

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗОНДИРУЮЩЕГО СВЧ-СИГНАЛА С ЛОПАСТЬЮ НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЁТА

© 2016

- А. И. Данилин** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, aidan@ssau.ru
- С. В. Жуков** аспирант кафедры радиотехники, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, zhukovsv91@inbox.ru
- М. С. Попов** аспирант кафедры радиотехники, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, maхpopov1990@mail.ru

В статье рассматривается бесконтактный метод контроля целостности лопастей несущего винта вертолётa. Существующие методы контроля целостности лопастей несущего винта вертолётa трудоёмки в реализации, имеют низкую надёжность и не позволяют составить общую картину состояния лопастей несущего винта в процессе полётa. Для решения задачи контроля целостности лопастей предложен метод, основанный на облучении лопасти зондирующим СВЧ-сигналом. Особое внимание уделено расчёту мощности сигнала, отражённого от лопасти несущего винта вертолётa. При выводе аналитических уравнений лопасть представляется недеформированной плоской металлической поверхностью. В результате получена пространственно-временная модель отражённого зондирующего СВЧ-сигнала от лопасти несущего винта вертолётa, параметры которой позволяют произвести оценку эксплуатационного состояния несущего винта вертолётa.

Эффективная отражающая площадь; мощность сигнала; лопасть; вертолёт; несущий винт; зондирующий СВЧ-сигнал; площадь облучаемой поверхности.

Цитирование: Данилин А.И., Жуков С.В., Попов М.С. Математическое описание взаимодействия зондирующего СВЧ-сигнала с лопастью несущего винта вертолётa // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 178-188. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-178-188

Введение

Знание деформационных характеристик лопастей несущего винта вертолётa в процессе эксплуатации позволяет выявить конструктивно-технологические недостатки или неисправности на ранней стадии их возникновения и принимать оперативные меры по их устранению.

Существующие системы контроля не дают точного и всестороннего анализа состояния несущего винта. Использование в известных системах [1; 2] оптического канала измерения деформационных характеристик лопастей не позволяет осуществить полноценное диагностирование в сложных метеоусловиях, а также при недостаточной освещённости объекта. Тензометрирование лопастей [3] сопряжено с трудностями съёма информационных сигналов с подвижных объектов и недолговечностью тензодатчиков. Другие известные способы и устройства [3; 4] не предоставляют возможности сообщить пилоту о возникновении неисправности в процессе полётa.

Метод контроля целостности несущего винта

Предлагается бесконтактный метод контроля, основанный на облучении объекта исследования СВЧ-сигналом. В качестве примера выбран несущий винт вертолётa Ми-8. Метод заключается в зондировании лопастей несущего винта вертолётa электро-

магнитным СВЧ-сигналом и последующей обработке отражённого информационного потока излучения, модулирующим элементом для которого служат сами лопасти несущего винта. Источник зондирующего СВЧ-сигнала находится на хвостовой балке вертолёта и установлен на расстоянии $2/3$ длины лопасти от оси несущего винта (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения устройства и облучения исследуемого объекта зондирующим СВЧ-сигналом

Общие соотношения для параметров принимаемого сигнала можно установить, используя зависимость мощности отражённого сигнала от расстояния до лопасти, её эффективной отражающей поверхности (ЭОП) и скорости движения этой поверхности.

Анализируя параметры отражённого от лопасти СВЧ-сигнала, можно определить:

- целостность горизонтального шарнирного крепления лопасти за счёт измерения временных интервалов между временными отметками, полученных от соседних лопастей;
- целостность вертикального шарнирного крепления лопасти по амплитуде махового движения лопасти, пропорциональной амплитуде принятого отражённого сигнала;
- скручивание и угол установки лопасти посредством измерения длительности импульсного сигнала, характеризующего отражённый от лопасти электромагнитный поток.

Для оценки необходимой мощности генератора зондирующего СВЧ-сигнала, а также подбора элементной базы и конструктивных элементов проектируемого устройства необходимо рассчитать мощность отражённого зондирующего сигнала.

Целью работы является разработка методики расчёта мощности отражённого зондирующего сигнала от лопасти несущего винта вертолёта.

