

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.1.05

УДК 621.313.3

А.А. Котов, Н.И. Неустроев, И.А. Чуйдук

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ВЕТРОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ОСНОВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Применение машины двойного питания в качестве основного силового генератора является одним из главных направлений развития ветроэнергетики. Этот класс электрических машин известен давно, однако использование их для ветроэнергетических установок (ВЭУ) является новым техническим решением. Для возможности оптимального проектирования данного вида генераторов необходима разработка новых методик. В статье показан один из подходов оптимального проектирования генератора двойного питания применительно к ВЭУ. **Цель исследования:** разработка математической модели асинхронизированного синхронного ветрогенератора для задачи оптимизации основных геометрических размеров на основе обобщенных переменных. **Методы:** создание математической модели генератора, в которой геометрические размеры всех элементов поперечного сечения магнитопровода будут описываться при помощи обобщенных переменных. Данные переменные обеспечивают зависимость магнитопровода друг от друга и точное описание размеров элементов. **Результаты:** на базе предложенной математической модели выстроена методика синтеза вариантов для решения задачи оптимизации основных геометрических размеров машины двойного питания. Методика позволяет при ограниченном количестве входных данных для проектирования осуществить расчёт всех элементов магнитопровода и произвести полный расчёт электрической машины с оптимизацией ее геометрии методом покоординатного спуска Гаусса–Зейделя при движении к оптимуму в сочетании с методом Фибоначчи при выборе шага. **Практическая значимость:** разработанная методика реализована в программной среде Delphi и использована для проектирования генераторов двойного питания. Методика позволяет разработчику существенно снизить время и трудозатраты на синтез оптимальных вариантов конструкции активных частей машины двойного питания с обеспечением достаточной точности расчётов.

Ключевые слова: машина двойного питания, асинхронизированный синхронный генератор, ветрогенератор, обобщенные переменные, критерии оптимальности, оптимальное проектирование, математическая модель.

A.A. Kotov, N.I. Neystroev, I.A. Chyidyk

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

**DEVELOPMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL
OF THE ASYNCHRONIZED SYNCHRONOUS WIND
GENERATOR FOR THE PROBLEM OF OPTIMIZATION
OF THE BASIC GEOMETRIC DIMENSIONS BASED
ON GENERALIZED VARIABLES**

The use of a double-fed electric machine as the main power generator is one of the main areas of development of wind energy. This class of electric machines has been known for a long time, but their use for wind power plants (wind turbines) is a new technical solution. To be able to optimally design this type of generator, it is necessary to develop new methodologies. The article shows one of the approaches to the optimal design of a double-fed generator as applied to wind turbines. **Purpose:** development of a mathematical model of an asynchronous synchronous wind generator for the task of optimizing the basic geometric dimensions based on generalized variables. **Methods:** creating a mathematical model of the generator, in which the geometric dimensions of all the elements of the cross section of the magnetic circuit will be described using generalized variables. These variables provide a dependence and an accurate description of the dimensions of the elements of the magnetic circuit from each other. **Results:** On the basis of the proposed mathematical model, a methodology for synthesizing options for solving the problem of optimizing the basic geometric dimensions of a double-fed machine is built. This technique allows, with a limited amount of input data for designing, to calculate all elements of the magnetic circuit and then make a complete calculation of the electric machine, with geometry optimization using the Gauss-Seidel coordinate descent method when moving towards the optimum in combination with the Fibonacci method when choosing a step. **Practical relevance:** This technique is implemented in the Delphi software environment and used to design double-fed generators. It allows the developer to significantly reduce time and labor for the synthesis of optimal design options for the active parts of the double-fed machine, while ensuring sufficient accuracy of calculations.

Keywords: doubly-fed induction machine, asynchronous synchronous generator, wind generator, generalized variables, optimality criteria, optimal design, mathematical model.

Введение. Современные тенденции и направления развития мировой ветроэнергетики связаны с востребованностью машин двойного питания в качестве электрических генераторов для ветроэнергетических установок [1–12]. Это прежде всего связано с возможностями данного типа электрических машин обеспечивать стабильность выходных параметров в широком диапазоне скоростей вращения. Эффективность работы машины двойного питания напрямую зависит от выбора оптимальной геометрии магнитной системы и обмоточных данных. В связи с необходимостью решения этой задачи появляется потребность в создании методик оптимального проектирования данного класса электрических машин.

Следует отметить, что решение задач оптимального проектирования электрических машин на сегодняшний день остается весьма актуальной, сложной и не до конца решенной проблемой в электромашиностроении [13, 14]. Это связано с формализацией независимых переменных, построением структуры математической модели, определением показателей качества электрической машины и выбором метода оптимизации. В общем случае при проектировании электрической машины возникает необходимость решения многокритериальной задачи оптимизации, когда необходимо выбрать наилучшее решение сразу по нескольким показателям. Как правило, эти критерии носят противоречивый характер, поскольку улучшение одного из них приводит к ухудшению других. Например, увеличение КПД требует увеличения массы активных материалов из-за снижения электромагнитных нагрузок. Мировая и отечественная практика не знает удачных универсальных методов решения многокритериальных задач в электромашиностроении. В основном разработанные алгоритмы базируются на методах, которые носят субъективный характер и во многом зависят от опыта конструктора (метод весовых коэффициентов, лексикографический метод) [15]. Эти методы не позволяют в полной мере доверить решение многокритериальных задач системам САПР. В связи с этим в данной статье авторы рассматривают однокритериальную задачу оптимизации машины двойного питания, которая достаточно хорошо формализована, и делают попытку решить часть этой задачи, а именно построить математическую модель расчёта машины двойного питания (асинхронизированного-синхронного генератора), на основе которой возможно создание методики оптимального проектирования.

