

УДК 621.548

Р.В. Кальныш

## ГЕОМЕТРИЯ ЛОПАСТИ ДЛЯ МАКСИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ И МИНИМАЛЬНОГО УРОВНЯ ШУМА

*Рассмотрены разработанные ранее методика и программа расчета, которые позволяют получить геометрию лопасти с оптимальным коэффициентом мощности и минимальным уровнем шума.*

*Розглянуто розроблені раніше методику та програму розрахунків, які дозволяють одержати геометрію лопаті з оптимальним коефіцієнтом потужності й мінімальним рівнем шуму.*

*The earlier developed calculation procedure and program are considered that allow obtaining the blade geometry with optimal power coefficient and minimal noise level.*

Общим для ряда методик оптимизации геометрии лопастей является подход, основанный на гипотезе плоских сечений. При этом каждое сечение лопасти, в том числе и по теории элементарных струй, обтекается воздушным потоком независимо друг от друга. Тогда сформулируем критерий оптимальной геометрии лопасти. Лопасть будем считать оптимальной, если в каждом ее сечении будет реализован максимальный коэффициент мощности.

Используя для расчета аэродинамических характеристик ротора теорию элементарных струй [1] и метод решения, предложенный в [2], можно разработать методику для оптимизации геометрии лопасти.

Решая систему уравнений (1) для ламинарного режима или (2) на режиме турбулентного следа, по методике [2] и по найденным значениям углов притекания  $\beta$  и атаки  $\alpha$  определяем относительные осевую  $\bar{v}_1$  и окружную  $\bar{u}_1$  индуктивные составляющие скорости, по которым, в свою очередь, определяем коэффициенты движущего момента (3) и мощности (4) в сечении лопасти:

$$\begin{cases} \Phi(\beta) = (z\bar{r} \sin \beta - \cos \beta)(8\bar{r} \sin \beta + \sigma C_x(\alpha)) + \\ + \sigma C_y(\alpha)(z\bar{r} \cos \beta + \sin \beta) = 0; \\ \beta - \alpha - \varphi = 0; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Phi_1(\beta) = \operatorname{tg} \beta - \frac{\bar{v}_1}{z\bar{r} + \bar{u}_1}; \\ \beta - \alpha - \varphi = 0; \end{cases} \quad (2)$$

$$C_M^l = 8(1 - \bar{v}_1)\bar{u}_1\bar{r}^2; \quad (3)$$

$$C_N^l = 8z(1 - \bar{v}_1)\bar{u}_1\bar{r}^2. \quad (4)$$

Численно проводя вариацию по коэффициенту заполнения  $\sigma$  (5) и углу крутки  $\varphi$  (6), находим максимальный коэффициент мощности в сечении ( $C_N^l = \max$ ). Значения  $\sigma$  и  $\varphi$ , при которых реализуется  $C_N^l \max$ , и будут оптимальными параметрами для рассматриваемого сечения лопасти:

$$\sigma = \frac{Lb}{\pi R}; \quad (5)$$

$$\varphi_{\text{кр}} = \beta - \alpha. \quad (6)$$

Также необходимо отметить, что учет концевых потерь в теории воздушного винта проводится с помощью корректирующего множителя Прандтля  $F(\bar{r})$  для циркуляции  $\Gamma(\bar{r})$  на радиусе  $\bar{r}$  [1, 3, 4].

$$\Gamma(\bar{r}) = 0,5W(\bar{r})C_y(\alpha, \bar{r})b(\bar{r})LF(\bar{r});$$

$$F(\bar{r}) = \frac{2 \arccos \left[ \operatorname{Exp} \left( \frac{-(1 - \bar{r})L}{2\bar{r} \sin \beta} \right) \right]}{\pi}.$$

Так как подъемная сила определяется

циркуляцией, то учет корректирующего множителя Прандтля проводился через коэффициент подъемной силы (аналогично пересчету коэффициента подъемной силы для крыла конечного размаха):

$$C_y(\alpha) = C_y^1(\alpha)F(\bar{r}),$$

где  $C_y^1(\alpha)$  – коэффициент подъемной силы профиля бесконечного удлинения.