Расчёт мощности отражённого сигнала

Для расчёта мощности отражённого сигнала предлагается воспользоваться уравнением радиолокации [5]. Уравнение позволяет рассчитать мощность зондирующего сигнала, отражённого от контролируемого объекта (в рассматриваемом случае – лопасти несущего винта вертолёта), с учётом параметров зондирующего СВЧ-потока, параметров приёмопередающей антенны, характеристик контролируемого объекта и расстояния до него.

Без учёта переотражений от элементов конструкции вертолёта мощность принятого сигнала определяется по соотношению:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r (F_{np} F_{nep})^2 S_0 \lambda^2 \eta_{np} \eta_{nep} L^4}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2}, \quad (1)$$

где P_r – мощность сигнала на входе приёмной антенны; P_t – мощность радиопередатчика; G_t – коэффициент усиления передающей антенны; G_r – коэффициент усиления приёмной антенны; λ – длина волны СВЧ-сигнала; F_{nep} – амплитудное распределение поля антенны на передачу; F_{np} – амплитудное распределение поля антенны на приём; S_0 – эффективная отражающая площадь контролируемого объекта; L – коэффициент потерь при распространении радиоволн; R_t – расстояние от передатчика до контролируемого объекта; R_r – расстояние от контролируемого объекта до приёмника; η_{np} , η_{nep} – собственно КПД приёмной и передающей антенны.

В процессе отражения от лопасти зондирующий СВЧ-сигнал претерпевает ряд изменений, обусловленных свойствами отражающих (рассеивающих) объектов. В силу того, что расстояние до контролируемого объекта невелико, потерями мощности сигнала (L) в атмосфере можно пренебречь [5].

При использовании моностатического зондирования предполагается, что передатчик и приёмник находятся на одинаковом расстоянии от контролируемого объекта: $R_t = R_r = R$, а также используется одна приёмопередающая антенна: $G_t = G_r = G$; $\eta_{np} = \eta_{nep} = \eta$. Кроме этого, для упрощения преобразований принимается, что амплитудное распределение поля антенны на приём и на передачу одинаковы. Таким образом, (1) приводится к виду:

$$P_r = \frac{P_t G^2 F^4 S_0 \lambda^2 \eta^2}{(4\pi)^3 R^4}, \quad (2)$$

где G – коэффициент усиления приёмопередающей антенны; η – КПД приёмопередающей антенны.

Эффективная отражающая площадь лопасти вертолѐта

Поскольку радиус кривизны лопасти вертолѐта много больше длины волны предполагаемого зондирующего излучения ($\lambda \leq 9$ мм), то лопасть, согласно рекомендациям [6], можно представить недеформированной однородной плоской отражающей поверхностью, которая покрыта металлической обшивкой, а её ЭОП, согласно [6], можно определить следующим выражением:

$$S_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_S e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R} dS \right|^2 \cos^2(\bar{n}, \bar{r}). \quad (3)$$

Здесь \bar{n} – единичный вектор нормали к поверхности контролируемого объекта; \bar{r} – единичный вектор направления на первичный СВЧ-преобразователь; λ – длина волны зондирующего излучения; R – расстояние между контролируемым объектом поверхности и точкой приёма; S – площадь облучаемой поверхности; \bar{n}, \bar{r} – угол между нормалью к облучаемой поверхности и вектором направления на зондирующую антенну.

Для упрощения выражения (3) обозначим: $\cos(\bar{n}, \bar{r}) = \cos(\gamma)$ и введѐм обозначение:

$$S_{obl} = \int_S e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R} dS.$$

После этого, подставляя (3) для эффективной площади рассеивания в (2), получим:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \eta^2 F^4 \cos^2(\gamma) S_{обл}^2}{(4\pi)^2 R^4}. \quad (4)$$

Моделирование

Для получения аналитических выражений введём декартову систему координат, в которой начало системы координат соответствует центру оси несущего винта вертолѐта. Контролируемая область лопасти показана на рис. 2.

