

УДК 620.179.18+621.396.962.21+621.396.969.18

## ФАЗОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАСТЕЙ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА

© 2017 С.В. Жуков, А.И. Данилин, У.В. Бояркина, С.А. Воронцова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 25.10.2017

В статье рассматривается модернизация бесконтактного метода контроля целостности лопастей несущего винта вертолётa. Предложенный метод, основан на облучении лопастей зондирующим СВЧ-сигналом. Для повышения точности и достоверности измерений предлагается использовать одночастотный фазовый метод с модуляцией несущей для определения расстояния от приемо-передающего модуля до контролируемой лопасти. Проведена оценка погрешностей измерения предлагаемого метода.

*Ключевые слова:* лопасть, вертолёт, несущий винт, зондирующий СВЧ – сигнал, фаза сигнала, приемо-передающий модуль, погрешность метода.

### ВВЕДЕНИЕ

Несущий винт - важнейший узел вертолета, от исправности которого зависит сохранность вертолета. Контроль состояния лопастей является актуальной проблемой, а её решение позволит существенно сократить риски крушения вертолета. В результате проведенного анализа существующих методов и систем контроля целостности лопастей вертолётa, был предложен и рассмотрен бесконтактный способ контроля целостности лопастей вертолётa [1-4]. Суть метода заключается в облучении гармоническим СВЧ сигналом объекта исследования, последующем приеме и обработке отраженного информационного потока излучения, модулирующим элементом для которого служат сами лопасти несущего винта.

Анализируя параметры отражённого от лопастей зондирующего СВЧ-сигнала, можно определить следующие характеристики несущего винта:

- целостность горизонтального шарнирного крепления лопасти за счёт измерения временных интервалов между временными метками, полученными от соседних лопастей;
- целостность вертикального шарнирного крепления лопасти по амплитуде махового движения лопасти, пропорциональной разности фаз излученного и принятого отраженного сигналов;
- скручивание и угол установки лопасти посредством измерения длительности импульсного сигнала, характеризующего отра-

*Жуков Семен Викторович, аспирант кафедры радиотехники. E-mail: zhukovsv91@inbox.ru*

*Данилин Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники. E-mail: aidan@ssau.ru*

*Бояркина Ульяна Викторовна, аспирантка кафедры радиотехники. E-mail: uvbojarkina@yandex.ru*

*Воронцова Светлана Анатольевна, инженер кафедры радиотехники. E-mail: cbeta116@mail.ru*

жённый от лопасти электромагнитный поток и сравнения его с информацией об угле установки лопасти, полученной от системы датчиков бортового регистратора параметров;

- низкочастотные изгибно-крутильные колебания посредством накопления и анализа измеренных амплитуд маховых колебаний и углов скручивания лопастей;

Измерительная система, реализованная на базе предлагаемого метода, также может выявлять несоконусность установки лопастей, сближение лопастей несущих винтов вертолета в соосной схеме (рис. 1) и распознавать такие явления как земной резонанс и флаттер.

Целью настоящей работы является изучение возможности измерения амплитуды махового колебания лопасти за счет использования одночастотного фазового метода с модуляцией несущей.

### 1. ФАЗОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО КОНТРОЛИРУЕМОГО ОБЪЕКТА

Предложенный ранее амплитудный метод [1-4] определения амплитуды махового колебания лопасти имеет низкую точность вследствие малой помехозащищенности, поэтому для повышения точности измерений предлагается использовать одночастотный фазовый метод.

Фазовый метод измерения [5,6] амплитуды маховых колебаний основан на определении разности между фазовыми аргументами зондирующего излучения (опорного) и принятого отраженного (информационного) излучения от поверхности каждой лопасти. Структурная схема фазового измерителя амплитуды маховых колебаний представлена на рис. 2.