Учитывая изложенное, получим оптимальные геометрические характеристики лопасти с максимальным коэффициентом мощности с учетом концевых потерь по Прандтлю.

В качестве тестовой задачи был проведен расчет оптимальной геометрии лопасти профиля NASA 63-621 с постоянной относительной толщиной  $\bar{c} = 0,21$ . Зависимости коэффициентов подъемной силы, силы лобового сопротивления и аэродинамического качества от угла атаки для профиля NASA 63-621 приведены на рис. 1. Результаты оптимизации лопасти (по предлагаемой методике) для  $z=9$  (в безразмерном виде) приведены на рис. 2, 3.

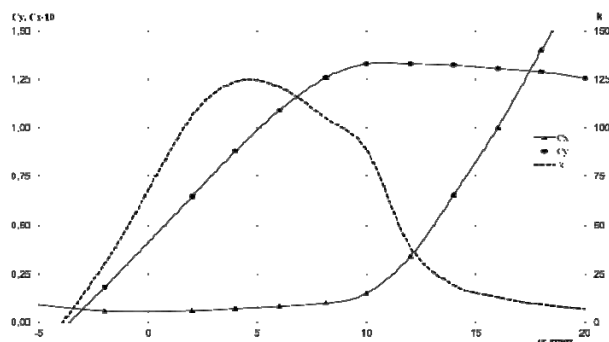


Рис. 1. Аэродинамические характеристики профиля NASA 63-621

На рис. 2 приведена расчетная геометрия лопасти без учета концевых потерь. Хорда  $b$  и угол крутки  $\varphi$  монотонно уменьшаются по длине лопасти при постоянстве угла атаки  $\sim 40$  ( $\alpha \sim 0,07$  рад).

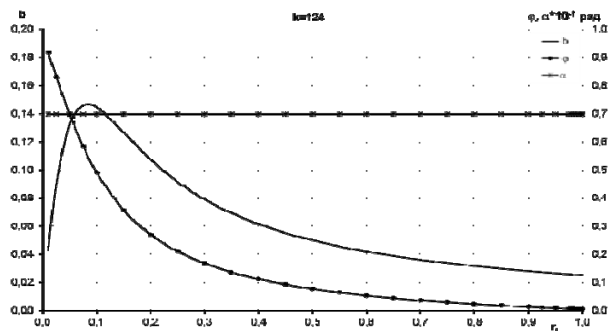


Рис. 2. Распределение хорды и угла крутки по длине лопасти без учета концевых потерь по Прандтлю при  $C_N=0,540$

На рис. 3 приведена расчетная геометрия с учетом прандтлевских потерь. Необходимо обратить внимание на геометрию концевой части лопасти.

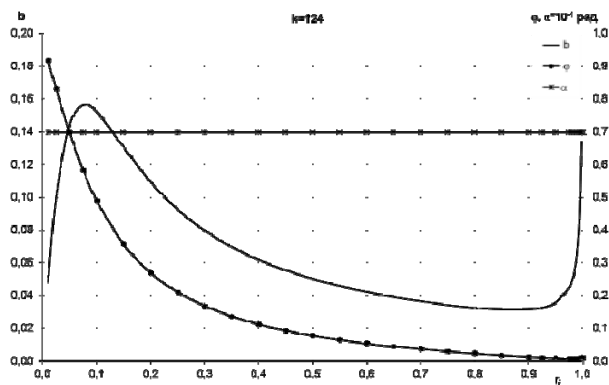


Рис. 3. Распределение хорды и угла крутки по длине лопасти с учетом концевых потерь по Прандтлю при  $C_N=0,531$

Начиная с  $\bar{r} = 0,85$ , для компенсации потерь на концевой части лопасти отмечается рост хорды, углов крутки и атаки. Такая геометрия концевой части лопасти позволяет максимально уменьшить концевые потери, а возможно, и уровень шума в процессе работы. Но в связи с тем, что данную конструкцию концевой части лопасти очень сложно реализовать на практике, необходимо рассмотреть другие варианты снижения уровня шума лопасти.