1. Постановка задачи оптимального проектирования асинхронизированного синхронного генератора. Задача однокритериальна оптимизации машины двойного питания может быть сформулирована в классической постановке [16]: для заданных констант (конкретного исполнения, материалов, исходных данных технического задания), при заданных ограничениях, необходимо, делая перебор независимых переменных по определенному алгоритму, определить геометрию, которая обеспечивала бы экстремальное значение выбранного критерия. Критериев оптимальности может быть несколько, но в зависимости от проектной ситуации для оптимизации выбирается один.

Блок-схема методики однокритериальной оптимизации машины двойного питания представлена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема методики однокритериальной оптимизации машины двойного питания

Из блок-схемы наглядно видно, что математическая модель является основой методики оптимального проектирования. Она связывает между собой данные технического задания, ограничения, независимые переменные и вычисляет значения критериев оптимальности, которые, в свою очередь являются входными данными для блока оптимизатора, перебирающего эти параметры по определённому алгоритму.

Далее рассмотрим требования, которым должна удовлетворять математическая модель.

2. Определение основных требований к математической модели для решения однокритериальной задачи оптимизации машины двойного питания. Математическая модель для решения однокритериальной задачи оптимизации машины двойного питания должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- простота алгоритма;
- точность определения критериев оптимальности;

– минимальное количество независимых переменных, изменяющихся в заданном диапазоне.

Следует отметить, что в процессе нахождения оптимума при любом методе оптимизации производится большое количество итераций, поскольку движение к оптимуму идет по шагам [17]. При каждой итерации происходит новый расчёт по всему алгоритму математической модели. В зависимости от выбранного метода оптимизации количество циклов может быть десятки и сотни тысяч. Это требует больших компьютерных ресурсов и длительного времени расчета. Исходя из этого, можно заключить, что одно из главных требований к математической модели является простота алгоритма. Чем меньше в модели сложных и объёмных уравнений, тем быстрее будет происходить расчёт. Из этого требования так же вытекает требование к минимальному количеству независимых переменных в математической модели. Однако упрощая математическую модель нельзя забывать о необходимости получения расчетов, имеющих минимальную погрешность.

3. Построение математической модели для расчёта машины двойного питания. Построение математической модели прежде всего необходимо начинать с выбора критерия оптимальности, для которого будет производиться расчёт. Очевидно, что для электрических машин данного типа наиболее предпочтительным критерием является максимум КПД.

Вторым шагом построения математической модели является определение необходимых входных данных. Целесообразно в качестве входных параметров принимать данные технического задания. Как правило, техническое задание на электрическую машину включает в себя требуемую номинальную мощность, номинальное напряжение, номинальную скорость вращения (или диапазон скоростей), требуемый $\cos \varphi$, частоту питания и предельно допустимые габариты. Так же для определения количества пазов на статоре и роторе в данных ТЗ необходимо задать количество пазов на полюс и фазу, под которое будет проектироваться электрическая машина, и схему соединения фаз обмоток статора и ротора (звезда или треугольник).

Третьим шагом построения математической модели является выбор физических и технологических ограничений. В качестве технологических ограничений при проектировании любой электрической машины выступают предельный коэффициент заполнения паза, допус-

тимая величина воздушного зазора и максимальный ток в параллельной ветви. В качестве физических ограничений следует принять допустимую магнитную индукцию в основных участках магнитопровода, максимальную плотность тока в обмотках, допустимый коэффициент полюсного перекрытия, предельную для выбранного класса изоляции температуру обмотки.

Следующим очень важным шагом построения математической модели является выбор независимых переменных. Как правило, это параметры, однозначно определяющие геометрию машины. Они должны иметь ясный физический смысл и четко определенный диапазон изменения. Логично предположить, что основные характеристики машины в большей степени зависят от соотношения активных площадей (площади статора и ротора, площади зубцово-пазового слоя, площади активной меди), чем от конкретных линейных размеров. Поэтому в качестве независимых переменных выбраны так называемые обобщенные переменные, которые являются соотношением площадей активных зон магнитопровода. Для машины двойного питания это новый подход в построении математической модели [18–19]. Для полного описания геометрии поперечного сечения магнитопровода достаточно будет шести обобщённых переменных:

– f_s – показывает, какую часть от площади поперечного сечения электрической машины занимают активные части электрической машины;

– f_a – отражает соотношение площади поверхности, занимаемой ротором, к площади поверхности, которую занимают активные части машины;

– f_{er} – показывает соотношение площади поверхности пазово-зубцового слоя ротора к площади поверхности, которую занимает сам ротор;

– f_{zr} – отражает соотношение площади поверхности, занимаемой пазами ротора, к площади поверхности, которую занимает пазовозубцовый слой ротора;

– f_{es} – показывает соотношение площади поверхности пазово-зубцового слоя статора к площади поверхности, которую занимает сам статор;

– f_{zs} – отражает соотношение площади поверхности, занимаемой пазами статора, к площади поверхности, которую занимает пазовозубцовый слой статора;

Подчеркнем наглядность и ясный физический смысл введенных обобщенных переменных

Конструкция машины двойного питания идентична конструкции асинхронного двигателя с фазным ротором, отличия имеются только режимах работы. Генератор двойного питания способен работать в широком диапазоне скоростей, но электромагнитный расчёт для определения оптимальной геометрии можно провести только на одну фиксированную скорость вращения. Наиболее целесообразно в этом случае проводить расчёт при синхронной скорости вращения ротора. В этом режиме обмотки ротора питаются постоянным током, и машина представляет собой обычный синхронный генератор с электромагнитным возбуждением. В связи с этим математическую модель можно построить на основе аналитических методик расчёта асинхронного двигателя с фазным ротором, однако потребуется доработка алгоритма, чтобы включить в структуру математической модели блок расчёта реакции якоря.