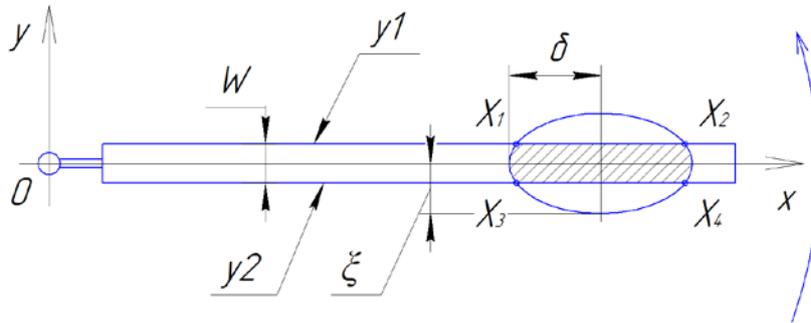


Рис.2. Область контролируемой лопасти в декартовой системе координат

При вращении несущего винта каждая лопасть проходит через зону облучения зондирующим СВЧ-сигналом, меняя значение ЭОП.

Для моделирования изменения ЭОП лопасти необходимо определить площадь облучаемой поверхности во времени (облучаемая поверхность показана заштрихованной областью на рис. 2) в те моменты, когда лопасть проходит через зону облучения.

Для вычисления площади облучаемой поверхности лопасти необходимо учитывать форму (F), а также ширину диаграммы направленности в E и H плоскости СВЧ-преобразователя (θ_E, θ_H).

Согласно рекомендациям [7], амплитудное распределение антенной системы можно представить выражением:

$$F = \int_S f(x, y) dS;$$

$$f(x, y) = \left[t_p + (1-t_p) \cos^n \frac{\pi x}{L_b} \right] \left[l_p + (1-l_p) \cos^m \frac{\pi y}{L_p} \right],$$

где x, y – координаты точек распределения поля; $t_p, l_p \in (0,1)$; $n, m = 0,1,2, \dots$ – параметры распределения поля; L_b и L_p – параметры раскрыва антенны; S – площадь облучаемой поверхности.

В результате амплитудное распределение антенной системы запишется в виде:

$$F = \int_S \left[t_p + (1-t_p) \cos^n \frac{\pi x}{L_b} \right] \left[l_p + (1-l_p) \cos^m \frac{\pi y}{L_p} \right] dS. \quad (5)$$

Используя (5) и выбирая необходимым образом вышеперечисленные его параметры, можно с достаточной для практического применения точностью аппроксимировать всевозможные реальные распределения. Амплитудное распределение поля антенны в данной работе принимается косинусным, как самое распространѐнное при практическом использовании.

Для определения параметров эллипса, сформированного пересечением поверхности лопасти с диаграммой направленности антенны, необходимо определить большую и малую полуось ξ и σ (рис. 2). Для упрощения последующих выкладок обозначим: $2/3R_{\text{лопасти}} = R'$.

Тогда с учётом расположения лопасти и параметров диаграммы направленности антенной системы можно записать:

$$\xi = R \operatorname{tg}\left(\frac{\theta_E}{2}\right); \quad \sigma = R \operatorname{tg}\left(\frac{\theta_H}{2}\right). \quad (6)$$

Уравнение эллипса в соответствии с рекомендациями [8] запишется в виде:

$$\frac{(x - R')^2}{\xi^2} + \frac{y^2}{\sigma^2} = 1. \quad (7)$$

Разрешая уравнение (7) относительно $y_{\text{эл}}$, получаем выражение:

$$y = \sqrt{\sigma^2 - \frac{(x - R')^2 \sigma^2}{\xi^2}}. \quad (8)$$

Представим границы лопасти в виде двух параллельных прямых y_1, y_2 , определяемых уравнениями:

$$y_1(\tau) = k(\tau)x + \frac{L}{2}; \quad (9)$$

$$y_2(\tau) = k(\tau)x - \frac{L}{2}; \quad (10)$$

где $k(\tau)$ – угловой коэффициент, характеризующий наклон прямой; τ – момент времени.

Прямые y_1, y_2 расположены друг от друга на расстоянии L (рис. 2), которое зависит от ширины профиля W и угла установки лопасти α (рис. 3):

$$L = W \cos(\alpha), \quad (11)$$

где L – проекция ширины профиля лопасти вертолёта на плоскость, параллельную плоскости излучателя СВЧ-сигнала.

