

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНЫХ СОВМЕЩЁННЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Дёгтев В.Г., д.т.н. проф.

Одесский национальный политехнический университет
Украина, 65058, Одесса, пр-т Шевченко, 6/2, кв. 70,
тел. (048) 776-29-78

Бабушанов А.В.

Украина, 65044, Одесса, пр-т Шевченко, 1, ОНПУ, кафедра "Электрические машины"
тел. (048) 715-87-49

Розглянуті особливості безконтактних суміщених синхронних машин. Описані специфічні задачі, що виникають при їх проектуванні. Проведені дослідження, що дозволяють удосконалити методику електромагнітного розрахунку таких машин. Розроблено алгоритм і на його основі створено програмне забезпечення, що дозволяє виконувати автоматизоване проектування синхронних неявнополюсних машин із суміщеною магнітною системою.

Рассмотрены особенности бесконтактных совмещенных синхронных машин. Описаны специфические задачи, возникающие при их проектировании. Проведены исследования, позволившие уточнить методику электромагнитного расчета таких машин. Разработан алгоритм и на его основе создано программное обеспечение, позволяющее выполнять автоматизированное проектирование синхронных неявнополюсных машин с совмещенной магнитной системой.

Бесконтактные синхронные генераторы нашли широкое применение в системах автономного электроснабжения.

Особого внимания заслуживают бесконтактные синхронные генераторы с совмещенной магнитной системой (БССГ), позволяющие улучшить массогабаритные показатели, упростить конструкцию и технологию изготовления. Применение в таких машинах совмещенных обмоток позволяет улучшить использование дорогостоящих проводниковых и изоляционных материалов и упростить технологию обмоточно-изолировочных работ. БССГ удобнее в эксплуатации и обслуживании.

Особенности устройства БССГ порождают при проектировании ряд специфических задач, среди которых следует выделить необходимость выполнения магнитной развязки и учет наложения полей возбуждителя и генератора в магнитопроводе. В известной нам современной литературе [1–5] отсутствуют методики расчета БССГ, учитывающие указанные особенности, поэтому разработка надежных алгоритмов расчета БССГ и их программная реализация являются актуальной задачей.

Реализация БССГ возможна с использованием различных конструктивных и принципиальных схем [6–9]. В настоящей работе рассматриваются бесконтактные синхронные генераторы с совмещенной магнитной системой, принципиальная схема которых приведена на рис. 1.

Магнитная система БССГ – классическая неявнополюсная. На рис. 1 и далее в тексте ОЯГ – обмотка якоря генератора, ОЯВ – обмотка якоря возбуждителя, ОВГ – обмотка возбуждения генератора, ОВВ – обмотка возбуждения возбуждителя. ВБ – выпрямительный блок.

Целью данной работы является разработка алгоритма проектирования БССГ и создание на его основе современного программного обеспечения.

Предложенный алгоритм и программа состоят из трех основных модулей в соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 2.

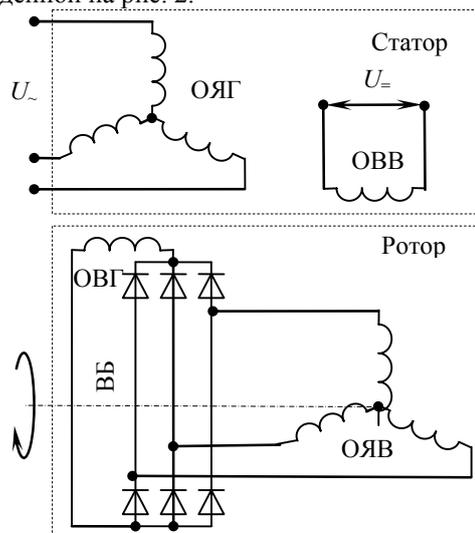


Рис. 1. Схема совмещённого генератора

Модуль 1 обеспечивает два режима подготовки исходных данных для расчета БССГ. Блок 1.1 выполняет автоматизированное проектирование зубцовой зоны и расчет обмоточных данных по предварительно выбранным магнитным нагрузкам и основным размерам активной части машины. В результате автоматически формируется полный комплект исходных данных и обеспечивается переход к модулю 2.

