

Численные методы расчета параметров реактивных ВТСП электродвигателей

КОВАЛЕВ К.Л., ЛАРИОНОВ С.А., МОДЕСТОВ К.А.

Рассматриваются алгоритмы расчета методом конечных элементов двумерных распределений магнитных полей и электромагнитных параметров новых типов реактивных электродвигателей на основе объемных высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) элементов. Приводятся результаты численного исследования конструктивного исполнения активной зоны указанных двигателей со слоистым композитным ротором. Дано сравнение расчетных и экспериментальных характеристик таких двигателей.

Ключевые слова: высокотемпературные сверхпроводники, реактивные электродвигатели, композитные роторы, метод конечных элементов.

В последние годы в российских и зарубежных научных центрах ведутся интенсивные исследования высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) реактивных электродвигателей (РД) с объемными высокотемпературными сверхпроводниковыми (ВТСП) элементами. Массоэнергетические показатели таких двигателей в 2-3 раза выше чем у электрических двигателей традиционного исполнения, работающих в среде жидкого азота.

Параметры реактивных электрических машин и распределения электромагнитных полей в их активной зоне могут определяться на основе решения двумерных электродинамических задач. При аналитическом решении таких задач обычно предполагается, что магнитные проницаемости материалов двигателя постоянны, что ограничивает применение таких методов при разработке конкретных электрических машин. Наиболее точно учесть магнитные свойства материалов двигателя, а также геометрию зубцовой зоны машины можно с помощью численных расчетов электромагнитных полей в активной зоне ВТСП РД методом конечных элементов (МКЭ).

Обзор литературных данных показывает, что, несмотря на актуальность, методы численного расчета параметров ВТСП РД в настоящее время рассмотрены недостаточно полно. В связи с этим в данной статье предложена методика, позволяющая проводить детальные расчеты рабочих процессов и выходных параметров ВТСП РД при заданном напряжении сети с помощью пакета прикладных программ (ППП) метода конечных элементов «Elcut 5.2» ПК TOP [1, 2]. Приведены также результаты численных расчетов различных вариантов конструктивного исполнения ВТСП РД.

Определение параметров ВТСП РД по линейной части электродвигателей. Методика расчета состоит из трех основных этапов: подготовительный, на котором создается расчетная задача (включающая в себя геометрические и электромагнитные данные о РД), расчета главных индуктивных сопротивлений и расчета зависимости механического момента от тока РД.

Этап 1: подготовка расчетной модели. В начале расчета необходимо задать геометрию поперечного сечения РД и длину активной зоны, электротехнические параметры и магнитные характеристики ферромагнитных и ВТСП материалов ротора и статора. По геометрическим данным в программе «Elcut» формируется геометрическая расчетная модель РД. Всем элементам двигателя присваиваются оригинальные имена.

Каждый элемент (блок) характеризуется следующими свойствами: магнитной проницаемостью (постоянной, нелинейной или тензорной), плотностью тока и коэрцитивной силой магнита. Например, в спинке статора, магнитомягких и ВТСП элементах ротора задаются нелинейные кривые намагничивания, плотность тока и коэрцитивная сила магнита принимаются равными нулю. В обмотках фазы задаются плотности тока, отличные от нуля, относительная магнитная проницаемость, равная единице, коэрцитивная сила магнита равна нулю. Нелинейные кривые намагничивания позволяют учитывать насыщение магнитомягких элементов РД, что приводит к повышению точности расчетов. На внешней поверхности РД задается граничное условие $A=0$. Расчетная сетка конечных элементов строится автоматически с переменным шагом для ускорения последующего расчета (см. рис. 1, в).