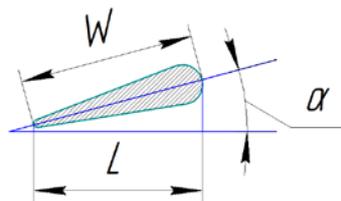


Рис. 3. Параметры установки и поперечное сечение профиля лопасти несущего винта вертолёта

Для моделирования вращения лопасти предлагается изменять угловой коэффициент $k(\tau)$ каждой прямой во времени, и при этом будет изменяться расстояние от кромки лопасти до оси x . Граничные условия для анализируемого положения прямых при изменении k определяются следующими соображениями:

1. Передняя кромка лопасти y_1 пересекается с границей зоны облучения на расстоянии σ от оси x в момент времени τ_1 :

$$y_1 = k(\tau_1)x + \frac{L}{2} = -\sigma; \quad (12)$$

$$k(\tau_1) = \frac{-\sigma + \frac{L}{2}}{x}.$$

2. Задняя кромка лопасти y_2 пересекается с границей зоны облучения на расстоянии σ от оси x в момент времени τ_2 :

$$y_2 = k(\tau_2)x - \frac{L}{2} = \sigma; \quad (13)$$

$$k(\tau_2) = \frac{\sigma - \frac{L}{2}}{x}.$$

Из (12) и (13) получаем мгновенное значение углового коэффициента:

$$k(\tau) = \operatorname{tg} \left[-\operatorname{arctg} \left(\frac{-\sigma + \frac{L}{2}}{x} \right) + 2\pi\tau N \right], \quad (14)$$

где N – количество оборотов в минуту несущего винта вертолёта.

Для расчёта необходимо знать точки пересечения x_1, x_2, x_3, x_4 эллипса и линий границ лопасти (рис. 2).

Приравняв выражения (8) и (9) и решив полученное квадратное уравнение, получаем точки пересечения (x_1, x_2) в любой момент времени:

$$k(\tau)^2 x^2 \xi^2 + Lk(\tau) \xi^2 + \left(\frac{L}{2} \right)^2 \xi^2 - \xi^2 \sigma^2 + \sigma(x - R')^2 + \sigma^2 x^2 - 2R'\sigma^2 + x(R')^2 \sigma^2 = 0, \quad (15)$$

$$x_1 = \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1}; \quad x_2 = \frac{-b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1},$$

где $a_1 = \xi^2 k(\tau)^2 + \sigma^2$; $b_1 = Lk(\tau) \xi^2 - 2\sigma^2 R'$; $c_1 = \sigma^2 (R')^2 - \xi^2 \sigma^2 + \left(\frac{L}{2} \right)^2 \xi^2$.

Аналогично, приравняв (8) и (10), определим точки пересечения (x_3, x_4) :

$$k(\tau)x - \frac{L}{2} = \sqrt{\sigma^2 - \frac{(x - R')^2 \sigma^2}{\xi^2}}; \quad (16)$$

$$x_3 = \frac{-b_2 + \sqrt{b_2^2 - 4a_2c_2}}{2a_2}; \quad x_4 = \frac{-b_2 - \sqrt{b_2^2 - 4a_2c_2}}{2a_2},$$

где $a_2 = \xi^2 k(\tau)^2 + \sigma^2$; $b_2 = 2\sigma^2 R' + Lk(\tau) \xi^2$; $c_2 = \sigma^2 (R')^2 - \xi^2 \sigma^2 + \left(\frac{L}{2} \right)^2 \xi^2$.

Для определения площади облучаемой поверхности лопасти в любой временной промежуток рассмотрим три её возможных положения:

- первый случай – только передняя кромка лопасти находится в области облучения (рис. 4);
- второй случай – и передняя и задняя кромки находятся в области облучения (рис. 5);
- третий случай – только задняя кромка лопасти находится в области облучения (рис. 4).