Необходимо отметить, что максимум коэффициента мощности реализуется на угле атаки, соответствующем максимальному аэродинамическому качеству профиля  $k = C_y/C_x$  (рис. 4), однако можно реализовать частный максимум для любого угла атаки. На рис. 4 приведена расчетная зависимость  $C_N = f(\alpha)$  для профиля NASA 63-621. Минимизация угла атаки,

особенно в концевой части лопасти при незначительном (3-5%) уменьшении коэффициента мощности, может оказаться весьма полезной с точки зрения уменьшения аэродинамического шума.

Получив оптимальную по аэродинамическим параметрам геометрию лопасти с учетом концевых потерь по Прандтлю и с максимальным коэффициентом мощности, необходимо продолжить процесс оптимизации для достижения минимального уровня шума во время работы.

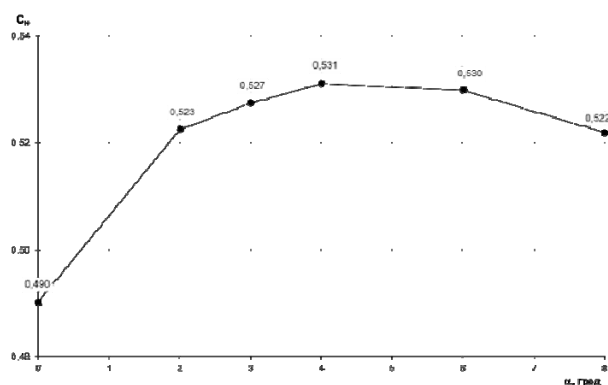


Рис. 4. Зависимость коэффициента мощности от номинального (расчетного) угла атаки при оптимизации геометрии лопасти (по приведенной выше методике)

Рассмотрим, что такое шум, и выявим источник возникновения аэродинамического шума.

Шум, издаваемый ветроэлектрической установкой, является неотъемлемой частью ветроэнергетики. Во многих случаях достоверная оценка звуковых излучений может играть критическую роль при утверждении проектов. Более того, надежная оценка может стать основой для контроля и уменьшения шума. Существуют два основных типа шума: механический (генерируемый обычно мультипликатором и трансмиссией) и аэродинамический. В данной статье рассмотрим источник аэродинамического шума.

Аэродинамический шум зависит от нескольких конструктивных и установочных параметров, относящихся к механизмам генерирования шума:

- 1) частоты вращения кончика лопасти;
- 2) геометрии лопасти (от распределения хорды и угла крутки по длине лопасти, а также от формы профиля сечений);
- 3) геометрии концевой части лопасти;

- 4) законцовки задней кромки;
- 5) характеристики набегающего потока;
- 6) влияния башни и ротора.

Эти параметры воздействуют на общие характеристики ветроэлектрической установки, так как влияют на нагрузки и характеристики пограничного слоя на лопасти, которые в свою очередь определяют в значительной степени аэродинамику и акустику ротора. Фактически они могут быть изменены при оптимизации конструкции, преследующей цель удовлетворительного компромисса между контролем шума, выработкой и низкой стоимостью ветровой энергии.

Из теории [5-8] известно, что интенсивность шума пропорциональна локальной скорости потока в 4-6 степени. Следовательно, в случае ветроэлектрической установки наиболее сильные источники шума расположены в концевой части лопасти. Также предложены несколько типов концевой части лопасти. На рис. 5-7 представлены самые распространенные формы концевой части лопасти, используемые в ветроэнергетике фирмой LM Glasfiber.