Приняв за начальный параметр наружный диаметр статора электрической машины и задавшись значениями обобщенных переменных, можно определить основные геометрические размеры машины двойного питания (рис.2).

Диаметр отверстия в роторе под вал $D_{вн}$:

$$D_{вн} = D_{н} \cdot \sqrt{1 - f_s}, \quad (1)$$

где $D_{н}$ – наружный диаметр статора.

Диаметр расточки ротора D_a :

$$D_a = D_{н} \sqrt{1 - f_s + f_a \cdot f_s}. \quad (2)$$

Высота паза ротора h_{zr} :

$$h_{zr} = 0,5 D_{н} (\sqrt{1 - f_s + f_a \cdot f_s} - \sqrt{1 - f_s - f_a \cdot f_{er} \cdot f_s + f_a \cdot f_s}). \quad (3)$$

Ширина паза ротора b_{zr} :

$$b_{zr} = \frac{\pi D_{н} f_{zr}}{2z_p} (\sqrt{1 - f_s + f_a \cdot f_s} + \sqrt{1 - f_s - f_a \cdot f_{er} \cdot f_s + f_a \cdot f_s}), \quad (4)$$

где z_p – количество пазов ротора.

Высота паза статора h_{zs} :

$$h_{zs} = 0,5 \sqrt{f_{es} \cdot D_{н}^2 - (D_a + 2\delta)^2 (f_{es} - 1) - D_a - 2\delta}, \quad (5)$$

где δ – величина воздушного зазора.

Ширина паза статора b_{zs} :

$$b_{zs} = \frac{f_{zs} \cdot f_{es} \cdot \pi (D_H^2 - (D_a + 2\delta)^2)}{4Z_s \cdot h_{zs}}, \quad (6)$$

где Z_s – количество зубцов статора.

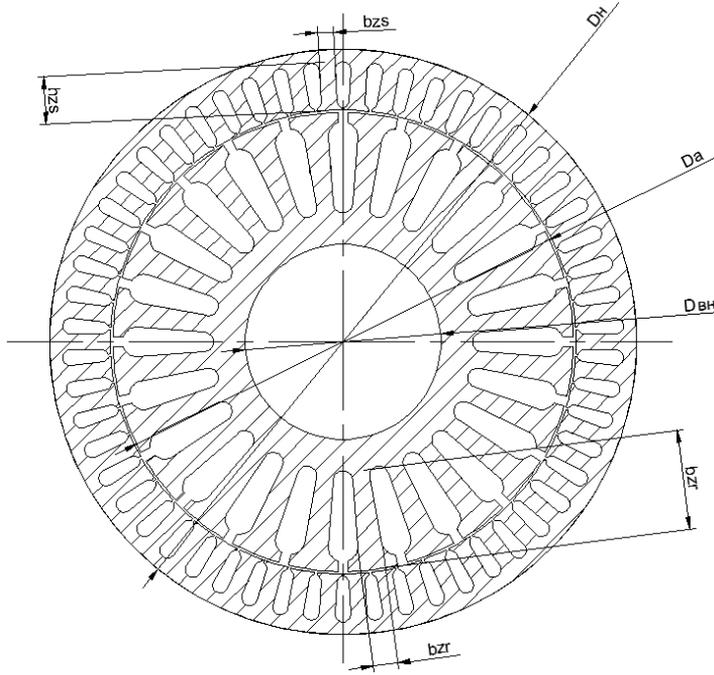


Рис. 2. Эскиз поперечного сечения машины двойного питания

Таким образом, при известном наружном диаметре и заданных обобщенных переменных можно однозначно определить поперечную геометрию асинхронизированного синхронного генератора.

Следующим этапом производится расчёт основных энергетических параметров электрической машины по следующим уравнениям:

$$S^* = P_n \frac{k_e}{\cos\varphi}, \quad (7)$$

$$\tau = \pi \frac{D_a + 2\delta}{2p}, \quad (8)$$

$$S_{\text{medi_statora}} = S_{\text{paz_statora}} \cdot k_{z_statora}, \quad (9)$$

$$I_{nf_s} = \frac{S^*}{3U_{n_s} \cdot k_e} \text{ – при схеме соединения «треугольник»}, \quad (10)$$

$$I_{nf_s} = \frac{S^*}{\sqrt{3}U_{n_s} \cdot k_e} \text{ – при схеме соединения «звезда»}, \quad (11)$$

$$I_{p_s} = \frac{I_{n_s}}{a}, \quad (12)$$

$$q_{ef_s} = \frac{I_{p_s}}{J_s}, \quad (13)$$

$$u_{p_s} = \frac{S_{medi_statora}}{q_{ef_s}}, \quad (14)$$

$$w_1 = \frac{u_{p_s} \cdot z_{stator}}{2am}, \quad (15)$$

$$A = I_{nf_s} \cdot m \cdot \frac{w_1}{p\tau}, \quad (16)$$

где S^* – полная расчётная мощность, P_n – требуемая номинальная мощность (параметр из ТЗ), τ – полюсное деление, D_a – наружный диаметр ротора, δ – величина воздушного зазора (параметр из технологических ограничений), p – число пар полюсов, $S_{medi_statora}$ – площадь меди в пазу статора, $k_{z_statora}$ – коэффициент заполнения паза статора медью (параметр из технологических ограничений), $S_{paz_statora}$ – площадь паза статора, I_{nf_s} – номинальный фазный ток в обмотке статора, U_{n_s} – номинальное фазное напряжения статора (параметр из ТЗ), k_e – коэффициент ЭДС, I_{p_s} – ток в параллельной ветви обмотки статора, a – количество параллельных ветвей обмотки статора, q_{ef_s} – площадь эффективного проводника в обмотке статора, J_s – плотность тока в обмотке статора (параметр из физических ограничений), u_{p_s} – число эффективных проводников, w_1 – число витков обмотки статора, z_{stator} – число пазов статора, m – число фаз статора (параметр из ТЗ), A – линейная нагрузка.

