

ОЦЕНКА ВЫИГРЫША ЗАТРАЧИВАЕМОЙ ЭНЕРГИИ В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ И НА ЕДИНИЦУ ПРОЙДЕННОГО ПУТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ ОТКЛОНЕНИЯ ВИНТОМОТОРНОЙ ГРУППЫ КОНВЕРТОПЛАНА

С. С. Ногтев

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Аннотация. В работе рассмотрен расчет потребной тяги и оценка выигрыша затрачиваемой энергии в единицу времени и на единицу пройденного пути при различных углах отклонения винтомоторной группы конвертоплана.

Расчет производился на примере аэротакси Airbus Vahana.



Рисунок 1 - Airbus Vahana

Графики зависимостей аэродинамических величин от угла атаки (рад): $K(\alpha)$, $c_y(\alpha)$, $c_x(\alpha)$.

```
% K(alpha), c_y(alpha), c_x(alpha)
syms alpha
K=-1202.2026*alpha^3-72.1322*alpha^2+69.0713*alpha+1.4007;
c_y=3.5*x+0.07;
c_x=c_y/K
```

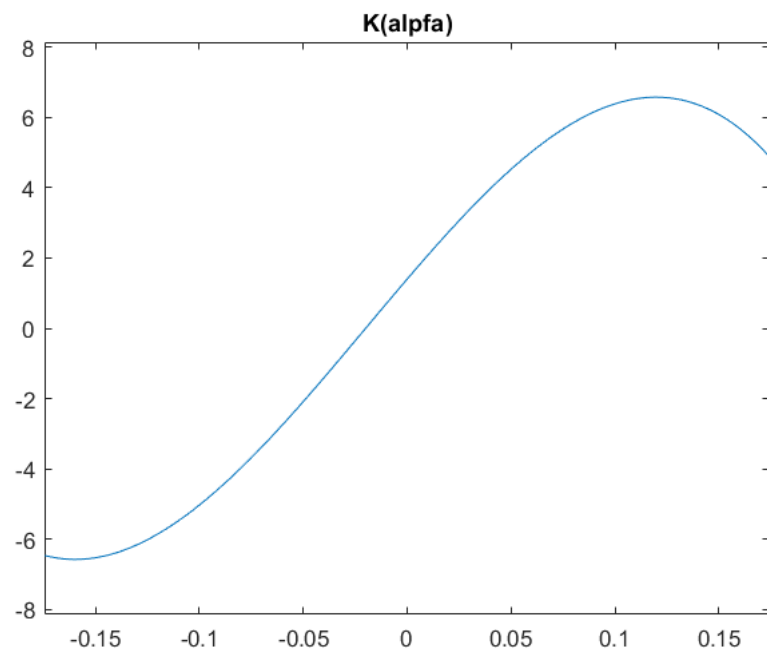


Рисунок 2 – График зависимости $K(\alpha)$

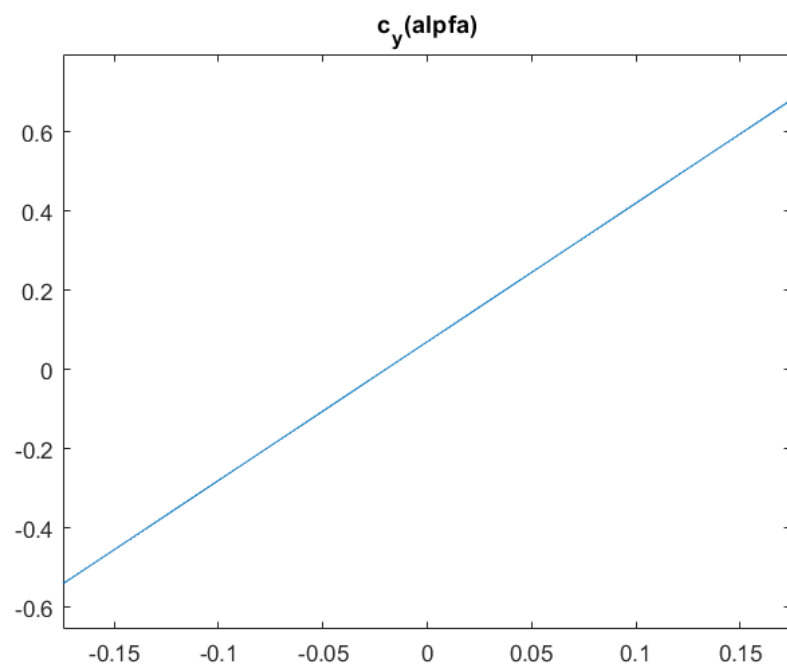


Рисунок 3 – График зависимости $c_y(\alpha)$