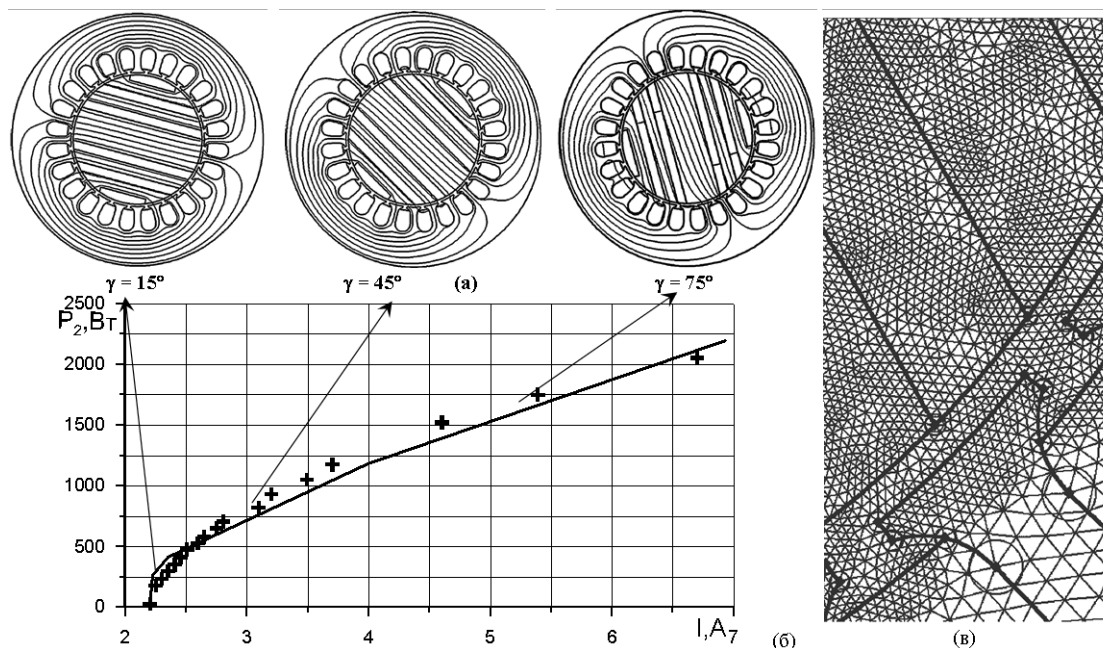


Рис. 1. Распределение магнитного поля в активной зоне ВТСП РД (а) и нагрузочная характеристика двигателя с композитным слоистым ротором при напряжении сети 170 В («+» - эксперимент, «-» - расчет) (б), структура сетки (в);

Этап 2: определение главных индуктивных сопротивлений. Как известно из векторной диаграммы РД, зависимость тока фазы от угла нагрузки γ выглядит следующим образом [3, 4]:

$$I(\gamma) = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{X_d^2 + X_q^2 + X_d^2 - X_q^2 \cos(2\gamma)}} \quad (1)$$

Где γ - угол между током и осью d ротора. Для определения главных индуктивных сопротивлений X_d и X_q необходимо подготовить две геометрических расчетных модели РД: в первой из них положение ротора соответствует углу между полем статора и осью d ротора γ , равному нулю, т. е. х.х. В этом случае, согласно векторной диаграмме ВТСП РД, ток статора может быть определен по (1) как

$$I(\gamma = 0) = I_{xx} = U/X_d \quad (2)$$

Во второй модели положение ротора соответствует углу $\gamma = \pi/2$. В этом случае

$$I(\gamma = \pi/2) = I_{\max} = U/X_q \quad (3)$$

Главные индуктивные сопротивления X_d и X_q определяются итеративным способом. Задается фиксированное фазное напряжение сети U . Плотность тока в пазах задается следующим соотношением:

$$j = n\sqrt{2}I/S, \quad (4)$$

где n – количество проводников в пазу, I – действующее значение тока фазы, S – площадь паза.

При этом плотности тока распределены по фазам следующим образом: $I_a=I$ в фазе A ($I_x=-I$, соответственно, в фазе X), $I_b=I_c=-I/2$ в фазах B и C ($I_y=I_z=I/2$, соответственно, в фазах Y и Z) (рис. 2).