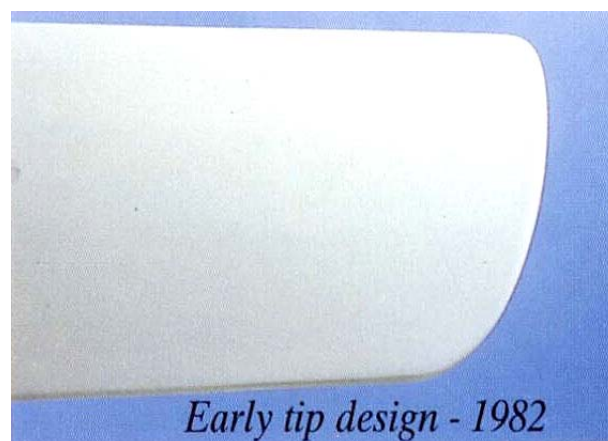


Рис. 5. Первоначальная форма концевой части лопасти



Рис. 6. Эффективная концевая часть лопасти

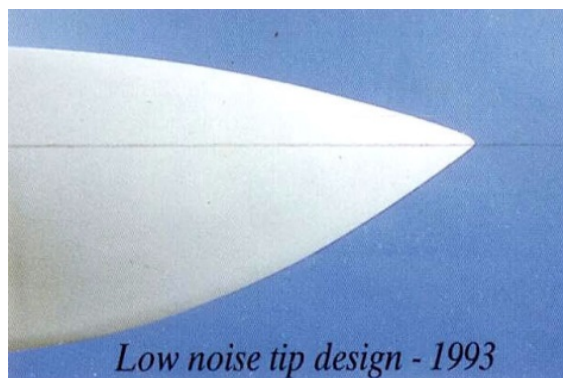


Рис. 7. Геометрия концевой части лопасти с низким уровнем шума

На рис. 7 представлена концевая часть лопасти, издающая, по мнению фирмы LM Glasfiber, самый низкий уровень шума.

В других источниках [9] представлены результаты исследования уровня аэродинамического шума четырех типов профилей (рис. 8): Ogee tip (S-образная концевая часть, профиль № 1), Shark fin tip (концевая часть “плавник акулы”, профиль № 2), reference tip (эталонная концевая часть лопасти, профиль № 3) и original tip (исходная концевая часть, профиль № 4). По результатам исследования в аэродинамической трубе и на ветроэлектрической установке UNIWEX был сделан вывод: аэродинамический шум сильно зависит от формы профиля и конфигурации концевой части лопасти. Эталонная концевая часть лопасти (профиль № 3, рис. 8) показала на ветроэлектрической установке UNIWEX более низкие шумовые излучения, чем S-образная форма концевой части (профиль № 1). При испытании в аэродинамической трубе

S-образная форма концевой части лопасти на 1-2 децибела тише, чем концевая часть “плавник акулы” (профиль № 2).

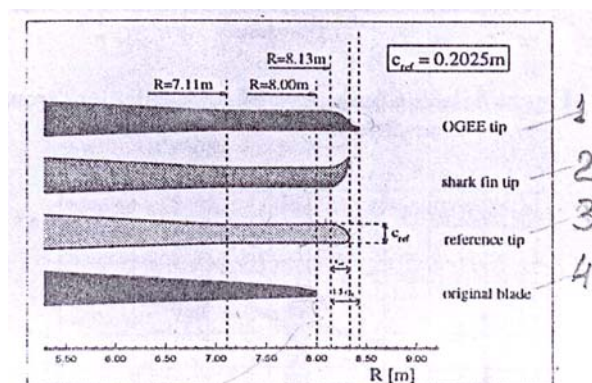


Рис. 8. Альтернативные варианты концевой части лопасти

К этому следует добавить, что шум зависит от характеристик турбулентного потока, особенно для больших ветроэлектрических установок.

Из всего сказанного можно сделать вывод, что оптимальная геометрия лопасти никогда не будет иметь максимальный коэффициент мощности, так как необходимо пойти на компромисс между максимальным аэродинамическим качеством крыла и аэродинамическим шумом.