Работает измеритель амплитуды маховых колебаний следующим образом. Генератор масштабного сигнала формирует колебания с отно-

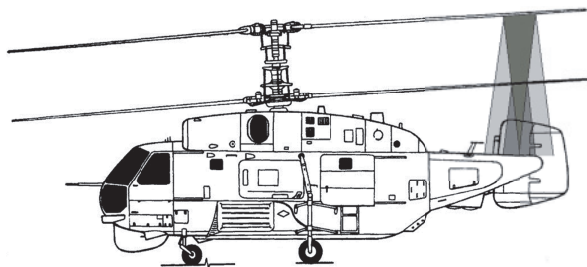


Рис. 1. Схема расположения приемо-передающего модуля на хвостовой балке вертолёта

нительно низкой частотой по сравнению с СВЧ несущей:

$$u_m = A \cos(\Omega t + \varphi_0), \quad (1.1)$$

где  $A$ ,  $\Omega$  и  $\varphi_0$  – соответственно, амплитуда, частота и начальная фаза модулирующего масштабного сигнала.

Масштабный сигнал (1.1) в модуляторе изменяют амплитуду колебаний генератора СВЧ сигнала, в результате формируется модулированное по амплитуде зондирующее СВЧ излучение:

$$u_{изл} = U_{изл} [1 + M \cos(\Omega t + \varphi_0)] \cos(\omega_0 t + \varphi'_0), \quad (1.2)$$

где  $M$  – коэффициент амплитудной модуляции;  $\omega_0$ ,  $\varphi'_0$  и  $U_{изл}$  – частота, начальная фаза и амплитуда немодулированного несущего СВЧ сигнала, соответственно.

Посредством излучающей антенны модулированный зондирующий сигнал (1.2) направляется в сторону траектории движения контролируемых лопастей, частично сигнал отражается от лопастей несущего винта вертолёта и принимается приемной АФС:

$$u_{пр} = U_{пр} \cos(\omega_0 t + \varphi') \left[ 1 + M \cos \left( \Omega(t - t_r) + \varphi_0 + \varphi_{отр} + \varphi_{изм} + \int_{t_n}^{t_k} \omega_d(t) dt \right) \right], \quad (1.3)$$

где  $U_{пр}$  – амплитуда принятого несущего сигнала;  $\varphi_{отр}$  – фазовый сдвиг, вызванный разностью хода зондирующего сигнала от лопасти до АФС;  $\varphi_{изм}$  – сдвиг фазы обусловленный задержкой в

цепях измерителя;  $t_r$  – время задержки сигнала при распространении его до лопасти и обратно;  $\omega_d(t)$  – доплеровское приращение частоты;  $t_n, t_k$  – время начала и конца наблюдения;  $\varphi'$  – приращение фазы несущего сигнала.

Доплеровское приращение частоты, с учетом рекомендаций [7], рассчитывается по формуле (1.4).

$$f_d(t) = - \frac{v_R}{\lambda_0 \mp \lambda_m} \cdot \cos(\beta(t)), \quad (1.4)$$

где  $\beta(t)$  – угол между линией визирования и направлением вектора скорости  $v_R$  движущегося объекта контроля (лопасти), изменяющийся в соответствии с траекторией движения лопасти в зоне контроля;  $\lambda_0$  – длина волны несущего сигнала;  $\lambda_m$  – длина волны масштабного сигнала.

Сигнал, отраженный от лопасти и несущий в себе информационную составляющую в виде фазового набега, выделяется посредством синхронного детектора, состоящего из перемножителя и фильтра нижних частот (ФНЧ). Сигнал с выхода перемножителя формируется следующим образом:

$$S_D = U_{пр} \cos(\omega_0 t + \varphi') \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \times \left[ 1 + M \cos \left( \Omega(t - t_r) + \varphi_0 + \varphi_{отр} + \varphi_{изм} + \int_{t_n}^{t_k} \omega_d(t) dt \right) \right],$$

Для упрощения дальнейших преобразований, обозначим:

$$\gamma = U_{пр} \left[ 1 + M \cos \left( \Omega(t - t_r) + \varphi_0 + \varphi_{отр} + \varphi_{отр} + \varphi_{изм} + \int_{t_n}^{t_k} \omega_d(t) dt \right) \right].$$

В результате на выходе перемножителя:

$$S_D = \frac{\gamma}{2} [\cos(2\omega_0 t + \varphi'' + \varphi_0) + \cos(\varphi'')],$$

где  $\varphi''$  – приращение фазовой компоненты несущего сигнала без учета начальной фазы.