Длина электрической машины определяется по формуле Арнольда для синхронных машин с электромагнитным возбуждением:

$$l_\delta = 6,1 \frac{S^*}{k_B \cdot k_{ob} \cdot \alpha_\delta \cdot A \cdot B_\delta (Da + 2\delta)^2 n}, \quad (17)$$

где l_δ – длина электрической машины, k_{ob} – обмоточный коэффициент (параметр из физических ограничений), k_B – коэффициент формы поля (параметр из физических ограничений), α_δ – коэффициент полюсного перекрытия (параметр из физических ограничений), B_δ – магнитная индукция в воздушном зазоре (параметр из физических ограничений), n – частота вращения ротора (параметр из ТЗ).

На конечном этапе расчёта энергетики определяются активное сопротивление обмотки статора, магнитный поток и ЭДС по формулам:

$$r_1 = \frac{l \cdot w_1 \cdot \rho}{q_{ef_s} \cdot a}, \quad (18)$$

$$\Phi = B_{\delta} \cdot \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}, \quad (19)$$

$$E = 4\Phi \cdot k_B \cdot \omega_1 \cdot f \cdot k_{ob}, \quad (20)$$

где r_1 – активное сопротивление обмотки статора, l – средняя длина витка, ρ – удельное сопротивление меди, Φ – магнитный поток, E – ЭДС.

Следующим этапом производится расчёт магнитной цепи электрической машины, в котором определяют магнитные индукции на каждом участке цепи по уравнениям:

$$B_{z_s} = \frac{B_{\delta} \cdot t_s}{b_{zs_s} \cdot k_c}, \quad (21)$$

$$B_{z_r} = \frac{B_{\delta} \cdot t_r}{b_{zs_r} \cdot k_c}, \quad (22)$$

$$B_{j_s} = \frac{\alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot \tau}{2h_{j_s} \cdot k_c}, \quad (23)$$

$$B_{j_r} = \frac{\alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot \tau}{2h_{j_r} \cdot k_c}, \quad (24)$$

где B_{z_s} – индукция в зубце статора, t_s – зубцовое деление статора, b_{zs_s} – средняя ширина зубца статора, B_{z_r} – индукция в зубце ротора, b_{zs_r} – средняя ширина зубца ротора, t_r – зубцовое деление ротора, B_{j_s} – индукция в спинке статора, h_{j_s} – высота спинки статора, B_{j_r} – индукция в спинке ротора, h_{j_r} – высота спинки ротора.

Следующим шагом расчёта магнитной цепи является расчёт характеристики холостого хода машины для выбранного типа электротехнической стали по уравнению полного тока для магнитной цепи:

$$F_{\text{ц}} = \oint H dl, \quad (25)$$

где $F_{\text{ц}}$ – МДС магнитной цепи, H – напряжённость магнитного поля, l – длина участка.

В соответствии с разбиением магнитной цепи на участки МДС цепи будет равна сумме МДС на каждом участке:

$$F_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^u H_i l_i, \quad (26)$$

где H_i – напряжённость магнитного поля на i -м участке, l_i – длина i -го участка, u – количество участков.

Далее производится расчёт МДС реакции якоря через построение векторной диаграммы синхронной машины и частичные характеристики намагничивания [20–21].

После определения МДС, реакции якоря производится расчёт тока возбуждения и МДС возбуждения. Для правильного проведения расчётов стоит отметить, что в синхронном режиме возбуждение генератора производится постоянным током, а обмотка ротора, в свою очередь, у данных электрических машин является трёхфазной. В связи с этим появляется возможность создания результирующего вектора МДС за счет питания каждой фазы требуемыми токами. Наиболее оптимальным является вариант, в котором две фазы питаются номинальным током возбуждения, а третья фаза отключается.

Векторная диаграмма результирующей МДС обмоток возбуждения представлена на рис. 3.

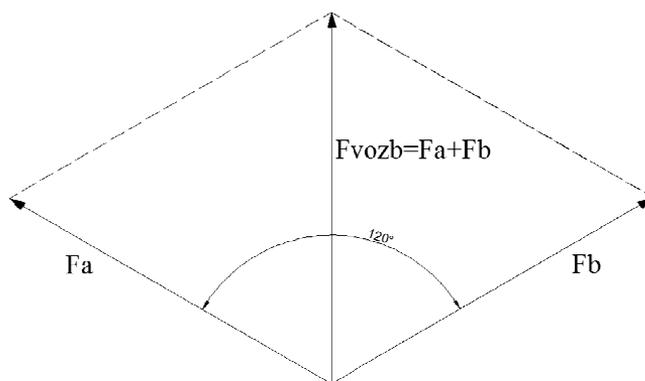


Рис. 3. Векторная диаграмма результирующей МДС обмотки возбуждения

Расчёт производится в следующей последовательности:

$$S_{\text{paz_rotora}} = b_{\text{paz_rotora}} \cdot h_{\text{paz_rotora}}, \quad (27)$$

$$q_{\text{provod_rotora}} = \frac{S_{\text{paz_rotora}}}{u_{\text{en}}} \cdot k_{z_rotora}, \quad (28)$$

$$I_B = q_{\text{provod_rotora}} \cdot J_{\text{rotor}}, \quad (29)$$

$$w_{\text{rotora}} = \frac{u_{\text{вп}} \cdot z_{\text{rotor}}}{2a_{\text{rotor}} \cdot m} \cdot k_{z_rotora}, \quad (30)$$

$$k_{r_rotora} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q_{\text{rotor}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2mq}\right)}, \quad (31)$$

$$F_{\text{rotora}} = I_B \frac{w_{\text{rotora}} \cdot k_{r_rotora}}{p}, \quad (32)$$