На рис. 3,а приведен фрагмент окна программы ввода исходных данных и результаты проектирования зубцовой зоны, а на рис.3,б – рассчитанные обмоточные данные.

В случае необходимости выполнения поверочного расчета существующих БССГ исходные данные непосредственно вводятся в блоке 1.2. Соответствующее окно программы приведено на рис. 4.

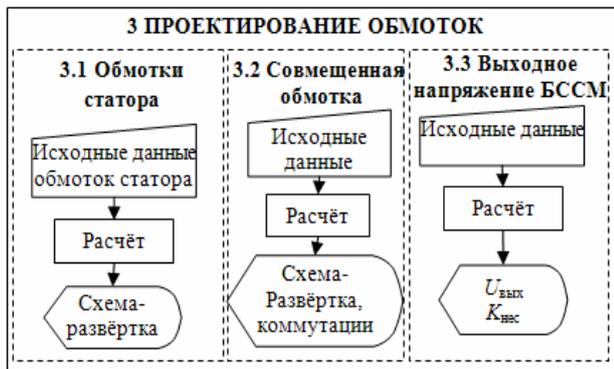
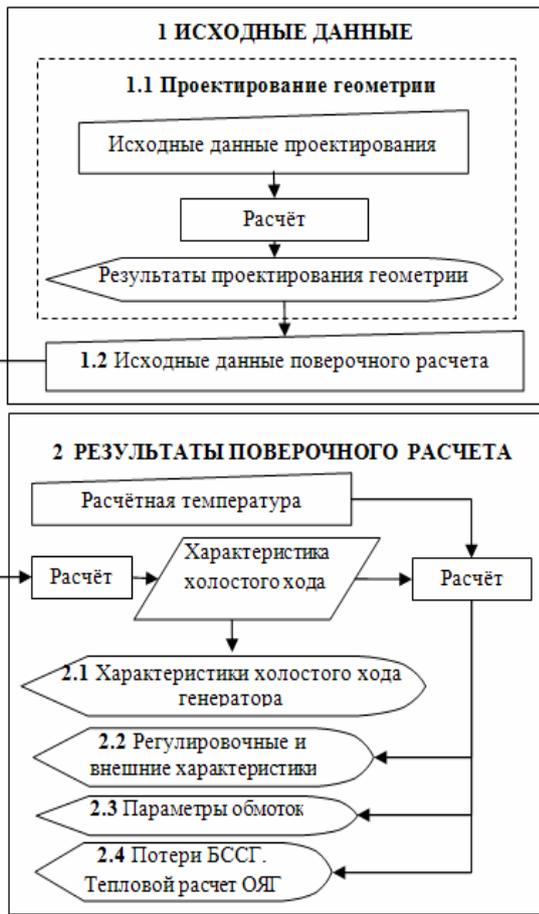


Рис. 2. Блок-схема программы

Ввести геометрию | Спроектировать геометрию

Магнитные нагрузки

Расчётная мощность, кВт: 4

- Индукция в зазоре (B_{delta}), Т: 0.7
- Индукция в зубцах статора ($B_{21\text{max}}$), Т: 1.75
- Индукция в зубцах ротора ($B_{22\text{max}}$), Т: 1.8
- Индукция в спинке статора ($B_{a1\text{max}}$), Т: 1.6
- Индукция в спинке ротора ($B_{a2\text{max}}$), Т: 1.2

Выполнить расчёт магнитной системы

Исходные данные расчёта геометрии

Внешний диаметр статора, мм	225	Диаметр внутренней обмотки, мм	0.5
Диаметр ротора статора, мм	130	Диаметр вала, мм	40
Число полюсов статора	42	Число полюсов ротора	30
Ширина шлица статора, мм	2	Ширина шлица ротора, мм	2
Высота шлица статора, мм	0.5	Высота шлица ротора, мм	0.5