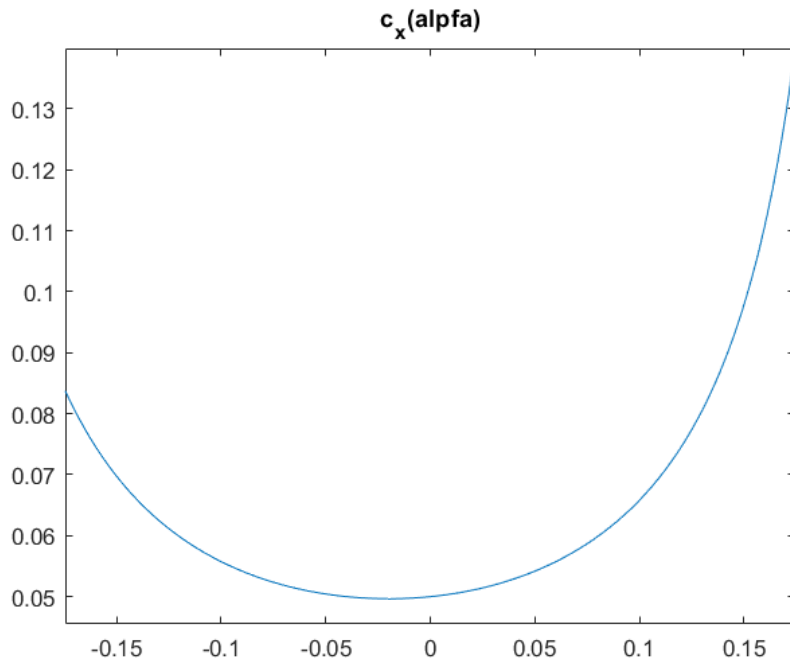


Рисунок 4 – График зависимости $c_x(\alpha)$

Данные о ЛА, необходимые для расчета:

```
syms fi_p u % Исходные данные о ЛА

theta=0; % угол наклона траектории = 0, горизонтальный полет
alpfa=5*pi/180; % угол атаки, рад

g=9.81; % ускорение свободного падения, м/с^2
rho=1; % плотность воздуха на высоте 2000м, кг/м^3

K=-1202.2026*alpfa^3-72.1322*alpfa^2+69.0713*alpfa+1.4007; % Коэфф. а. к.
c_y=3.5*alpfa+0.07; % аэродинамический коэффициент подъемной силы
c_x=c_y/K; % аэродинамический коэффициент лобового сопротивления

m_p=1; % коэффициент профильного сопротивления
c_o=0.095; % коэффициент тяги винта (выполняется: P1_max=1100, omega_max=300)

m=800; % максимальная взлетная масса, кг
S=10; % площадь крыла, м^2
Y_a=m*g; % потребная подъемная сила

P_max=8800; % максимальная тяга: 8*110кгс=880кгс=8800Н
n=8; % число двигателей ВМГ
R=0.75; % радиус каждого винта ВМГ
omega_max=300; % макс. угловая скорость вращения лопасти винта ВМГ, рад/с
KPD=0.7; % КПД=70%
```