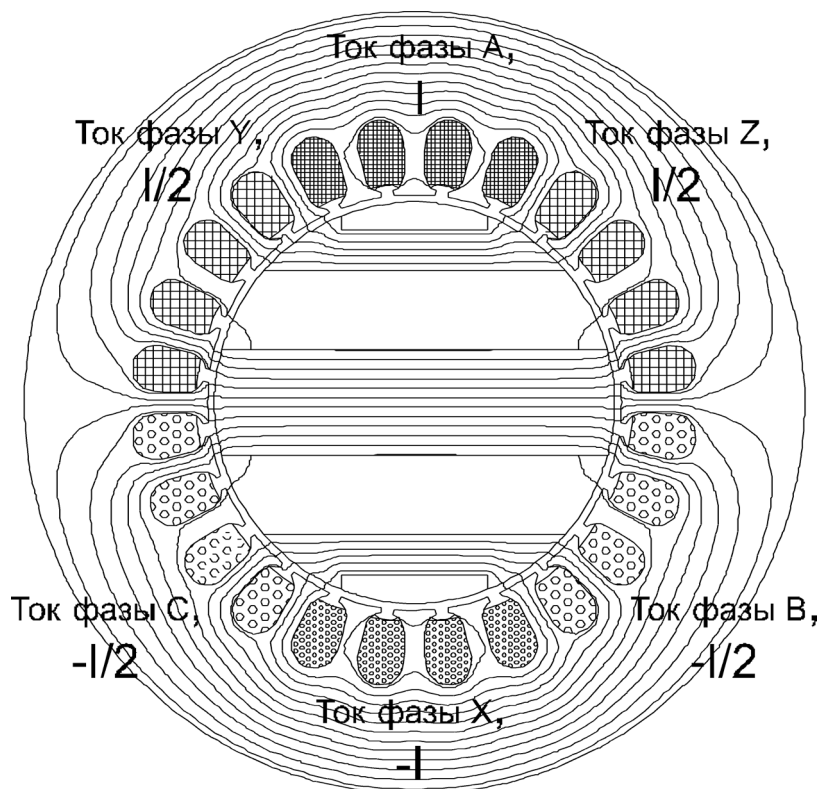


Рис. 2. Распределение плотности тока по фазам в поперечном сечении ВТСР РД;

Далее задача решается следующим образом. Сначала определяется магнитный поток Φ_0 через композитный ротор, и потом вычисляются главные индуктивные сопротивления X_{ad} и X_{aq} по следующим соотношениям [3]:

$$\begin{aligned} X_{ad} &= \omega L = \Phi_0 W_a L_s \omega / \sqrt{2} I \Big|_{\gamma=0}; \\ X_{aq} &= \omega L = \Phi_0 W_a L_s \omega / \sqrt{2} I \Big|_{\gamma=\pi/2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\omega=2\pi f$ – частота вращения двигателя, L – индуктивность фазы, W_a – число витков в фазе, L_s – длина электродвигателя. Важно отметить, что в определенных таким образом X_{ad} и X_{aq} учитывается пазовое сопротивление рассеяния.

После этого вычисляется значение напряжений по соотношениям $U_{xx} = I_{xx} X_d$ и $U_{\max} = I_{\max} X_q$ (при этом должно выполняться условие $U_{xx} = U_{\max} = U$), проводится коррекция значений тока фазы для обеих моделей и производится повторный расчет вплоть до достижения заданной точности вычисления главных индуктивных сопротивлений.

Этап 3: расчет рабочей характеристики электродвигателя. Зная главные индуктивные сопротивления X_{ad} и X_{aq} и используя (1) – зависимость тока от положения ротора (угла нагрузки γ), можно задать плотности тока в пазах статора при любом положении ротора. Далее проводится расчет распределения магнитных полей для различных значений γ в диапазоне $0 \div \pi/2$. После расчета магнитных полей необходимо выделить замкнутый кольцевой контур, охватывающий ротор, для интегрирования локальных сил и вычисления механического момента. Суммарный момент магнитостатических сил, действующих на тела, заключенные в заданном объеме находится как [5]

$$M = \frac{1}{2} \oint ((r \times H)(nB) + (r \times B)(nH) - (r \times n)(HB)) ds \quad (6)$$

где r - радиус-вектор точки интегрирования.