где $S_{\text{paz_rotora}}$ – площадь паза ротора, $b_{\text{paz_rotora}}$ – ширина паза ротора, $h_{\text{paz_rotora}}$ – высота паза ротора, $q_{\text{provod_rotora}}$ – эффективное сечение

проводника обмотки ротора, $u_{\text{вп}}$ – число эффективных проводников обмотки ротора, $k_{z_{\text{rotora}}}$ – коэффициент заполнения паза ротора, $I_{\text{в}}$ – ток возбуждения, J_{rotor} – плотность тока в обмотке ротора, w_{rotora} – количество витков в фазе обмотки ротора, z_{rotor} – число пазов ротора, a_{rotor} – число параллельных ветвей обмотки ротора, $k_{r_{\text{rotora}}}$ – коэффициент распределения обмотки ротора, q_{rotor} – число проводников на полюс и фазу ротора, F_{rotora} – МДС фазы обмотки ротора.

На конечном этапе производится расчёт массы активных частей электрической машины, определение потерь и КПД. Расчёт производится в следующей последовательности:

$$m_{el} = \rho_{el} \cdot V_{el}, \quad (33)$$

$$P_{el_stator} = I_{nf_s}^2 \cdot r_1 \cdot m, \quad (34)$$

$$P_{vozv} = (m - 1) I_{\text{в}}^2 \cdot r_{\text{в}}, \quad (35)$$

$$P_{\text{mag_zs}} = k_{ds} \cdot p_{1,50} \cdot B_{z_s} \cdot U_{fn_s}^2 \cdot m_{z_stator} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}, \quad (36)$$

$$P_{\text{mag_js}} = k_{da} \cdot p_{1,50} \cdot B_{j_s} \cdot U_{fn_s}^2 \cdot m_{j_stator} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}, \quad (37)$$

$$P_{\text{dob}} = Pn \cdot 0,005, \quad (38)$$

$$\sum P = P_{el_stator} + P_{vozv} + P_{\text{mag_zs}} + P_{\text{mag_js}} + P_{\text{dob}} + P_{\text{meh}}, \quad (39)$$

$$P_{\text{gen}} = 3 I_{nf_s} (E - I_{nf_s} \cdot r_1) \cos \varphi, \quad (40)$$

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{\sum P + P_{\text{gen}}}, \quad (41)$$

где m_{el} – масса элемента (зубца, ярма, обмотки), ρ_{el} – плотность материала, V_{el} – объём элемента, P_{el_stator} – электрические потери в обмотке статора, P_{vozv} – потери на возбуждение, $r_{\text{в}}$ – активное сопротивление обмотки возбуждения, $P_{\text{mag_zs}}$ – магнитные потери в зубцах статора, k_{ds} – коэффициент неравномерности распределения потока в зубце, $p_{1,50}$ – удельные магнитные потери в электротехнической стали, U_{fn_s} – фазное напряжение обмотки статора, m_{z_stator} – масса зубцов статора, $P_{\text{mag_js}}$ – магнитные потери в ярме статора, k_{da} – коэффициент неравномерности распределения потока в ярме, m_{j_stator} – масса ярма статора, P_{dob} – добавочные потери, $\sum P$ – суммарные потери, P_{meh} – механические потери, P_{gen} – полезная мощность, η – КПД.

