

* * *

Методика проектирования турбогенераторов с продольно-поперечным возбуждением, основанная на использовании магнитных схем замещения

АНТОНЮК О.В., АРСЕНЬЕВ И.А., КАДИ-ОГЛЫ И.А., СИДЕЛЬНИКОВ А.В.,
СИДЕЛЬНИКОВ Б.В.

Представлена оригинальная методика электромагнитного расчета турбогенераторов с нетрадиционной геометрией зубцового слоя и двумя обмотками продольно-поперечного возбуждения. Методика реализована в программном комплексе MathCad 2001, применена ОАО «Электросила» при проектировании турбогенератора ТЗФСу-320-2 и подтверждена результатами испытаний на стенде завода-изготовителя, а также на Каширской ГРЭС.

Ключевые слова: турбогенератор, электромагнитное поле, схема замещения, методика

An original procedure for electromagnetic design of turbine generators with nontraditional geometry of the tooth layer and containing two field windings in the direct and quadrature axes is presented. The proposed procedure is implemented in the MathCad 2001 software system, was used by the Electrosila Works in designing the TZFSu-320-2 turbine generator, and has been confirmed by the results of tests carried out at the manufacturer's test rig and at the Kashira district power station.

Key words: turbine generator, electromagnetic field, equivalent circuit, calculation procedure

При проектировании турбогенераторов с продольно-поперечным возбуждением (асинхронизированных синхронных генераторов – АСГ), имею-

щих на роторе две обмотки [1–3], возникает ряд проблем, связанных с особенностями их конструкции. В отличие от синхронных неявнополюсных

машин здесь в явном виде отсутствует «большой зуб». Обмотки возбуждения располагается в пазах, в общем случае неравномерно распределенных по окружности ротора и отличающихся друг от друга своими размерами. При этом форма пространственного распределения магнитодвижущей силы (МДС), которая в процессе регулирования возбуждения может перемещаться относительно ротора, не представляет собой равнобокую ступенчатую трапецию, как в обычных турбогенераторах. Отмеченные особенности ставят под сомнение возможность использования упрощенного метода [4] расчета магнитной цепи, основанного на приведении неявнополюсной машины с распределенной МДС ротора к эквивалентной явнополюсной конструкции с сосредоточенной МДС.

В статье изложены этапы создания методики электромагнитного расчета АСГ, учитывающей специфику геометрии зубцового слоя ротора, а также приближенные к реальным формы пространственного распределения МДС и магнитного поля в активной зоне при повышенных значениях линейных нагрузок и индукций.

В качестве иллюстрации на рис. 1 представлено поперечное сечение ротора турбогенератора ТЗФСУ-320-2 ($P_H = 320$ МВт, $\cos \varphi = 0,85$), разработанного в ОАО «Электросила» [3].

Здесь пазы «большого зуба» заняты поперечной обмоткой, предназначенной для форсированного управления основным потоком. Согласно [4] электромагнитный расчет включает определение: характеристики х.х., тока ротора под нагрузкой, индуктивных и активных сопротивлений, постоянных времени обмоток. В указанных условиях наиболее точные результаты соответствуют полевой постановке задачи. Вместе с тем, практика электромашиного проектирования показывает, что вполне

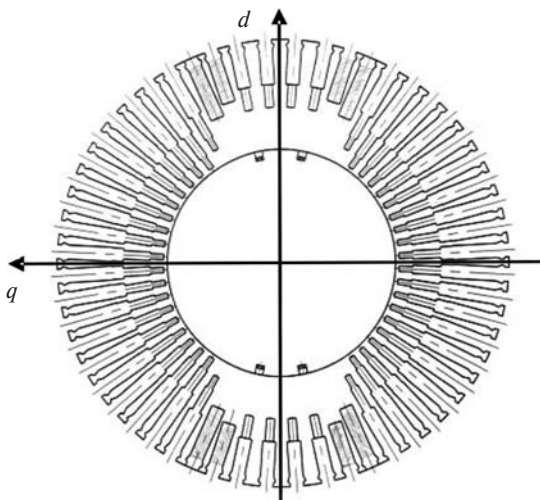


Рис. 1. Поперечное сечение ротора

достоверные данные удастся получить, принимая за основу магнитные схемы замещения. При достаточной детализации это обеспечивает хорошее совпадение результатов расчета с данными решений методами теории поля, однако значительно проще для реализации, что существенно при проектировании и многовариантных расчетах оборудования.