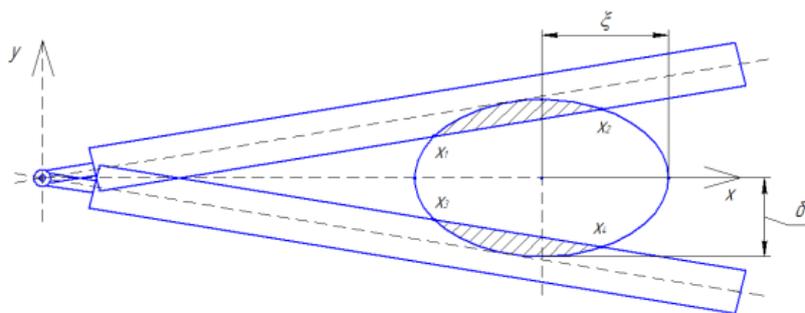


Рис. 4. Облучаемая поверхность лопасти в первом и третьем случаях

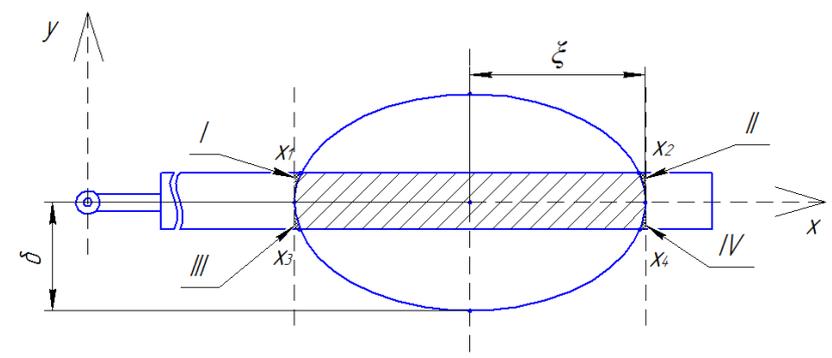


Рис. 5. Облучаемая поверхность лопасти во втором случае

Определим зависимость $k(\tau)$ для первого случая. Приравняв выражения y_1 и y_2 к σ , можно получить угловой коэффициент линии переднего и заднего края лопасти в любой момент времени:

$$y_1 = k(\tau)x + \frac{L}{2} = -\sigma; \quad k(\tau) = \frac{-\sigma + \frac{L}{2}}{x};$$

$$y_2 = k(\tau)x - \frac{L}{2} = -\sigma; \quad k(\tau) = \frac{-\sigma - \frac{L}{2}}{x}.$$

Значения $k(\tau)$ для первого случая будут варьироваться в пределах:

$$\frac{-\sigma + \frac{L}{2}}{x} \leq k(\tau) \text{ – для передней кромки; } \frac{-\sigma - \frac{L}{2}}{x} \geq k(\tau) \text{ – для задней кромки.}$$

В результате площадь облучаемой поверхности $S_{обл}$ в первом случае определится (заштрихованная область на рис. 4), согласно [6; 8], по следующей формуле:

$$S_{обл1} = \int_{R'-\xi}^{x_4} dx \int_{y_2}^{y_{2n}} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R} dy. \quad (17)$$

Аналогично выводятся значения $k(\tau)$ для второго случая, когда и передняя и задняя кромки находятся в области облучения. Приравняв y_1 и y_2 к σ , можно получить угловой коэффициент линии переднего и заднего края лопасти в любой момент времени. Значения $k(\tau)$ для второго случая будут варьироваться в пределах:

$$\frac{-\sigma + \frac{L}{2}}{x} \leq k(\tau) \leq \frac{\sigma + \frac{L}{2}}{x} \text{ – для передней кромки; } \frac{\sigma - \frac{L}{2}}{x} \geq k(\tau) \text{ – для задней кромки.}$$

Площадь облучаемой поверхности $S_{обл2}$ во втором случае (заштрихованная область на рис. 5), согласно [6; 8], может быть определена выражением:

$$S_{обл2} = \int_{R'-\xi}^{R'+\xi} dx \int_{y_1}^{y_2} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R} dy - \left[\int_{R'-\xi}^{x_1} dx \int_{y_{2n}}^{y_1} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R} dy \right] - \left[\int_{x_2}^{R'+\xi} dx \int_{y_{2n}}^{y_1} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R} dy \right] - \left[\int_{R'-\xi}^{x_3} dx \int_{y_2}^{-y_{2n}} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R} dy \right] - \left[\int_{x_4}^{R'+\xi} dx \int_{y_2}^{-y_{2n}} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R} dy \right]. \quad (18)$$

Аналогично получают значения $k(\tau)$ для третьего случая, когда только задняя кромка лопасти находится в области облучения. Приравнивая y_1 и y_2 к σ , можно получить угловой коэффициент линии переднего и заднего края лопасти в любой момент времени. Значения $k(\tau)$ для третьего случая будут варьироваться в пределах:

$$\frac{\sigma + \frac{L}{2}}{x} \geq k(\tau) \text{ – для передней кромки; } \frac{\sigma - \frac{L}{2}}{x} \leq k(\tau) \text{ – для задней кромки.}$$