Механическая мощность РД вычисляется по найденному значению механического момента M как $P_2 = M\omega L_s$. В результате определяется нагрузочная характеристика двигателя $P_2 = f(I)$. Типичный вид такой зависимости представлен на рис. 1,б. На рис. 1,а показаны картины распределения магнитного поля в РД при различной механической нагрузке, определяемой нагрузочным углом γ .

Приближенный учет влияния лобовых частей. Влияние лобовых частей на выходную характеристику ВТСП РД можно приближенно учесть на основе теории магнитных цепей. В реактивных двигателях $X_d = X_{ad} + X_\sigma$ и $X_q = X_{aq} + X_\sigma$, где X_{ad} , X_{aq} – индуктивные сопротивления линейной части ВТСП РД, а X_σ – сопротивление лобового рассеяния. Поскольку, в отличие от двигателей традиционного исполнения в ВТСП РД реализуется соотношение $X_q < X_\sigma$, то в них учет сопротивления лобового рассеяния особенно важен. Замена действующего напряжения фазы U на $U - IX_\sigma$ (где I - действующее значение тока статора) позволяет приближенно учесть падение напряжения на лобовых частях двигателя. Без учета лобового рассеяния значения индуктивного сопротивления по оси q весьма малы, что приводит к чрезмерно высоким значениям тока К.З. Сопротивление лобового рассеяния шунтирует этот ток, что приводит к более точному расчету характеристик ВТСП РД.

Сопоставление ВТСП РД с различной геометрией активной зоны. Разработанная методика расчета использовалась для поиска такой геометрии активной зоны ВТСП РД, которая обеспечивала бы максимальную выходную мощность. Рассматривались различные геометрические решения ротора и статора, варьировались значения воздушного зазора ВТСП РД. В качестве базового был выбран двигатель с геометрией статора $D \times L = 62,7 \times 83$ мм², число витков фазы $W_a = 264$ [6].

Геометрия ротора. В процессе поиска рациональной геометрии активной зоны были рассмотрены следующие конструкции ВТСП роторов (рис. 3):

- №1. с шестью ВТСП пластинами толщиной 4 мм и массивной центральной магнитомягкой пластиной толщиной 16 мм;
- №2. с четырьмя ВТСП пластинами толщиной 12 мм и массивной центральной магнитомягкой пластиной толщиной 16 мм;
- №3. с массивной центральной магнитомягкой пластиной толщиной 16 мм, остальная часть ротора состояла из чередующихся тонких пластин ВТСП материала и магнитомягкой стали толщиной 0,5 мм;
- №4. полностью шихтованный ротор, состоящий из чередующихся тонких пластин ВТСП материала и магнитомягкой стали толщиной 0,5 мм.