В основу рассмотренного далее метода положена схема замещения, представленная на рис. 2. Здесь магнитные сопротивления зубцовых слоев статора R_{zs} и ротора R_{zr} представлены функциями индукций (B_{zs}, B_{zr}) в соответствующих элементах, а сопротивления воздушного зазора R_d и для потоков пазового рассеяния R_s постоянны. Падение МДС на спинках статора (F_{a1}) и ротора (F_{a2}) учитываются введением в схему сосредоточенных магнитных сопротивлений R_{a1}, R_{a2} , зависящих от полных магнитных потоков Φ_{a1}, Φ_{a2} рассматриваемых участков. Подобное допущение справедливо в связи с относительно малыми значениями F_{a1}, F_{a2} .

При неравномерно распределенных пазах на роторе, отличающихся своими формой и размерами, величина R_{zr} , как и МДС обмотки возбуждения, связана с геометрической координатой x . Предлагаемый алгоритм, общую структуру которого иллюстрирует рис. 3, базируется на предварительном определении локальных кривых намагничивания машины $B_d(F_r)$, которые для выбранной координаты x представляют собой зависимость усредненной на зубцовом шаге индукции в зазоре B_d от суммарной МДС зазора и зубцовых зон F_r .

Требуемое для дальнейших расчетов число подобных характеристик соответствует числу различных по своей геометрии пазовых делений ротора на полюсной дуге. Например, согласно рис. 1, а также данных для турбогенератора типа ТЗФСУ-320-2 (см. далее) их должно быть четыре:

первая $j=1$ ($x_1 - x_9, x_{48} - x_{56}$) и четвертая $j=4$ (x_{10}, x_{47}), где расположены нормальные и укороченные пазы основной (продольной) обмотки возбуждения;

вторая $j=2$ ($x_{13} - x_{14}$) в области с управляющей обмоткой;

третья $j=3$ ($x_{11}, x_{12}, x_{45}, x_{46}$) для зубцовых делений, заполненных ферромагнитными вставками.

Индексы при величинах x соответствуют номерам пазов ($i=1, 56$), отсчитываемых от поперечной оси по часовой стрелке. Расчет каждой локальной кривой намагничивания проводится для ряда произвольно заданных значений индукции B_d по обычной методике [4–5] при известных характеристиках применяемых марок стали и размерах элементов магнитной цепи.