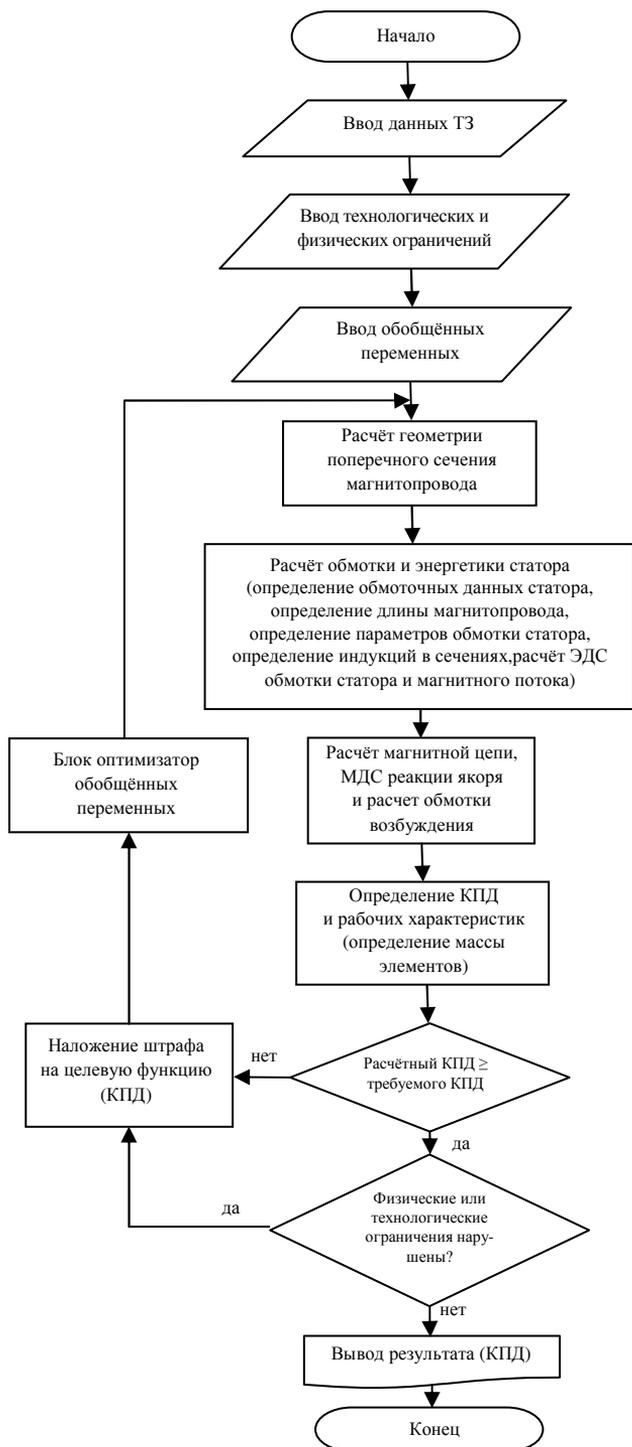


Рис. 4. Блок-схема математической модели расчёта машины двойного питания

После расчёта КПД должен производиться анализ нарушения технологических ограничений. В случае если нарушены какие-либо технологические ограничения, математическая модель предусматривает наложение штрафного коэффициента на целевую функцию КПД. В этом случае блок-оптимизатор, генерирующий независимые переменные, не рассматривает данный вариант в качестве оптимального, в отличие от вариантов, где эти ограничения не нарушены. Блок-схема структуры математической модели представлена на рис. 4.

4. Анализ математической модели расчета машины двойного питания. Главным достоинством представленной математической модели является её простая структура, состоящая из небольшого числа алгебраических уравнений. Такую модель можно включать в большое число оптимизационных циклов при определении наилучшей геометрии. Обобщенные переменные имеют небольшой диапазон изменения и фиксированные границы. Это во многом упрощает выбор метода оптимизации.

В данном проекте для блока оптимизатора был выбран метод по координатного спуска Гаусса–Зейделя при движении к оптимуму в сочетании с методом Фибоначчи при определении шага. Как было отмечено, в алгоритм включен метод штрафных коэффициентов при нарушении ограничений.

С использованием данной математической модели была рассчитана машина двойного питания мощностью 3 МВт, с синхронной частотой вращения 1000 об/мин, напряжением питания обмотки статора 690 В с требуемым критерием оптимальности – максимум КПД.

Для оценки точности разработанной модели результаты определения оптимальной геометрии были проанализированы с применением САД комплекса AnsysElectronicsDesktop, в основу которого положен метод конечных элементов [22–26]. После корректировки некоторых коэффициентов, входящих в математическую модель, расчеты практически совпали. Это подтверждает достаточную точность разработанной математической модели. Краткий сравнительный анализ результатов расчёта приведён в таблице.

Сравнение результатов расчёта

Математическая модель в Delphi			AnsysElectronicsDesktop		
КПД, %	Ток возбуждения, А	Суммарные потери, кВт	КПД, %	Ток возбуждения, А	Суммарные потери, кВт
97,47	1365	81,4	97,6	1310	77,1

Выводы. Применение машины двойного питания в качестве электрического генератора ВЭУ становится одним из основных направлений развития ветроэнергетики. Разработка методики оптимального проектирования машин этого класса становится актуальной задачей. В статье представлен один из вариантов ее решения. Основу математической модели для оптимизации геометрии составили обобщенные переменные, которые имеют небольшой диапазон изменения и фиксированные границы. Этот подход позволил применить методы оптимизации с большим числом итерационных циклов. В проекте использован метод Гаусса–Зейделя в сочетании с методом Фибоначчи. Корректность математической модели была проверена на основе применения более точного САД комплекса AnsysElectronicsDesktop. Сравнительный анализ после корректировки показал хорошую сходимость по основным энергетическим параметрам. На практике методика проектирования, основанная на рассмотренной математической модели может выступать хорошим инструментом для инженеров-расчётчиков электромашиностроительных предприятий.

Библиографический список

1. Ботвинник М.М. Асинхронизированная синхронная машина. – М., – Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 70 с.
2. Котов А.А., Неустроев Н.И. Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 80–89. DOI: 10.14529/power170409
3. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Variable speed power // Procedia Engineering. – December 2015. – Vol. 129. – P. 731–735.
4. Gandzha S., Kiesh I. A proposal of doubly-fed alternator for windmill application // 2nd International Conference on Industrial Engineering. IEEE Conferences. Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Year, 2016. – P. 1–3.
5. Gandzha S.A. The application of synchronous induction generator for windmill // ELMASH–2009. Trudi simposiuma. – M., 2009. – Vol. 1. – P. 168–170.
6. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Application brushless machines with combine excitation for a small and medium power windmills // Procedia Engineering. – December 2015. – Vol. 129. – P. 191–194.

