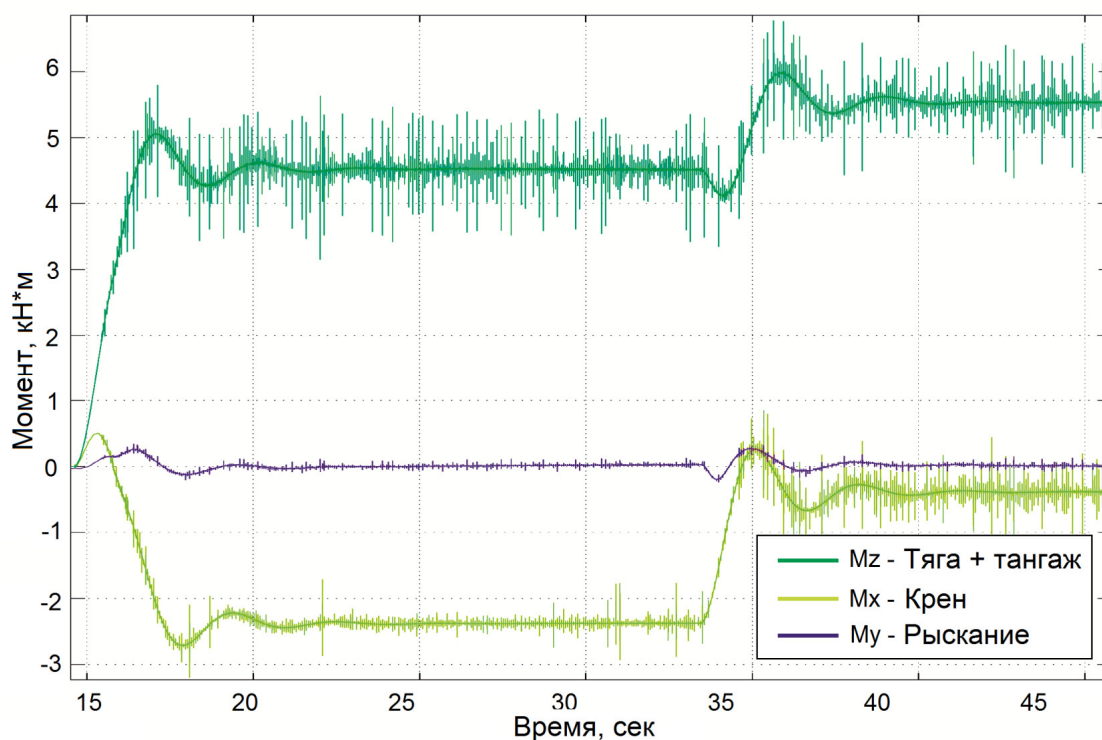


Рис. 9. Временная диаграмма моментов, приложенных к фюзеляжу со стороны втулки винта, начиная с момента изменения циклического шага (В моменты 15 и 35 сек были поданы команды продольного и поперечного управления)

Модель специально разработана для контроля сил и моментов в любой точке механической системы при использовании средств ННС (Higher Harmonic Control) – управление вибрациями винта введением высших гармоник и ИВС (Individual Blade Control) – индивидуальное управление аэродинамическими характеристиками лопастей с целью подавления вибраций. Так как среда SimMechanics обеспечивает автоматический учет всех без исключения сил механического происхождения, модель позволяет имитировать важнейшие режимы работы винта, анализировать нестационарные процессы, силы, уровни вибраций, и влияние на них алгоритмов управления ННС и ИВС. По сравнению с известными аналитическими моделями динамики винта (разработанных, в основном, в последние годы за рубежом) предложенная модель значительно более информативна и может быть использована для синтеза оптимальных регуляторов, работающих на принципах ННС и ИВС.



Представленная разработка обладает признаками научной новизны, актуальности, особенно, для создания вертолетов нового поколения с адаптивным изменением характеристик лопастей несущего винта и заслуживает премии «Авиастроитель года», присуждаемой Союзом авиапроизводителей России.

От инициатора выдвижения на участие в конкурсе

Проректор по научной  
и инновационной деятельности  
Южного федерального университета

Айдаркин Е.К.