

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Проф., д-кт. техн. наук А.А. Яковлев, с.н.с., канд. техн. наук
И.И. Мосина, аспирант С.С. Лесковский

на данном этапе развития масса, отнесенная к полезной мощности, является одним из основных факторов, характеризующих технический уровень электрической машины, особенно для электрооборудования, используемого в самолето- и ракетостроении. В настоящей работе предлагается метод оптимизации конструкции асинхронных электродвигателей авиационного назначения (АДАН).

Проектирование АДАН сводится к многократному расчету зависимостей между основными показателями, заданными в виде системы формул, эмпирических коэффициентов, графических зависимостей, которые можно рассматривать как уравнения проектирования. Оптимальное проектирование АДАН может представляться как поиск оптимальных параметров путем решения этой системы уравнений.

Выбор критерия оптимальности зависит от назначения электрической машины и предъявляемых к ней требований. Для АДАН целесообразно выбрать минимум массы. Задача оптимального проектирования АДАН может быть представлена как общая задача нелинейного математического программирования, которая сводится к нахождению минимума критерия оптимальности при наличии определенного числа независимых переменных и функций-лимитеров, представляющих собой технические или технологические требования-ограничения к проекту.

Таким образом, решаемая задача проектирования АДАН состоит в минимизации функционала $G_a(x)$ массы его активных частей.

$$G_a(x) = G_a(\lambda, \eta, z_2)$$

Здесь параметрами оптимизации выбраны:

$\lambda = l/d$ - конструктивный параметр,

η - начальное значение коэффициента полезного действия,

Z_2 - количество зубцов ротора.

Так как величина Z_2 - дискретная, а λ и η - непрерывны, то принято решение искать минимум G_a в два этапа: определить минимум G_{ai} для каждого фиксированного Z_2 , а затем найти $G_a = \min(G_{ai})$

Границы области решений лимитируются явными ограничениями

$$0,6 \leq \lambda \leq 1,2$$

$$0,3 \leq \eta \leq 1$$

и неявными ограничениями

$$0,3 \leq \cos \varphi < 1$$

$$I_{1n} < I_{1доп};$$

$$S_n < S_{nдоп};$$

$$T_M \leq T_{Mдоп};$$

$$i \leq i_{доп};$$

$$m_n \geq m_{nдоп};$$

$$m_1 \leq m_{max} \leq m_2;$$

$$v_{z2} > v_{z2доп};$$

$$n_{j2} > n_{j2доп};$$

$$v_{z2} < v_{z2доп};$$

где $\cos \varphi$ - коэффициент мощности;

$I_{1n}, I_{1доп}$ - номинальный ток в обмотке статора и его допустимое значение;

$S_n, S_{nдоп}$ - номинальное скольжение и его допустимое значение;

$T_M, T_{Mдоп}$ - температура обмотки статора при работе АДАН в пустом баке в конце заданного отрезка времени и её допустимое значение;

$i, i_{доп}$ - кратность пускового тока и её допустимое значение;

$m_n, m_{nдоп}$ - кратность пускового момента и его допустимые значения;

m_{max} - кратность максимального значения;

$[m_1, m_2]$ - интервал допустимых значений для кратности максимального момента;

$B_{z2}, B_{z2доп}$ - ширина зуба ротора и её допустимое значение;

$h_{ja}, h_{jaдоп}$ - высота спинки ротора и её допустимое значение;

$B_{za}, B_{zaдоп}$ - индукция в зубце ротора и её допустимое значение.

Функционал W_a в аналитическом виде не может быть записан, его значение вычисляется путем реализации алгоритма проекторочного расчета АДАН.

Расчет начинается с определения главных размеров (диаметра расточки статора $\varnothing l_i$ и длины пакета сердечника статора l_i) по эмпирическим зависимостям, связывающим полезную мощность P_2 , частоту вращения ротора N и электромагнитные нагрузки. Они также существенно зависят от значений λ и η , выбранных в качестве параметров оптимизации. Затем определяется число последовательно соединенных витков фазы статора W_1 .

На следующем этапе происходит определение геометрии листа статора и ротора, а затем следует расчет магнитной цепи для заданного значения полезной нагрузки и определенных на данной стадии расчета η и $\cos \varphi$.

Алгоритм расчета рабочих характеристик реализует определение $\gamma_{ин}$, забираемой мощности $P_1, S_H, i, m_n, m_{max}$, номинального момента M_n по номинальной мощности P_a и уточняет значение η и $\cos \varphi$.