После выделения огибающей в ФНЧ получаем сигнал вида:

$$S_{ФНЧ} = \cos(\varphi'') \frac{U_{пр}}{2} \times$$

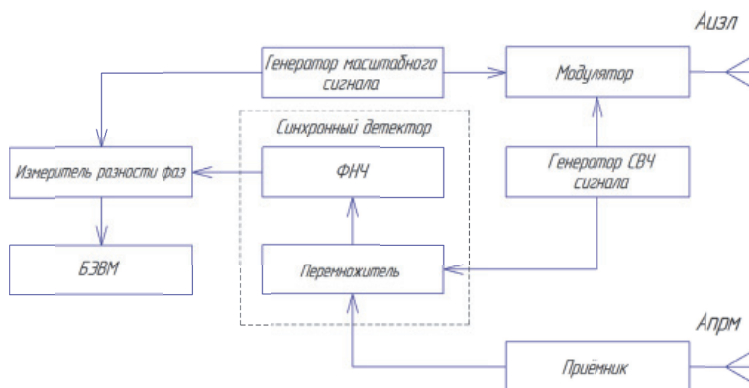


Рис. 2. Структурная схема измерителя амплитуды маховых колебаний

$$\times \left[ 1 + M \cos \left( \Omega(t - t_r) + \varphi_0 + \varphi_{\text{отр}} + \varphi_{\text{изм}} + \int_{t_n}^{t_k} \omega_d(t) dt \right) \right]. \quad (1.5)$$

Далее сигнал (1.5) поступает на измеритель разности фаз, на второй вход которого в качестве опорного подается сигнал с генератора масштабного сигнала. В измерителе разности фаз сравниваются фазы (рис. 3) опорного и принятого масштабных сигналов. Результатом сравнения является прямоугольный импульс, длительность которого определяется величиной разности сравниваемых фаз.

В свою очередь фазовый набег  $\Omega t_r$  определяется расстоянием от лопасти до АФС и согласно [6, 8] может быть представлен выражением:

$$\Omega t_r = \frac{2D\Omega}{c} = \frac{4\pi D f_m}{c} = \frac{4\pi D}{\lambda_m}, \quad (1.6)$$

где  $D$  – измеряемое расстояние;  $f_m$  – частота масштабного сигнала.

Таким образом, исходя из выражения (1.6), можно определить расстояние от АФС до лопасти:

$$D = \frac{\Omega t_r c}{4\pi f_m} = \frac{\lambda_m \Omega t_r}{4\pi}. \quad (1.7)$$

Длина волны масштабного сигнала определяется и задается исходя из максимально возможного измеряемого расстояния до контролируемой лопасти, в соответствии с выражением:

$$\lambda_m = 2D_{\text{max}},$$

где  $D_{\text{max}}$  – максимально возможное расстояние от лопасти до антенны, выбранное с учетом возможного махового колебания лопасти вертолёта.

## 2. ПОГРЕШНОСТЬ ФАЗОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДЫ МАХОВОГО КОЛЕБАНИЯ ЛОПАСТИ

Анализируя выражение (1.3) можно отметить, что помимо фазового сдвига, определяемого расстоянием до контролируемого объекта,

в преобразовании присутствуют еще и сдвиг фазы, обусловленный отражающими свойствами лопасти, задержкой фазы в цепях измерителя амплитуды маховых колебаний, а также компоненты доплеровской частоты. Вследствие того, что радиальная скорость вращения лопастей не превышает 250 м/с то для частот зондирующего излучения равной (10...20) ГГц, оценка доплеровского приращения частоты по формуле (1.4) дает пренебрежимо малую величину. Фазовый сдвиг при отражении от облучаемого объекта определяется экспериментально и для всех лопастей является одинаковым. Таким же образом при калибровке устройства учитывается и запаздывание фазы в цепях измерителя амплитуды маховых колебаний [7-10].