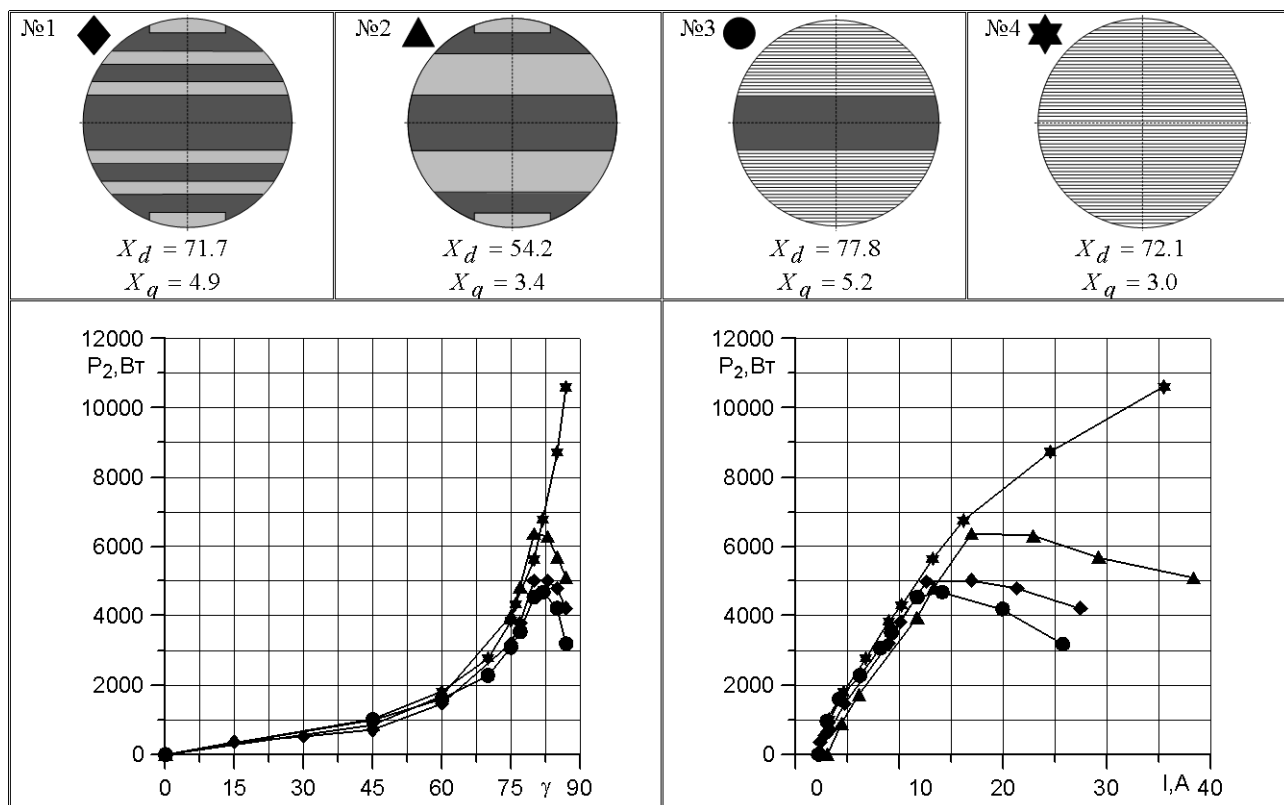


Рис. 3. Параметры реактивных ВТСП двигателей с различными роторами (№ 1 – ротор с шестью пластинами, № 2 – ротор с четырьмя пластинами, № 3 – шихтованный ротор с массивной центральной частью, № 4 – идеально шихтованный ротор) и их рабочие характеристики при различных структурах ротора;

Параметры ВТСП РД с различными роторами и их рабочие характеристики представлены на рис. 3. Видно, что полностью шихтованный ротор (№ 4 на рис. 3) обеспечивает максимальную выходную мощность. Однако такую конструкцию ротора трудно реализовать на практике. Ротор с центральной пластиной и тонкими чередующимися ВТСП и ферромагнитными пластинами по обе стороны от нее (№ 3 на рис. 3) обеспечивает заметно меньшую выходную мощность РД.

В качестве *основных вариантов* при дальнейшем поиске рациональной конструкции были выбраны роторы № 1 и № 2. Рабочие характеристики РД с этими роторами приведены на рис. 4,а. Видно, что РД с ротором № 2 обладает несколько большей выходной мощностью, чем с ротором № 1.

Число зубцов. Влияние числа зубцов статора на выходную мощность ВТСП РД проиллюстрировано рис. 4,б. Видно, что увеличение числа пазов статора с 24 до 36 не оказывает заметного влияния на выходную мощность двигателя, т. е. рабочие характеристики ВТСП РД практически не зависят от геометрии статоров. Это позволит использовать в конструкциях статоров стандартные шихтованные пакеты.