Площадь облучаемой поверхности $S_{обл3}$ в третьем случае (заштрихованная область на рис. 4), согласно [6; 8], определим выражением:

$$S_{обл3} = \int_{R'-\xi}^{x_2} dx \int_{-y_{2n}}^{y_1} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R} dy. \quad (19)$$

Аналогично из выражения (5) получим значения F для трёх случаев:

$$F_1 = \int_{R'-\xi}^{x_4} dx \int_{y_2}^{y_{2n}} f(x, y) dy; \quad F_3 = \int_{R'-\xi}^{x_2} dx \int_{-y_{2n}}^{y_1} f(x, y) dy;$$

$$F_2 = \int_{R'-\xi}^{R'+\xi} dx \int_{y_1}^{y_2} f(x, y) dy - \left[\int_{R'-\xi}^{x_1} dx \int_{y_{2n}}^{y_1} f(x, y) dy \right] - \left[\int_{x_2}^{R'+\xi} dx \int_{y_{2n}}^{y_1} f(x, y) dy \right] - \left[\int_{R'-\xi}^{x_3} dx \int_{y_2}^{-y_{2n}} f(x, y) dy \right] - \left[\int_{x_4}^{R'+\xi} dx \int_{y_2}^{-y_{2n}} f(x, y) dy \right].$$

В конечном итоге, подставляя поочерёдно $F_1, F_2, F_3, S_{обл1}, S_{обл2}, S_{обл3}$ в (4), можно построить временную зависимость мощности отражённого сигнала от лопасти несущего винта вертолёта.

При расчёте мощности отражённого сигнала использовались характеристики вертолёта Ми-8, у которого частота вращения винта $N = 192$ об/мин и ширина профиля лопасти $W = 0,52$ м [4], характеристики генератора СВЧ-сигнала (Тигель-8) с частотой 35 ГГц ($\lambda = 8,6$ мм), мощностью излучения $P_i = 8$ мВт и характеристики антенны с коэффициентом усиления $G = 10$ и КПД $\eta = 0,95$. При помощи программного пакета Mathcad 15.0 был реализован предложенный вариант расчёта и на рис. 6 представлены его результаты.

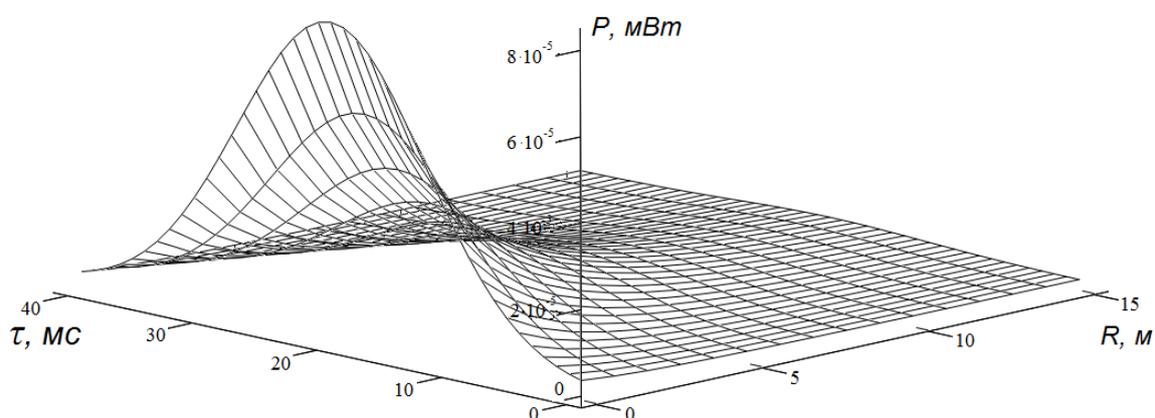


Рис. 6. Временная зависимость мощности сигнала, отражённого от лопасти

Заключение

Предложенная методика расчёта мощности отражённого зондирующего потока СВЧ-излучения от движущейся лопасти несущего винта вертолёта позволяет определить мощность отражённого сигнала в любой момент времени и его длительность на любом расстоянии от лопасти. Таким образом, используя данную модель взаимодействия зондирующего СВЧ-сигнала с лопастью можно определить требуемые характеристики для СВЧ-преобразователя, необходимые для получения достоверных данных о состоянии лопастей вертолёта.