7. Обозов А.Дж., Ботпаев Р.М. Возобновляемые источники энергии: учебное пособие для вузов. – Бишкек: Изд-во КГТУ, 2010. – 218 с.
8. Dynamics of DFIG controlled by rotor side converter in wind energy / P. Stumpf, J. Berei, I. Nagy, I. Vajk // IEEE, 5th International Youth Conference on Energy. – 2015. – P. 446–454. DOI:10.1109/IYCE.2015.7180797
9. Lebsir A. Electric Generators Fitted to Wind Turbine Systems: An Up-to-Date Comparative Study. – URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01213120> (дата обращения: 10.08.2018).
10. Electric Machines and their comparative study for wind energy conversion systems (WECSs) / Md. Rejwanur Rashid Mojumdar, Mohammad Sakhawat Hossain Himel, Md. Salman Rahman, Sheikh Jakir Hossain // Journal of Clean Energy Technologies. – 2016. – Vol. 4. – No. 4. – P. 290–294. DOI: 10.7763/JOCET.2016.V4.299
11. Fujin Deng, Dong Liu, Zhe Chen, Peng Su. Control Strategy of Wind Turbine Based on Permanent Magnet Synchronous Generator and Energy Storage for Stand-Alone Systems. *Chinese Journal of Electrical Engineering*. – 2017. – Vol. 3. – No. 1. – P. 51–62.
12. Parker M.A., Soraghan C., Giles A. Comparison of power electronics lifetime between vertical- and horizontal-axis wind turbines // IET Renewable Power Generation. – 2016. – Vol. 10. – P. 679–686. DOI: 10.1049/iet-rpg.2015.0352
13. Курочка А.Л. Синтез оптимальных машин постоянного и пульсирующего тока на основе агрегированных переменных // Известия высш. учебных заведений. Электромеханика. – 1976. – № 6. – С. 608–617.
14. Mehmet Cunkas. Design optimization of electric motors by multiobjective fuzzy genetic algorithms // Mathematical and Computational Applications. – 2008. – Vol. 13. – No. 3. – P. 153–163.
15. Геминтерн В.И., Каган Б.М. Методы оптимального проектирования. – М.: Энергия, 1980.
16. Gandzha S.A. Optimization of parameters of brushless electric machines of a direct current with an axial air gap // State and prospects of development of Electrotechnology (XII Benardos readings): TEZ. Doc. International. scientific.-tech. conf.; 1–3 June 2005 / Ivan. State Energy. Univ. of Illinois. – Ivanovo, 2005. – Vol. 2. – P. 82.
17. A Review of Design Optimization Methods for Electrical Machines / Gang Lei, Jianguo Zhu, Youguang Guo, Chengcheng Liu, Bo Ma // Energies. – 2017. – Vol. 10. – P. 1–31. DOI: 10.3390/en10121962

18. Gandzha S, Kotov A. Application of an Asynchronous Synchronous Alternator for Wind Power Plant of Low, Medium and High Power. Chapter in open access book *Winding Engineering*. Intech Open. – URL: <https://www.intechopen.com/online-first/application-of-an-asynchronous-synchronous-alternator-for-wind-power-plant-of-low-medium-and-high-po>. DOI: 10.5772/intechopen.89255

19. Gandzha S.A., Kotov A.A., Neustroyev N.I. Geometry Optimization of Asynchronous Synchronous Alternator with Using Generalized Variables // 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineerings (UralCon). – 2019. – P. 373–377. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877634

20. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.

21. Лифанов, В.А., Помогаев Г.В., Ермолин Н.П. Расчет электрических машин малой мощности: учеб. пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 127 с.

22. Martyanov A.S., Neustroyev N.I. ANSYS Maxwell Software for Electromagnetic Field Calculations // *Eastern European Scientific Journal*. – 2014. – № 5. – P. 206–210. DOI: 10.12851/EESJ201410C05ART03

23. Неустроев Н.И., Котов А.А., Киесш И.Е. Применение системы автоматического проектирования AnsysMaxwell для количественной оценки влияния эффекта вытеснения тока в электрических машинах переменного тока // *Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика*. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 112–121.

24. Gandzha S.A. Modelling of Permanent Magnet Direct Current Motor with Electromagnetic Reduction // *Collection of papers of Software Users Sixth Conference CAD_FEMGmbH*; 20–21 April 2006. – М., 2006. – P. 358–360.

25. Gandzha S.A., Erlisheva A.V. Starter-generator for autonomous source of energy supply // *Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика*. – 2005. – Вып. 6. – № 9. – С. 84–86.

26. Gandzha S.A., Sogrin A.I., Kiessh I.E. The Comparative Analysis of Permanent Magnet Electric Machines with Integer and Fractional Number of Slots per Pole and Phase // *Procedia Engineering*. – December 2015. – Vol. 129. – P. 408–414.

References

1. Botvinnik M.M. Asinkhronizirovannaia sinkhronnaia mashina [Asynchronous Synchronous Machine]. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. 70 p.
2. Kotov A.A., Neustroev N.I. Primenenie generatora dvoynogo pitaniia dlia vetroenergeticheskikh ustanovok maloi, srednei i bol'shoi moshchnosti [The use of dual power generator for wind power plants of low, medium and high power]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 80-89. DOI: 10.14529/power170409
3. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Variable speed power. *Procedia Engineering*. December 2015, vol. 129, pp. 731-735.
4. Gandzha S., Kish I. A proposal of doubly-fed alternator for windmill application. *2nd International Conference on Industrial Engineering. IEEE Conferences. Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Year, 2016, pp. 1-3.
5. Gandzha S.A. The application of synchronous induction generator for windmill. *ELMASH-2009. Trudi simposiuma*. Moscow, 2009, vol. 1, pp. 168-170.
6. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Application brushless machines with combine excitation for a small and medium power windmills. *Procedia Engineering. December 2015*, vol. 129, pp. 191-194.
7. Obozov A.Dzh., Botpaev R.M. Vozobnovliaemye istochniki energii [Renewable energy sources]. Bishkek: Kyrgyzskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2010. 218 p.
8. Stumpf P., Berei J., Nagy I., Vajk I. Dynamics of DFIG controlled by rotor side converter in wind energy. *IEEE, 5th International Youth Conference on Energy*, 2015, pp. 446-454. DOI: 10.1109/IYCE.2015.7180797
9. Lebsir A. Electric Generators Fitted to Wind Turbine Systems: An Up-to-Date Comparative Study, available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01213120> (accessed 10 August 2018).
10. Md. Rejwanur Rashid Mojumdar, Mohammad Sakhawat Hossain Himel, Md. Salman Rahman, Sheikh Jakir Hossain. Electric Machines and their comparative study for wind energy conversion systems (WECSs). *Journal of Clean Energy Technologies*, 2016, vol. 4, no. 4, pp. 290-294. DOI: 10.7763/JOCET.2016.V4.299

11. Fujin Deng, Dong Liu, Zhe Chen, Peng Su. Control Strategy of Wind Turbine Based on Permanent Magnet Synchronous Generator and Energy Storage for Stand-Alone Systems. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2017, vol. 3, no. 1, pp. 51-62.