При формировании выражения (1.7) не принимались во внимание фазовые сдвиги, связанные с отражающими свойствами лопасти, задержкой фазы в цепях измерителя, а также доплеровским приращением частоты. Эти неучтенные компоненты дают ошибку измерения дальности:

$$\Delta D = \frac{c}{4\pi f_m} \left( \varphi_{\text{отр}} + \varphi_{\text{изм}} + \int_{t_n}^{t_k} \omega_d(t) dt \right).$$

Ошибки измерения дальности можно разделить на систематические и случайные. К систематическим относят ошибки измерения, вызываемые задержкой сигнала в цепях измерителя [11]. Систематические ошибки имеют постоянные значения, по крайней мере при использовании одних и тех же лопастей или в течение одного полёта, и могут быть скомпенсированы при калибровке датчиков в процессе подготовки к полету.

Случайные ошибки вызываются неконтролируемыми причинами, имеют случайный характер и не могут быть полностью учтены. К случайным ошибкам измерений относят ошибки, связанные с помехами или нестабильностью частоты генератора [11]. Из-за неточности установки или нестабильности масштабной частоты может возникать ошибка измерения разности фаз  $\varphi_\sigma$  [5,12]. Из выражения (1.6) следует, что  $\varphi_\sigma$  и, соответственно, ошибка измерения амплитуды маховых колебаний  $D_\sigma$  связаны соотношением:

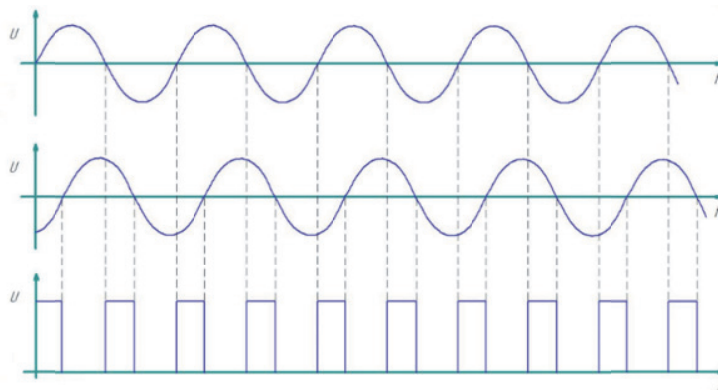


Рис. 3. Сравнение фаз излученного и принятого сигналов

$$D_{\sigma} = \frac{c \cdot \varphi_{\sigma}}{2\Omega}$$

Ошибка определения разности фаз зависит от используемой радиоэлектронной элементной базы измерителя разности фаз и отношения сигнал/шум [12]. Если помеха представляет собой белый шум, а отношение  $q_0 = P_c/P_{\text{ш}} \gg 1$ , где  $P_c$  и  $P_{\text{ш}}$  мощности сигнала и шума соответственно, то средняя квадратическая ошибка разности фаз для идеального измерителя определяется выражением:

$$\varphi_{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{q_0}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2P_c}{P_{\text{ш}}}}} \quad (2.1)$$

При увеличении мощности шумов, они начинают оказывать влияние на точность определения фазового сдвига и с уменьшением отношения  $q_0$ , ошибка  $\varphi_{\sigma}$  увеличивается. Поэтому с учетом [11] и выражения (2.1) потенциальная среднеквадратическая ошибка измерения амплитуды махового колебания фазовым методом определяется:

$$D_{\sigma} = \frac{c\varphi_{\sigma}}{4\pi f_m} = \frac{c}{2\Omega\sqrt{q_0}} = \frac{\lambda_m}{4\pi\sqrt{q_0}}$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный одночастотный фазовый метод измерения маховых колебаний лопастей, имеет более высокую точность по сравнению с амплитудным методом и относительно прост в реализации. Все возникающие ошибки могут быть сравнительно легко учтены и скомпенсированы. Предлагаемый метод может быть использован при работе со всеми типами вертолетов и установленных на них несущими винтами.