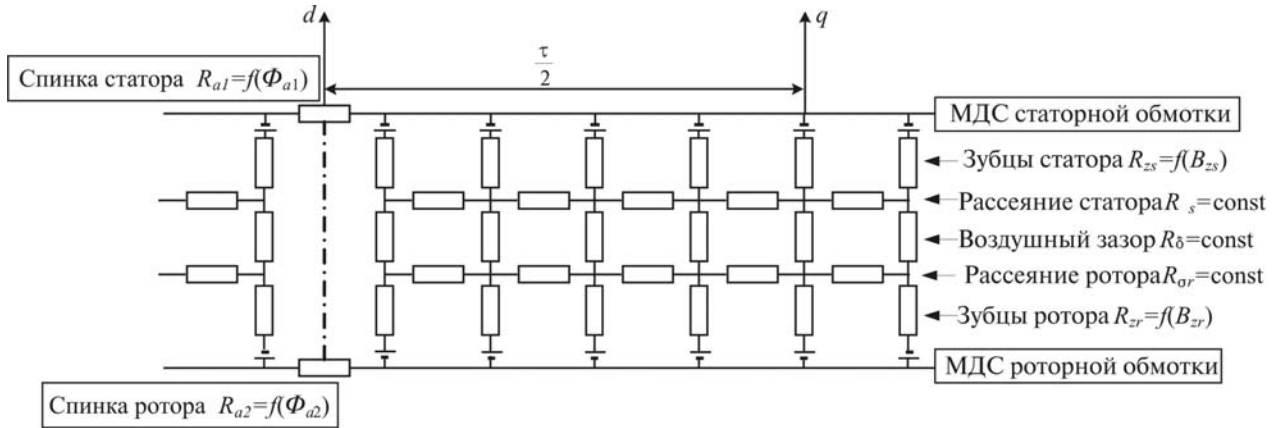


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи для расчета характеристики х.х.

Ход вычислений при определении характеристики х.х. АСГ, когда МДС статорной обмотки равна нулю, поясняет рис. 4. Здесь по обычным правилам воспроизводится интегральная кривая МДС возбуждения $F_r(x)$ (график 1). Предполагается, что полный ток каждого i -го паза с заданным числом проводников сосредоточен по его оси:

Номер паза i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	или 56	или 55	или 54	или 53	или 52	или 51	или 50	или 49	или 48	или 47	или 46	или 45	или 44	или 43
Номер локальной кривой намагничивания j	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	4	4	3	3
Число проводников в пазах обмоток:														
основной	7	7	7	7	7	7	7	7	7	5	0	0	0	0
управляющей	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4

Для известной функции распределения $F_r(x)$ по локальным кривым намагничивания (ЛКН) (график 2) находится значение индукции $B_d(x)$ (график 3) в точках с координатами x_1, x_2, x_3, \dots , и т.д. После разложения графика $B_d(x)$ в ряд Фурье определяется первая гармоника B_{d1} и ЭДС статорной

обмотки. Подобные построения (рис. 4) проводятся для ряда значений токов возбуждения при фиксированном распределении их по пазам ротора. Искомое значение МДС возбуждения F_0 отличается от максимального $F_r(x)$ на значение падения МДС на спинках статора F_{a1} и ротора F_{a2} .

Разработанный алгоритм реализован в программном комплексе MathCad 2001, что обусловлено возможностью наглядного представления исходных данных и расчетных процедур в форме, максимально приближенной к той, которая используется в методиках проектирования турбогенераторов. Необходимые для вычислений геометрические размеры вводятся в головной части программы. Информация об обмотках ротора (см. данные выше) представлена двумерной матрицей, в первой строке которой для одного полюсного деления указывается число проводников в каждом из пронумерованных пазов ос-