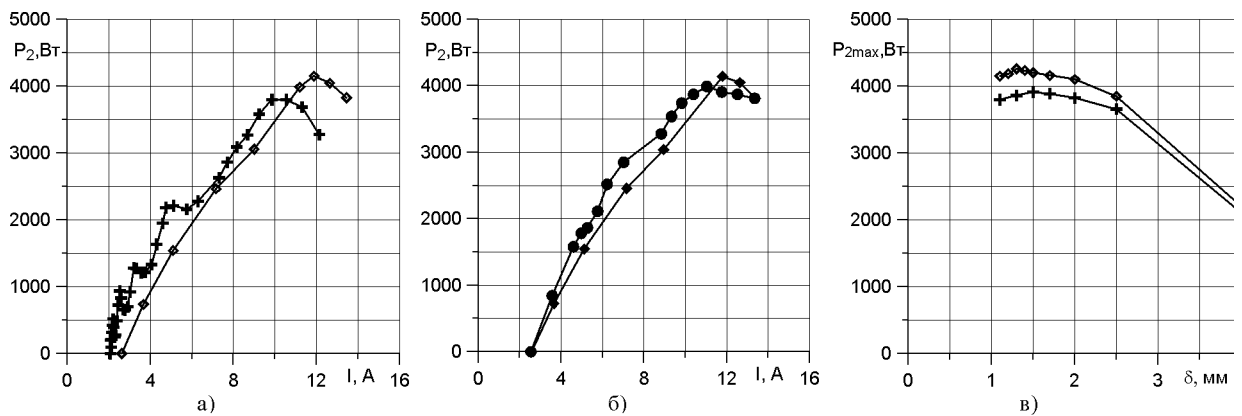


Рис. 4. Зависимости выходной мощности ВТСП РД от тока фазы: (а) - при конструктивном исполнении ротора с четырьмя («◆») и шестью («+») ВТСП пластинами; (б) – при исполнении статора с 24-мя («◆») и 36-ю («●») пазами; (в) зависимость максимальной выходной мощности ВТСП РД от величины воздушного зазора в случае конструктивного исполнения ротора с четырьмя (метки «▲») и шестью (метки «◆») ВТСП пластинами

Воздушный зазор. Зависимость максимальной выходной мощности реактивных ВТСП двигателя от воздушного зазора представлена на рис. 4,в для двух вариантов геометрии ротора (ротор № 2 с 4-мя ВТСП пластинами и ротор № 1 - с 6-ю ВТСП пластинами). Видно, что имеется слабо выраженный максимум (~ 5 %) при толщине воздушного зазора $\delta=1,5$ мм (левая часть рис. 4,в). Дальнейшее увеличение воздушного зазора ведет к снижению выходной мощности (правая часть рис. 4,в). Наличие максимума на кривой зависимости выходной мощности от зазора позволяет реализовать конструкцию ВТСП РД с отдельным криостатом, при этом ротор будет находиться при более низкой температуре, нежели статор, что улучшит диамагнитные свойства керамики в частности и приведет к росту выходной мощности такого РД.