Расчет производится для Т-образной схемы замещения на основе решения системы 2-х уравнений с комплексными коэффициентами и позволяет учитывать механические потери трения ротора о жидкость, которые для АДАН, работающих в топливе, достигают до 30% от P_2 .

Разработанный алгоритм позволяет также определить скольжение $S_{кр}$, определяющее значение максимального момента, и $S_{рм}$ - определяющее максимальную полезную мощность. Для этого используется метод "золотого сечения".

Расчет превышений температуры элементов АДАН осуществляется

методом ЭТС для погруженного в топливо в стационарном режиме, а для работающего в пустом баке в неустановившемся режиме и реализуется решением системы уравнений

$$C \frac{d\vec{\theta}}{dt} + A\vec{\theta} = \vec{P} \quad (1)$$

при начальных условиях $\vec{\theta} = \vec{\theta}_0$ (2)

где C - матрица теплоемкостей, равная нулевой матрице для стационарного режима;

A - матрица термических проводимостей, различная для разных режимов;

\vec{P} - вектор греющих потерь;

$\vec{\theta}$ - искомый вектор превышений температуры.

Для стационарного случая условие (2) не используется. Для неустановившегося режима вектор $\vec{\theta}_0$ равен вектору решения системы для стационарного случая.

После определения превышений температур и уточнения сопротивления обмоток ротора и статора по этим температурам происходит возврат на вычисление параметров магнитной цепи и рабочих характеристик, т.е. реализуется процесс итерации до тех пор, пока отличие η и $\cos\varphi$ на $(k-1)$ -ом и k -том шаге не станет меньше заданного значения.

Для построения алгоритма оптимизации исследовалась целевая функция G_a - масса активных элементов. Установлено, что в области изменения параметров λ и τ_2 она может иметь минимум на границе области и в её внутренней части.

Для выбора метода оптимизации конструкции АДАН выполнено исследование возможности использования алгоритмов Хука и Дживса, скользящего допуща и комплексного метода Бокса. При этом оказалось, что метод Хука и Дживса не позволил решить поставленную задачу из-за существенной зависимости от задаваемой начальной точки и длины шага;

основная трудность при использовании метода скользящего допуска заключалась в том, что не удавалось найти допустимую или почти допустимую точку. С помощью комплексного метода было получено решение поставленной задачи, но при этом изменены значения коэффициентов, используемых в алгоритме, и составлен специальный алгоритм выбора стартовой точки для случая, когда эта точка лежит за пределами области ограничений. За основу этого алгоритма принят метод перебора с корректирующим коэффициентом выбора шага изменения переменных.

Результаты оптимизационного проектировочного расчета приведены в таблице I.

Таблица I

Результаты вычислений на примере проектирования асинхронного электродвигателя авиационного назначения мощностью 180 Вт.

Показатель	ед. измерения	Расчет по общепринятой методике	Расчет с использованием комплексного метода оптимизации	Процент улучшения показателя
I	2	3	4	5
Масса активных материалов	кг	0.44901	0.42084	+6.69
Масса зубцов статора	кг	0.08167	0.07901	+3.36
Масса зубцов ротора	кг	0.04672	0.04990	-6.3
Масса спинки статора	кг	0.13193	0.12191	+8.2
Масса спинки ротора	кг	0.07276	0.04831	+50.6
Масса обмотки статора	кг	0.08812	0.09222	-4.5
Масса обмотки ротора	кг	0.02133	0.02313	-7.8
Масса короткозамкнутого кольца	кг	0.00649	0.00645	+0.6
Ток холостого хода	А	1.1003	1.0673	+3.0
Номинальный ток	А	1.399	1.307	+7.0

I	2	3	4	5
Коэффициент мощности	0.6.	0.679	0.614	-10.5
КПД	0.6.	0.547	0.648	+15.6
Кратность пускового тока	0.60	3.046	3.493	+14.6
Кратность пускового момента	0.6.	1.564	1.149	+26.3
Кратность максимального момента	0.6.	2.344	2.623	+11.9
Превышение температуры обмотки статора при работе в пустом баке	С	61.3	55.3	+10.8

Приведенные результаты показывают, что общее снижение массы активных элементов АДАН позволило также улучшить такие показатели, как ток холостого хода, номинальный ток, коэффициент полезного действия, кратности пускового тока и максимального момента при ухудшении, но в допустимых пределах, коэффициента мощности и кратности пускового момента.

Как показали расчеты, при оптимизации АДАН все еще имели значительный запас по температуре обмотки. Для того, чтобы использовать этот запас, необходимо пересмотреть некоторые эмпирические зависимости, заложенные в алгоритм проектно-расчетного расчета.