Рис. 3. Порядок выполнения электромагнитного расчета АСГ

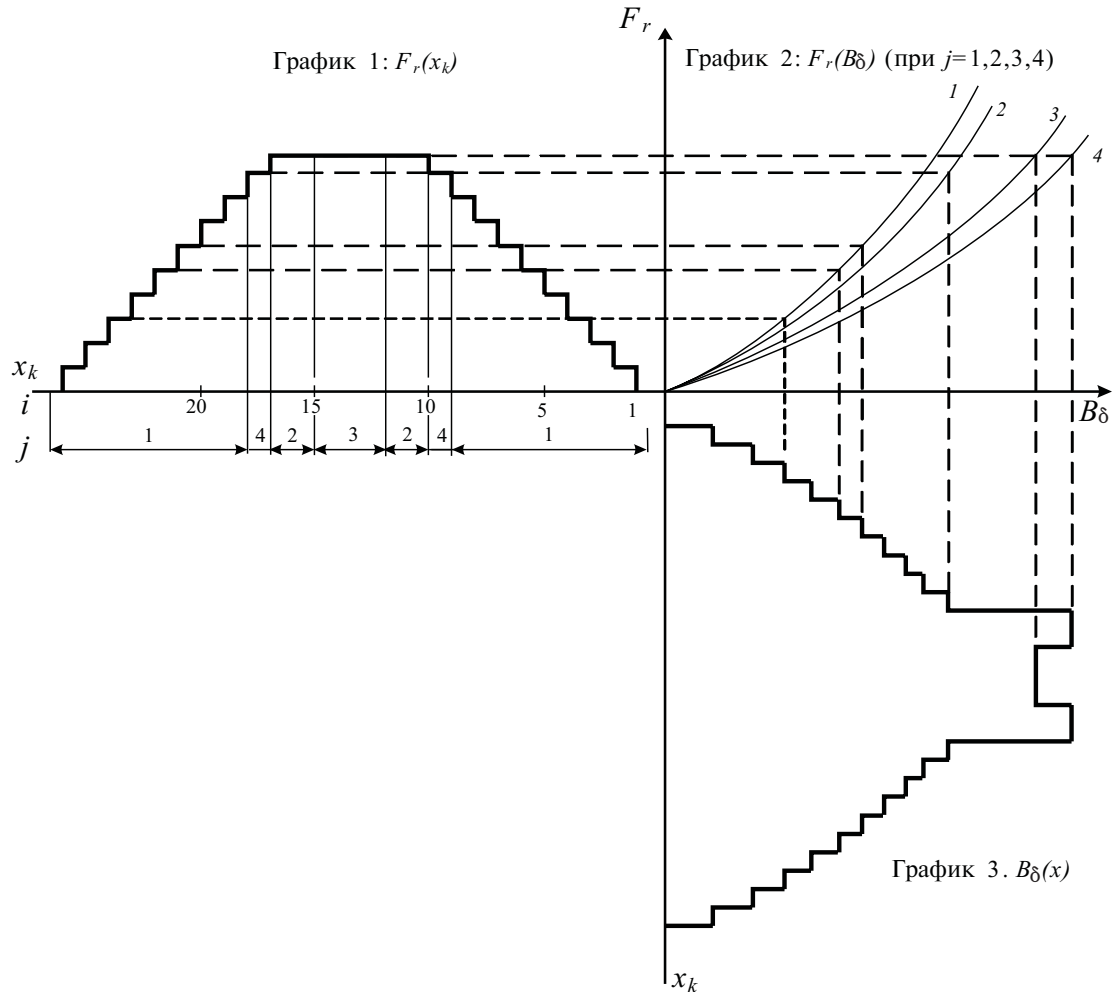


Рис. 4. Определение кривой пространственного распределения индукции воздушного зазора по заданным значениям МДС (тока) основной обмотки возбуждения

новной обмотки, а во второй – управляющей. Кроме того, задаются кратности токов в основной и управляющей обмотках, а также шаги их изменения. В отдельном файле содержатся характеристики намагничивания для конкретных сталей магнитной системы.

В программе выделены отдельные модули:

расчет локальных кривых намагничивания, соответствующих различным конфигурациям пазов;

формирование ступенчатой кривой МДС с процедурой её симметрирования относительно оси ординат;

расчет магнитной индукции в зазоре по локальным кривым и распределенной МДС;

гармонический анализ поля и ЭДС статора;

определение параметров установившихся и переходных режимов проектируемого генератора.

Предлагаемая методика была апробирована при электромагнитных расчетах обычных и асинхронизированных двухполюсных турбогенераторов. В качестве иллюстрации в таблице сопоставлены экспериментальная и расчетные характеристики х.х.

генератора ТЗФСУ-320-2 и показаны отклонения измеренных на стенде «Электросилы» и расчетных величин, полученные решением полевой задачи или с применением описанного выше алгоритма.