Аналитическое вычисление X_a , P и V для определения зависимости индуктивной скорости от угла отклонения ВМГ: $u_i(fi_p)$

```
% Аналитические зависимости  $X_a(fi\_p)$ ,  $P(fi\_p)$ ,  $V(fi\_p)$  для определения  $u_i(fi\_p)$ 
 $X_a = (\sin(fi\_p - \alpha) * m * g * \cos(\theta) - \cos(fi\_p - \alpha) * m * g * \sin(\theta)) / (K * \sin(fi\_p - \alpha) + \cos(fi\_p - \alpha));$ 

 $P = (K * m * g * \sin(\theta) + m * g * \cos(\theta)) / (K * \sin(fi\_p - \alpha) + \cos(fi\_p - \alpha));$ 

 $V = \sqrt{(2 * X_a) / (c_x * \rho * S)};$ 

 $u_i = P / (n * 2 * \rho * \pi * R^2 * \sqrt{(V * \cos(fi\_p - \alpha))^2 + (V * \sin(fi\_p - \alpha) + u)^2})$ 
```

Численное вычисление $u_i(fi_p)$:

```
 $u_i = \alpha * 180 / \pi : 1 : 90;$ 
j=0;
for fi_p=alpha:1*pi/180:90*pi/180
j=j+1;
 $u_i(j) = \text{solve}(u == 872 / (\pi * ((u + \sin(fi\_p - \pi/36)) * ((141376999502414610432 * \sin(fi\_p - \pi/36)) / (5561799993361601 * \cos(fi\_p - \pi/36) + (9518347698922264905402679318163 * \sin(fi\_p - \pi/36)) / 281474976710656))^{1/2})^2 + (141376999502414610432 * \cos(fi\_p - \pi/36)^2 * \sin(fi\_p - \pi/36)) / (5561799993361601 * \cos(fi\_p - \pi/36) + (9518347698922264905402679318163 * \sin(fi\_p - \pi/36)) / 281474976710656))^{1/2} * (\cos(fi\_p - \pi/36) + (1711378997857363 * \sin(fi\_p - \pi/36)) / 281474976710656))), u, 'real', true);$ 
end
```

Зависимости силы сопротивления(X_a), потребной тяги(P), скорости(V), угловой скорости винта(ω) от угла отклонения ВМГ(fi_p):

```
% Зависимости  $X_a(fi\_p)$ ,  $P(fi\_p)$ ,  $V(fi\_p)$ ,  $\omega(fi\_p)$ 
fi_p=alpha:1*pi/180:90*pi/180; % Изменение  $fi\_p$  от  $\alpha$  до 90 градусов

 $X_a = (\sin(fi\_p - \alpha) * m * g * \cos(\theta) - \cos(fi\_p - \alpha) * m * g * \sin(\theta)) / (K * \sin(fi\_p - \alpha) + \cos(fi\_p - \alpha));$ 
 $P = (K * m * g * \sin(\theta) + m * g * \cos(\theta)) / (K * \sin(fi\_p - \alpha) + \cos(fi\_p - \alpha));$ 
 $V = \sqrt{(2 * X_a) / (c_x * \rho * S)};$ 
 $\omega = \sqrt{(P * \pi^2) / (n^4 * c_o * \rho * R^4)};$ 
```