12. Parker M.A., Soraghan C., Giles A. Comparison of power electronics lifetime between vertical- and horizontal-axis wind turbines. *IET Renewable Power Generation*, 2016, vol. 10, pp. 679-686. DOI: 10.1049/iet-rpg.2015.0352

13. Kurochka A.L. Sintez optimal'nykh mashin postoiannogo i pul'siruiushchego toka na osnove agregirovannykh peremennykh [Synthesis of optimal DC and pulsating current machines based on aggregated variables]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 1976, no. 6, pp. 608-617.

14. Mehmet Cunkas. Design optimization of electric motors by multiobjective fuzzy genetic algorithms. *Mathematical and Computational Applications*, 2008, vol. 13, no. 3, pp. 153-163.

15. Gemintern V.I., Kagan B.M. Metody optimal'nogo proektirovaniia [Optimal Design Methods]. Moscow: Energiia, 1980.

16. Gandzha S.A. Optimization of parameters of brushless electric machines of a direct current with an axial air gap. *State and prospects of development of Electrotechnology (XII Benardos readings): TEZ. Doc. International. scientific.-tech. conf.*, 1-3 June 2005. Ivan. State Energy. Univ. of Illinois. Ivanovo, 2005, vol. 2, 82 p.

17. Gang Lei, Jianguo Zhu, Youguang Guo, Chengcheng Liu, Bo Ma. A Review of Design Optimization Methods for Electrical Machines. *Energies*, 2017, vol. 10, pp. 1-31. DOI: 10.3390/en10121962

18. Gandzha S, Kotov A. Application of an Asynchronous Synchronous Alternator for Wind Power Plant of Low, Medium and High Power. Chapter in open access book *Winding Engineering*. Intech Open, available at: <https://www.intechopen.com/online-first/application-of-an-asynchronous-synchronous-alternator-for-wind-power-plant-of-low-medium-and-high-po>. DOI: 10.5772/intechopen.89255

19. Gandzha S.A., Kotov A.A., Neystroev N.I. Geometry Optimization of Asynchronous Synchronous Alternator with Using Generalized Variables. *2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineerings (UralCon)*, 2019, pp. 373-377. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877634

20. Kopylov I.P. Proektirovanie elektricheskikh mashin [Electrical Machine Design]. Moscow: Vysshaia shkola, 2005. 767 p.

21. Lifanov, V.A., Pomogaev G.V., Ermolin N.P. Raschet elektricheskikh mashin maloi moshchnosti [Calculation of low-power electric machines]. Cheliabinsk: Iuzhno-Ural'skii gosudarstvennyi universitet, 2008. 127 p.

22. Martyanov A.S., Neustroyev N.I. ANSYS Maxwell Software for Electromagnetic Field Calculations. *Eastern European Scientific Journal*, 2014, no. 5, pp. 206-210. DOI: 10.12851/EESJ201410C05ART03

23. Neustroyev N.I., Kotov A.A., Kiessh I.E. Primenenie sistemy avtomaticheskogo proektirovaniia AnsysMaxwell dlia kolichestvennoi otsenki vliianiia effekta vytesneniia toka v elektricheskikh mashinakh peremennogo toka [Application of AnsysMaxwell automated design system to quantify the effect of current displacement effect in AC electric machines]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 112-121.

24. Gandzha S.A. Modelling of Permanent Magnet Direct Current Motor with Electromagnetic Reduction. *Collection of papers of Software Users Sixth Conference CAD_FEMGmbH*, 20-21 April 2006. Moscow, 2006, pp. 358-360.

25. Gandzha S.A., Erlisheva A.V. Starter-generator for autonomous source of energy supply. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2005, iss. 6, no. 9, pp. 84-86.

26. Gandzha S.A., Sogrin A.I., Kiessh I.E. The Comparative Analysis of Permanent Magnet Electric Machines with Integer and Fractional Number of Slots per Pole and Phase. *Procedia Engineering*. December 2015, vol. 129, p. 408-414.

Сведения об авторах

Котов Антон Андреевич (Челябинск, Россия) – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: aakot@mail.ru).

Неустроев Николай Игоревич (Челябинск, Россия) – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: neustroyev.nikolai@mail.ru).

Чуйдук Иван Александрович (Челябинск, Россия) – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина, 76, e-mail: ivan957495@bk.ru).

About the authors

Kotov Anton Andreevich (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering of the South Ural State University (454080, Chelyabinsk, 76, Lenin pr., e-mail: aakot@mail.ru).

Neystroev Nikolai Igorevich (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering of the South Ural State University (454080, Chelyabinsk, 76, Lenin pr., e-mail: neustroev.nikolai@mail.ru).

Chydyk Ivan Aleksandrovich (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering of the South Ural State University (454080, Chelyabinsk, 76, Lenin pr., e-mail: ivan957495@bk.ru).

Получено 27.01.2020