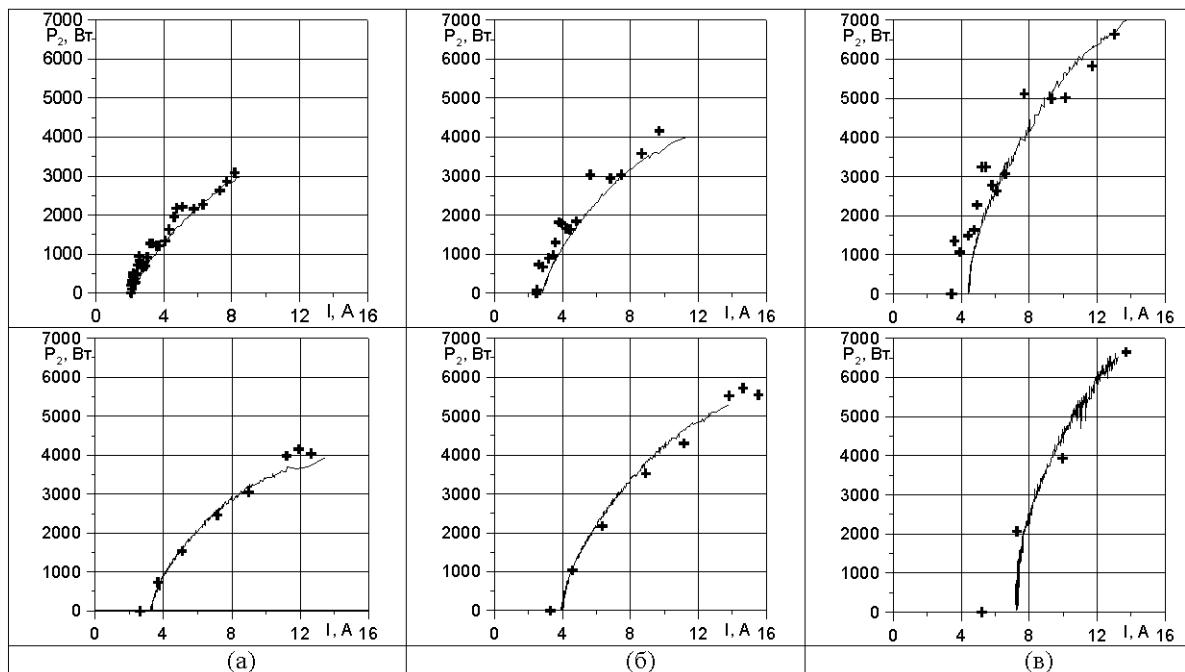


Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных данных для двух типов роторов (№ 1 – верхние графики и № 2 – нижние графики) и различных значениях напряжения питания сети: (а) – $U=170$ В, (б) – $U=200$ В, (в) – $U=250$ В.

Результаты сравнения расчетных данных с экспериментальными. Для проверки расчетной методики были спроектированы, сконструированы и испытаны экспериментальные модели ВТСП РД с двумя типами роторов (№ 1 и № 2). На рис. 5

дано сравнение расчетных (точки) и экспериментальных (линии) данных для выходной мощности ВТСП РД с роторами, содержащими четыре (нижние графики) и шесть (верхние графики) ВТСП пластин при различных значениях напряжения питающей сети. Видно, что расчетные данные находятся в хорошем соответствии с результатами экспериментов. С ростом напряжения растет максимальное значение выходной мощности. Однако, как показали дополнительные вычисления, при дальнейшем повышении напряжения рост выходной мощности замедляется, что вызвано насыщением ферромагнитных элементов ВТСП РД.

Заключение. На базе пакета «Elcut» разработана методика определения выходных характеристик ВТСП РД по результатам численного расчета магнитных полей, позволяющая в полной мере учитывать структуру активной зоны линейной части ВТСП РД (толщину зубцов, форму пазов, толщину спинки статора и т.д.) и индуктивные параметры лобовых зон двигателя. Показано, что данные численных расчетов по предложенной методике с точностью около 5% согласуются с результатами экспериментальных исследований. Серия расчетов позволила выбрать геометрию активной зоны экспериментальных ВТСП РД различного конструктивного исполнения, обеспечивающих максимальную выходную мощность. В частности, были определены рациональные параметры зубцовой зоны статора и требуемая толщина ферромагнитных пластин композитного ротора экспериментального реактивного ВТСП РД. Численные расчеты показали, что для экспериментального ВТСП РД (главные размеры: диаметр расточки 62,7 мм и длина линейной зоны 83 мм) выходная мощность мало зависит от вариации величины воздушного зазора в диапазоне от 0,5 до 2,0 мм. Это позволяет снизить требования к системе криостатирования, особенно в случае использования системы отдельных криостатов ротора и статора машины.

Список литературы

1. **Производственный кооператив ТОР**, Санкт-Петербург. ELCUT 5.2. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов; <http://www.tor.ru/elcut/demo/Manual.pdf>
2. **Tera Analysis QuickField™** Finite Element Analysis System Version 5.0 User's Guide; <http://www.quickfield.com/demo/manual.pdf>
3. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины. – М.: Энергия, 1980.
4. **Кононенко Е.В.** Синхронные реактивные машины. – М., Энергия, 1970.
5. **Самарский В.Г.** Уравнения математической физики, М., Высшая школа, 1980.
6. **Патент РФ № 2129329** от 20.04.1999 г. Синхронная реактивная машина /Ковалев Л.К., Илюшин К.В., Полтавец В.Н., Семенихин В.С., Пенкин В.Т., Ковалев К.Л., Егошкина Л.А., Ларионов А.Е., Конеев С.М.-А.