ЭДС, отн. ед.	Значение тока х.х. основной обмотки, А, и погрешность его расчета, %				
	экспериментальное	предлагаемым методом		методом теории поля	
0,50	432	436	0,93	441	2,08
0,70	622	630	1,29	634	1,93
0,90	852	868	1,88	842	-1,17
0,95	934	954	2,14	916	-1,93
1,00	1038	1070	3,10	1010	-2,70
1,05	1169	1210	3,50	1127	-3,59
1,10	1330	1400	5,20	1274	-4,21
1,15	1531	1610	5,11	1459	-4,70
1,20	1816	1925	6,01	1706	-6,06
1,25	2130	2270	6,51	2021	-5,12

В данном примере использование магнитных схем замещения приводит к незначительно завышенным значениям тока возбуждения, когда ЭДС х.х. не превышает 120% номинального напряжения U_H , причем с ростом насыщения погрешность увеличивается. Эта особенность главным образом объясняется отсутствием в каталогах достоверных данных для характеристик намагничивания электро-технических сталей и роторных поковок в области повышенных индукций. Значения последних в корне зубца ротора достигают 2,7, 2,9 Тл. Результаты решения краевой задачи или с помощью схем замещения практически совпадают в области изменения ЭДС до $0,85U_H$. Однако при полевой постановке для ЭДС, превышающей U_H , с ростом тока возбуждения его расчетное значение становится меньше опытного.

В заключение отметим, что практическое применение разветвленных магнитных схем замещения подтвердило их высокую эффективность при электромагнитных расчетах турбогенераторов, в том числе имеющих специфические конструктивные особенности. Алгоритмы, разработанные на их основе, достаточно просты при реализации, обладают хорошей точностью, более доступны для освоения, чем построенные на базе теории поля. Органично сочетаясь с традиционными методиками проектирования, они позволяют отказаться от ряда допущений, например, учитывать наличие высших пространственных гармоник в МДС и магнитной индукции, проводить анализ режимов без применения методов наложения в нелинейных системах.

Для повышения надежности и достоверности результатов проектирования желательно иметь более точные исходные данные, в том числе для характеристик намагничивания материалов магнитопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кадии-Оглы И.А., Сидельников А.В.** Асинхронизированные турбогенераторы с воздушным охлаждением. — Проблемы

создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования, 2004, вып. 6.

2. **Зинаков В.Е.** Опыт промышленной эксплуатации головного образца асинхронизированного турбогенератора ТЗФА-110-2 на ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго». — Вести в электроэнергетике, 2005, № 1.

3. **Антонюк О.В., Кадии-Оглы И.А., Пинчук Н.Д., Сидельников А.В.** Проектируемые и выпускаемые в ОАО «Силовые машины» асинхронизированные турбогенераторы. — Электротехника, 2010, № 2.

4. **Хуторецкий Г.М., Токов М.И., Толвинская Е.В.** Проектирование турбогенераторов. — Л.: Энергоатомиздат, 1987.

5. **Турбогенераторы.** Расчёт и конструкция/Под ред. Н.П. Иванова, Р.А. Лютера. — Энергия, 1967.

6. **Алексеев А.Е., Костенко М.П.** Турбогенераторы. — М., Л.: Госэнергоиздат, 1939.

[05.07.12]

Авторы: Антонюк Олег Викторович в 1984 г. окончил электромеханический факультет (ЭМФ) Ленинградского политехнического института (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет — СПбГПУ). Главный конструктор турбогенераторов ОАО «Силовые машины».

Арсеньев Игорь Александрович в 1981 г. окончил ЭМФ ЛПИ. Ведущий программист кафедры «Электрические машины» СПбГПУ.

Кадии-Оглы Ибрагим Ахметович в 1961 г. окончил ЭМФ ЛПИ. В 2003 г. защитил докторскую диссертацию «Проблемы создания турбогенераторов с полным водяным охлаждением с самонапорным ротором». Трагически погиб в 2012 г.

Сидельников Александр Викторович в 1960 г. окончил ЭМФ ЛПИ. В 1967 г. защитил кандидатскую диссертацию «Анализ переходных процессов электрических машин с массивными ферромагнитными участками в магнитопроводе. Сотрудник ЛПЭО «Электросила».

Сидельников Борис Викторович в 1960 г. окончил ЭМФ ЛПИ. В 1980 г. защитил докторскую диссертацию «Исследование режимов работы электрических машин методами математического моделирования». Профессор кафедры «Электрические машины» СПбГПУ.