Поэтому, решив задачу по оптимизации геометрии лопасти, для повышения максимального коэффициента мощности необходимо провести профилирование геометрии концевой части лопасти с учетом минимизации аэродинамического шума.

Воспользовавшись формой концевой части лопасти № 3 (рис. 8) как малошумящей, а также геометрией концевой части по рекомендациям [9] и реализовав их в программе по оптимизации, получим полную геометрию лопасти, которая будет иметь максимальный коэффициент мощности (на  $z=9$ ) и минимальный уровень шума, так как угол атаки в концевой части лопасти стремится к нулю (рис. 9).

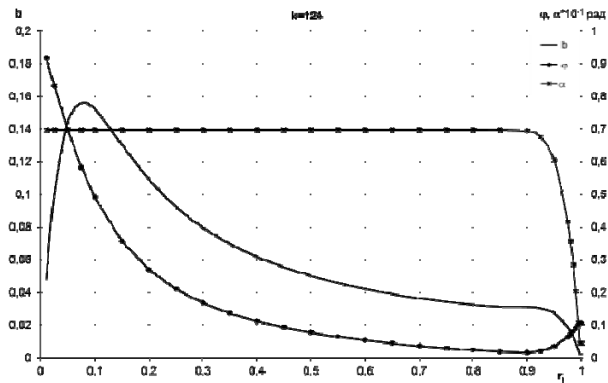


Рис. 9. Оптимальная геометрия лопасти с учетом аэродинамических и шумовых характеристик  $C_N=0,531$  (по предлагаемой выше методике оптимизации геометрии лопасти)

### Выводы

Разработана методика оптимизации геометрии лопасти с учетом рекомендации [9] по форме концевой части лопасти для минимизации уровня шума. Полученные результаты для аэродинамически оптимальной и бесшумной лопасти позволяют сделать следующие выводы:

- оптимальная геометрия лопасти не будет иметь максимальный коэффициент мощности, так как необходимо пойти на компромисс между максимальным аэродинамическим качеством крыла (при котором реализуется максимальный коэффициент мощности) и аэродинамическим шумом;

- концевая часть лопасти имеет форму, представленную на рис. 7, 8 (профиль № 3), угол атаки концевой части лопасти стремится к нулю;

- бесшумная лопасть – это лопасть, имеющая острую заднюю кромку;

- на штатном режиме работы распределение угла атаки вдоль лопасти должно быть отличным от распределения критического угла атаки;

- скорость кончика лопасти должна быть как можно меньше допустимого предела исходя из условия несжимаемости жидкости.

### Список использованной литературы

1. Абрамовский Е.Р., Городько С.В., Свиридов И.В. Аэродинамика ветродвигателей: Учеб. пособие. – Днепропетровск: ДГУ, 1987.
2. Головатый В.И. и др. Определение аэродинамических коэффициентов ротора ветроагрегата // Материалы V Междунар. конф. «Нетрадиционная энергетика в XXI веке» (23 – 27 сент. 2004 г.). – АР Крым, пгт. Николаевка, 2004. – С. 150-155.
3. Краснов Н.Ф. Аэродинамика. Часть I. – М.: Высш. шк., 1980.
4. Мхиторян А.М. Аэродинамика. – М.: Машиностроение, 1976.
5. Voutsinas S. G. (Ed.). Final Technical Report JOU2-CT92-0148. – 1995.
6. Brooks T. F., Pope D. S., Marcolini M. A. NASA RP 1218. – 1989.
7. Grosveld F. W., Propulsion J. – 1(4). – 1985. – 292 p.
8. Lawson M. V., ETSU/W/13/00284/REP, 1993.
9. Kalliopi P. P. P. P., Spyros G. Voutsinas, Arthouros Zervos. Estimation and control of aerodynamic noise. – 1995.

Статья поступила 20.10.2015