### PHASE METHOD FOR MEASURING PARAMETERS OF THE DEFORMATION STATE OF HELICOPTER ROTOR BLADES

© 2017 S.V. Zhukov, A.I. Danilin, U.V. Boyarkina, S.A. Vorontsova

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The article deals with the improvement of the non-contact method control of the helicopter rotor blades status. The proposed method based on the radiation of blades by the probe microwave signal. In order to increase accuracy and integrity, we propose a single-frequency phase method with carrier modulation for detecting distance between the transmitter-receiver module and the observable blade. The measurement error of the method have been estimated.

**Keywords:** blade, helicopter, rotor, explorative microwave signal, signal phase, transmitter-receiver module, error of method.

Semyon Zhukov, Postgraduate Student of the Radio Engineering Department. E-mail: zhukovsv91@inbox.ru  
Alexander Danilin, Doctor of Technics, Professor, Head at the Radio Engineering Department. E-mail: aidan@ssau.ru  
Ulyana Boyarkina, Postgraduate Student of the of Radio Engineering Department. E-mail: uvbojarkina@yandex.ru  
Svetlana Vorontsova, Engineer of the Department of Radio Engineering. E-mail: cbeta116@mail.ru

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков С.В., Ефименко А.А. Бесконтактный контроль целостности лопастей вертолёта // Сборник трудов «Международная молодежная научная конференция «XII Королевские чтения», Том 2. Самара, 2013. С. 124
2. Данилин А.И., Жуков С.В., Бояркина У.В., Грецов А.А. Способ контроля целостности лопастей несущего винта вертолёта и устройство для его осуществления: Пат. 2593652 (РФ). 2016.
3. Данилин А.И., Жуков С.В. Экспериментальный стенд бесконтактного контроля целостности лопастей вертолёта // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. №4(6). С. 1303-1306.
4. Данилин А.И., Жуков С.В., Попов М.С. Математическое описание взаимодействия зондирующего СВЧ-сигнала с лопастью // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15. №3. С. 178-188.
5. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. М.: Советское Радио, 1975. 79-84 с.
6. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. Издание 2-е, переработанное и дополненное. М.: Радио и связь, 1983. 108-109 с.
7. Ковалев Ф.Н. Определение координат движущихся целей по измерениям доплеровской частоты в радиолокационных системах с обнаружением «на просвет» // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 3. С. 331-339.
8. Сайбель А.Г. Основы радиолокации. М.: Советское радио, 1961. 72 с.
9. Теоретические основы радиолокации. 2-е изд., перераб. и доп. / А.А. Коростелев, Н.Ф. Клюев, Ю.А. Мельник [и др.]; [под редакцией В.Е. Дулевича]. М.: Советское Радио, 1978. 217-220 с.
10. Радиолокационные устройства (теория и принципы построения) / В.В. Васин, В.В. Григорин-Рябов, О.В. Власов, П.И. Дудник, Б.М. Степанов; [под редакцией В.В. Григорина-Рябова]. М.: Советское Радио, 1970. 19-24 с.
11. Теоретические основы радиолокации. 2-е изд., перераб. и доп. / А.А. Коростелев, Н.Ф. Клюев, Ю.А. Мельник [и др.]; [под редакцией В.Е. Дулевича]. М.: Советское Радио, 1978. 233-235 с.
12. Сайбель А.Г. Основы радиолокации. М.: Советское радио, 1961. 76 с.