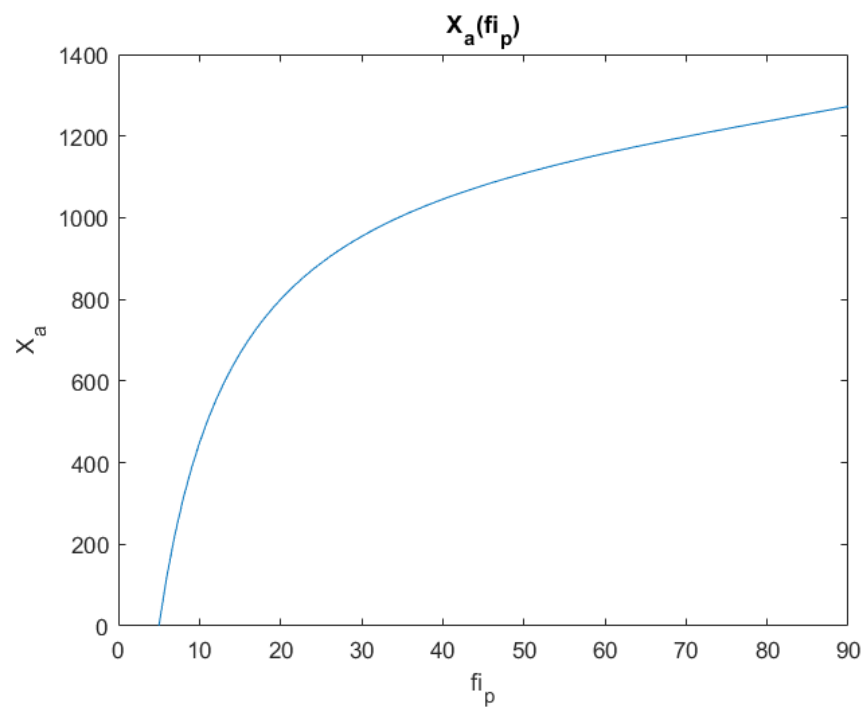


Рисунок 5 – График зависимости $X_a(fi_p)$

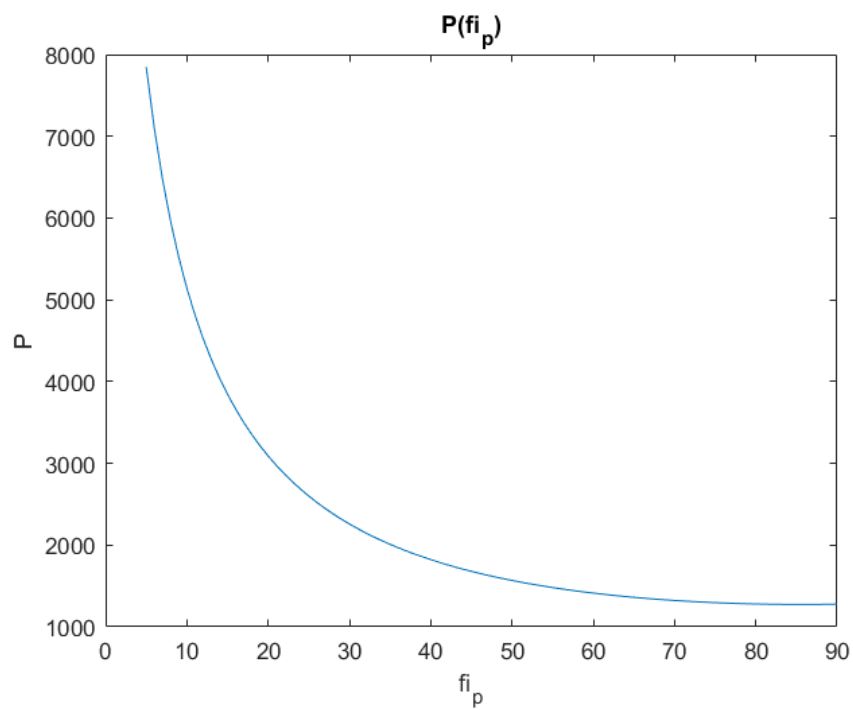


Рисунок 6 – График зависимости $P(fi_p)$

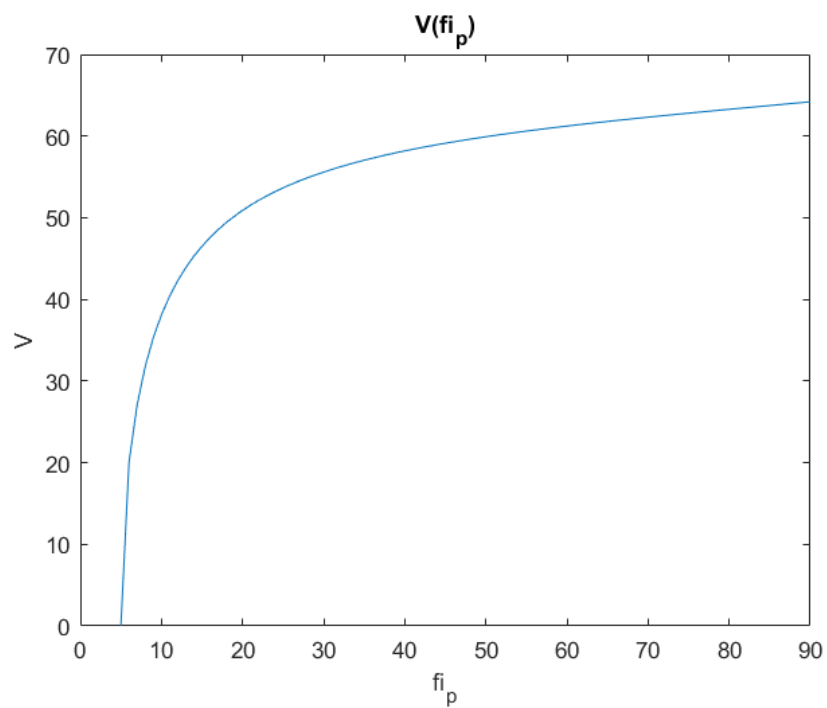


Рисунок 7 – График зависимости $V(f_{i_p})$

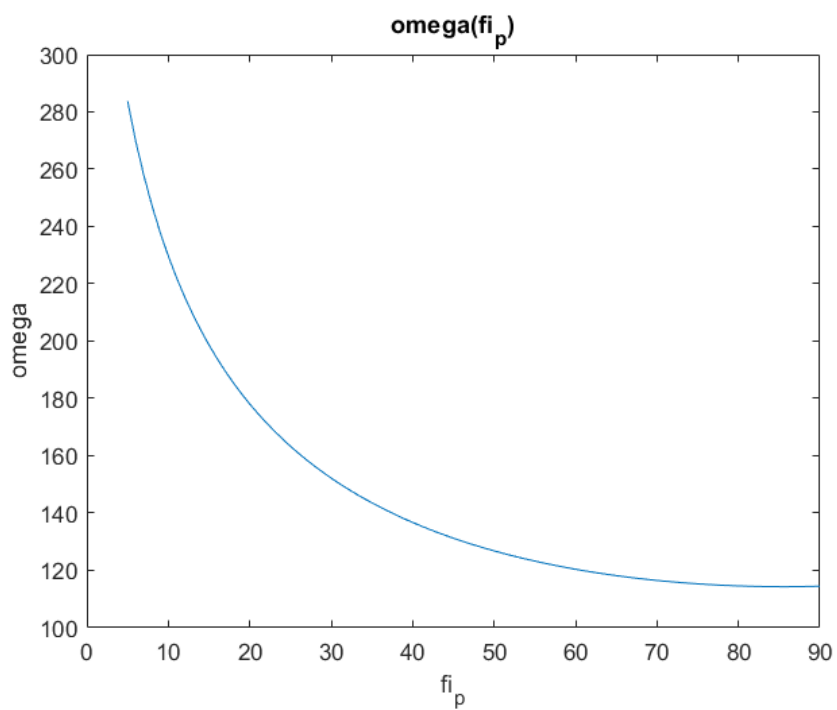


Рисунок 8 – График зависимости $\omega(f_{i_p})$

Требуемая мощность(N_{sum}) и требуемая мощность ВМГ(N_{VMG}):

```
N_sum = P.*V.*sin(fi_p-alfa) + m_p*(1+4.6*((V.*cos(fi_p-  
alfa)./(omega*R)).^2)).*(P.^(1.5))./(sqrt(n*2*rho*pi*R^2))+P.*u_i;  
  
N_VMG = N_sum/KPD;
```