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ и ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы

можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс (7-495)362-7485).

В данном примере использование магнитных схем замещения приводит к незначительно завышенным значениям тока возбуждения, когда ЭДС х.х. не превышает 120% номинального напряжения U_H , причем с ростом насыщения погрешность увеличивается. Эта особенность главным образом объясняется отсутствием в каталогах достоверных данных для характеристик намагничивания электро-технических сталей и роторных поковок в области повышенных индукций. Значения последних в корне зубца ротора достигают 2,7, 2,9 Тл. Результаты решения краевой задачи или с помощью схем замещения практически совпадают в области изменения ЭДС до $0,85U_H$. Однако при полевой постановке для ЭДС, превышающей U_H , с ростом тока возбуждения его расчетное значение становится меньше опытного.

В заключение отметим, что практическое применение разветвленных магнитных схем замещения подтвердило их высокую эффективность при электромагнитных расчетах турбогенераторов, в том числе имеющих специфические конструктивные особенности. Алгоритмы, разработанные на их основе, достаточно просты при реализации, обладают хорошей точностью, более доступны для освоения, чем построенные на базе теории поля. Органично сочетаясь с традиционными методиками проектирования, они позволяют отказаться от ряда допущений, например, учитывать наличие высших пространственных гармоник в МДС и магнитной индукции, проводить анализ режимов без применения методов наложения в нелинейных системах.

Для повышения надежности и достоверности результатов проектирования желательно иметь более точные исходные данные, в том числе для характеристик намагничивания материалов магнитопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кадии-Оглы И.А., Сидельников А.В.** Асинхронизированные турбогенераторы с воздушным охлаждением. — Проблемы

создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования, 2004, вып. 6.

2. **Зинаков В.Е.** Опыт промышленной эксплуатации головного образца асинхронизированного турбогенератора ТЗФА-110-2 на ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго». — Вести в электроэнергетике, 2005, № 1.

3. **Антошок О.В., Кадии-Оглы И.А., Пинчук Н.Д., Сидельников А.В.** Проектируемые и выпускаемые в ОАО «Силовые машины» асинхронизированные турбогенераторы. — Электротехника, 2010, № 2.

4. **Хуторецкий Г.М., Токов М.И., Толвинская Е.В.** Проектирование турбогенераторов. — Л.: Энергоатомиздат, 1987.

5. **Турбогенераторы.** Расчёт и конструкция/Под ред. Н.П. Иванова, Р.А. Лютера. — Энергия, 1967.

6. **Алексеев А.Е., Костенко М.П.** Турбогенераторы. — М., Л.: Госэнергоиздат, 1939.

[05.07.12]

Авторы: Антошок Олег Викторович в 1984 г. окончил электромеханический факультет (ЭМФ) Ленинградского политехнического института (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет — СПбГПУ). Главный конструктор турбогенераторов ОАО «Силовые машины».

Арсеньев Игорь Александрович в 1981 г. окончил ЭМФ ЛПИ. Ведущий программист кафедры «Электрические машины» СПбГПУ.

Кадии-Оглы Ибрагим Ахметович в 1961 г. окончил ЭМФ ЛПИ. В 2003 г. защитил докторскую диссертацию «Проблемы создания турбогенераторов с полным водяным охлаждением с самонапорным ротором». Трагически погиб в 2012 г.

Сидельников Александр Викторович в 1960 г. окончил ЭМФ ЛПИ. В 1967 г. защитил кандидатскую диссертацию «Анализ переходных процессов электрических машин с массивными ферромагнитными участками в магнитопроводе. Сотрудник ЛПЭО «Электросила».

Сидельников Борис Викторович в 1960 г. окончил ЭМФ ЛПИ. В 1980 г. защитил докторскую диссертацию «Исследование режимов работы электрических машин методами математического моделирования». Профессор кафедры «Электрические машины» СПбГПУ.

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ и ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы

можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс (7-495)362-7485).