Библиографический список

1. Moir Ch.I. Helicopter blade position detector: Patent US, no. 8190393. Publ. 29.05.2012, PCT/GB2007/001823.
2. Борисов Ю.А., Левко Г.В., Муравьев А.Ю. Способ измерения несоконусности лопастей несущего винта вертолёта и устройство для его осуществления: патент РФ № 2415053 С1; опубл. 27.03.2011, бюл. № 9.
3. Антропов В.Ф., Мартынов А.К., Бураков Г.Б., Дьяченко А.С. Экспериментальные исследования по аэродинамике вертолётов. М.: Машиностроение, 1980. 240 с.
4. Вертолёт Ми-8. Техническое описание. Книга 1. М.: Внешторгиздат, 1986. 120 с.
5. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.
6. Сайбель А.Г. Основы радиолокации. М.: Советское радио, 1961. 384 с.

7. Шелухин О.И. Радиосистемы ближнего действия. М.: Радио и связь, 1989. 230 с.
8. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. Л.: ОГИЗ, 1948. 556 с.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE INTERACTION BETWEEN A PROBING MICROWAVE SIGNAL AND THE HELICOPTER MAIN ROTOR BLADE

© 2016

- A. I. Danilin** Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Radio Engineering Department, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, aidan@ssau.ru
- S. V. Zhukov** postgraduate student of the Radio Engineering Department, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, zhukovsv91@inbox.ru
- M. S. Popov** postgraduate student of the Radio Engineering Department, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, maxpopov1990@mail.ru

The paper deals with the non-contact method of monitoring the integrity of the main rotor blades of a helicopter. The available methods of monitoring the integrity of the main rotor blades of the helicopter are labor-intensive to implement, their reliability is low and they do not allow drawing a general picture of the state of rotor blades in flight. To solve this problem a method based on illumination of the blades by a probing microwave signal is proposed. Particular attention is given to the calculation of the power of the signal reflected from the helicopter main rotor blades. In deriving analytic equations it is assumed that a rotor blade is an undeformed flat metal surface. As a result, a spatial-temporal model of a probing SHF signal reflected from a helicopter's main rotor blade has been obtained and the parameters of the model make it possible to assess the operational status of the main rotor of the helicopter.

Effective radar cross-section; signal power; blade; helicopter; main rotor; probing microwave signal; area of exposed surface.

Citation: Danilin A.I., Zhukov S.V., Popov M.S. Mathematical description of the interaction between a probing microwave signal and the helicopter main rotor blade. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 178-188. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-178-188

References

1. Moir Ch.I. Helicopter blade position detector: Patent US, no. 8190393. Publ. 29.05.2012, PCT/GB2007/001823.
2. Borisov Y.A., Levko G.V., Muravev A.Y. *Sposob izmereniya nesokonushnosti lopastey nesushchego vinta vertoleta i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method to measure non-in-track condition of helicopter rotor blades and device for its realization]. Patent RF, no. 2415053 C1, 2011. (Publ. 27.03.11, bull. no. 9).
3. Antropov V.F., Martynov A.K., Burakov G.B., D'yachenko A.S. *Eksperimental'nye issledovaniya po aerodinamike vertoletov* [Experimental study of helicopter aerodynamics]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980. 240 p.
4. *Vertolet Mi-8. Tekhnicheskoe opisanie. Kniga 1* [Helicopter MI-8. Technical details. Book 1]. Moscow: Vneshtorgizdat Publ., 1986. 120 p.
5. Finkelshtein M.I. *Osnovy radiolokatsii* [Basics of radiolocation]. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1983. 536 p.

6. Saybel A.G. *Osnovy radiolokatsii* [Basics of radiolocation]. Moscow: Sovetskoe Radio Publ., 1961. 384 p.

7. Shelukhin O.I. *Radiosistemy blizhnego deystviya* [Short-range radio systems]. Moscow: Radio i Svyaz' Publ., 1989. 230 p.

8. Bronshtien I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike* [Reference book on mathematics]. Leningrad: OGIZ Publ., 1948. 556 p.