Наименьший расход энергии в единицу времени:

$$d(N_{\text{VMG}})/d(fi_p) = 0$$

График зависимости $N_{\text{VMG}}(fi_p)$:

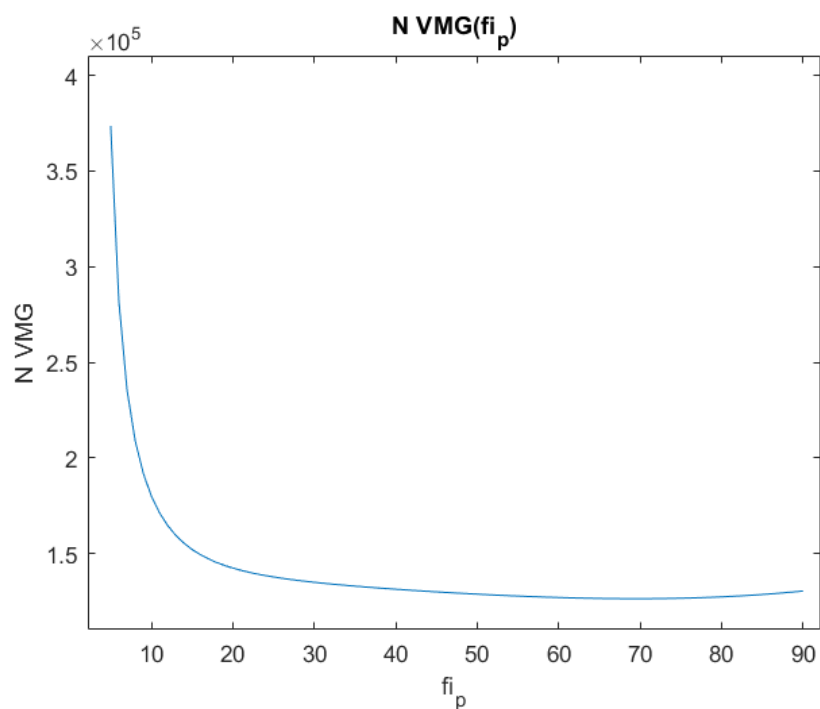


Рисунок 9 – График зависимости $N_{\text{VMG}}(fi_p)$

$N_{\text{VMG min}}=126400$ (Вт)

$fi_p=70$ (град)

Наименьший расход энергии на единицу пройденного пути:

$$d(N_VMG/V)/d(fi_p) = 0$$

График зависимости $N_VMG/V(fi_p)$:

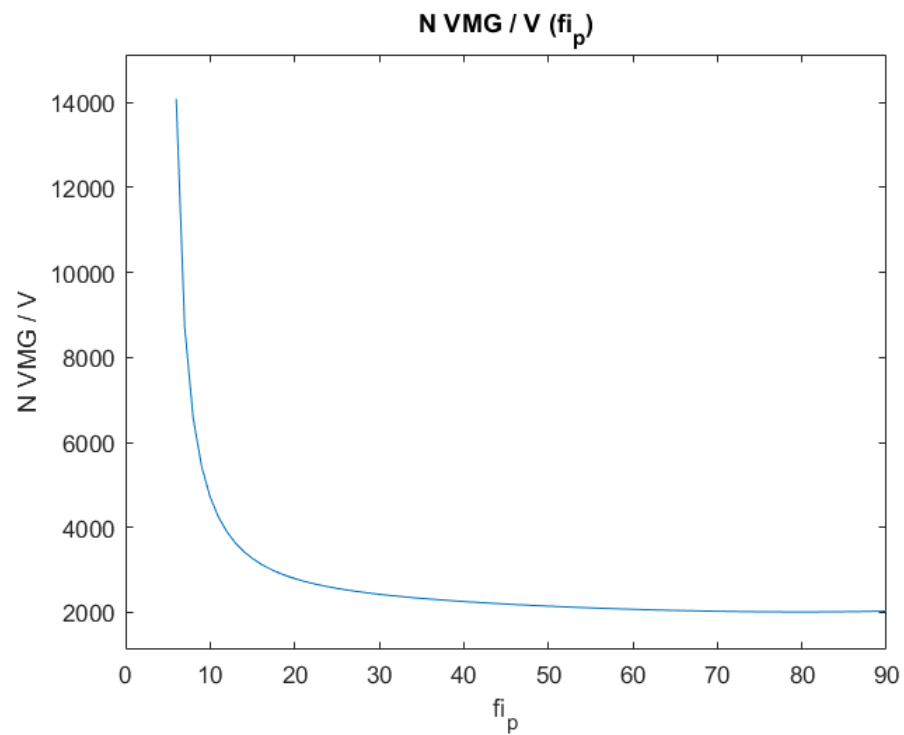


Рисунок 10 – График зависимости N_VMG/V (fi_p)

$$N_VMG/V \min = 2013$$

$$fi_p = 1.414 \text{ (рад)} = 80 \text{ (град)}$$

График зависимости $V/N_{VMG}(f_{ip})$:

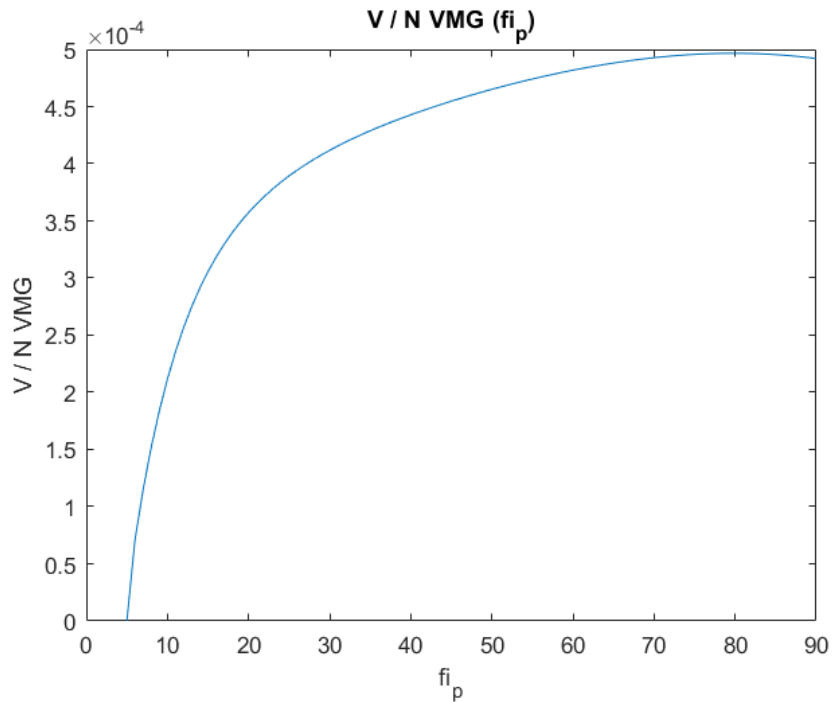


Рисунок 11 – График зависимости $V/N_{VMG}(f_{ip})$

Таким образом, при угле атаки 5 градусов углы отклонения ВМГ для минимизации расхода энергии в единицу времени и расхода энергии на единицу пройденного пути составили 70 и 80 градусов соответственно. За 1 час полета экономия 4,1 кВт*ч, если полет совершается на угле 70 градусов, а не 90. За 1 час полета экономия 3,1 кВт*ч, если полет совершается на угле 80 градусов, а не 90.

*Результат расчета может быть искажен из-за использования неправильных данных о ЛА Airbus Vahana.

Список использованных источников

1. В. И. Бусурин, П. В. Мулин Оптимизация балансировочного угла поворота винтомоторной группы электроконвертоплана.