Длина пакетов статора и ротора, мм: 50
Число парал. ветвей ОЯГ: 1
Число пар полюсов генератора: 1
Линейное напряжение ОЯГ, В: 380
Число полюсов на полюс и фазу ОЯГ, пропорциональной для укладки ОЯГ: 1
Коэффициент заполнения паза статора обмоткой якоря генератора: 0.75

Геометрия: H0P20, n1 | D10P40 | Таблица9 | Таблица10

Результаты расчёта

Результаты расчёта геометрии АССГ

Параметр	Значение	Ед. изм.
Основной магнитный поток	7.3	кВб
Высота спинки статора	30	мм
Высота спинки ротора	39.9	мм
Высота паза статора	17.5	мм
Высота паза ротора	24.6	мм
Ширина зубца статора	4.1	мм
Ширина зубца ротора	4.6	мм
Ширина паза статора у дна	8.3	мм
Ширина клина статора	6.2	мм
Диаметр верхней окружности паза ротора	6	мм
Диаметр нижней окружности паза ротора	2.6	мм

а)

Обмоточные данные

Параметр	Значение	Ед. изм.
Число пазов на полюс и фазу ОЯГ	6	-
Обмоточный коэффициент ОЯГ	0.838	-
Число витков в фазе ОЯГ	162	-
Число эффективных проводников в пазу	27	-
Площадь паза в свету	98.7	кв.мм
Площадь паза, занимаемая обмоткой	80.012	кв.мм
Предварительный диаметр изолированного проводника	1.491	мм
Стандартный диаметр изолированного проводника	1.485	мм
Диаметр голого проводника	1.4	мм
Поперечное сечение голого проводника	1.539	кв.мм
Число элементарных проводников в эффективном	1	-
Коэффициент заполнения паза статора	0.744	-
Ток фазы якоря генератора	7.597	А
Плотность тока обмотки якоря генератора	4.936	А/мм ²

б)

Рис. 3. Исходные данные и результаты расчёта геометрии и обмоточных данных

Расчёт АССГ на базе геометрии АД (3ф, 50Гц)

Исходные данные поверочного расчёта | Результаты поверочного расчёта | Проектирование обмоток АССГ

Вести геометрию | Спроектировать геометрию

Ввод геометрии для поверочного расчёта

Выходная мощность, кВт: 4

Сердечник статора

Внешний диаметр статора, мм	191
Внешний диаметр ротора, мм	106
Внутренний диаметр статора, мм	108
Внутренний диаметр ротора, мм	43
Длина сердечника (L), мм	125
Длина сердечника (L2), мм	125
Коэф. зап. пакета стали	0.93
Коэф. зап. пакета стали	0.93
Марка стали	2013
Марка стали	2013
Число рад. каналов	0
Число кан. каналов	0
Число кан. каналов	0
Ширина рад. канала	0
Ширина кан. канала	0

Пазы статора

Число пазов (Z1)	56
Ширина шлица (bh1), мм	3.5
Высота шлица (hb1), мм	0.5
Ширина клина (Bk1), мм	6.2
Высота паза (hp1), мм	3.1
Ширина паза (bp1), мм	8.1
Высота паза (fp1), мм	16.1

Пазы ротора

Число пазов (Z2)	30
Ширина шлица (bh2), мм	3
Высота шлица (hb2), мм	0.5
Нижний диаметр (Dn2), мм	2.7
Ширина паза (bp2), мм	6.3
Высота паза (fp2), мм	21.7
Скок паза (bc), мм	0

Трапециевидный | **Грушевидный**

Число пар полюсов генератора (pg): 1
Число пар полюсов возбудителя (pv): 3

Обмоточные данные:

Линейное напр. якоря генератора (Uyag), В	380
Напряжение индуктора возбудителя (Uv), В	30
Линейное напр. якоря возбудителя (Uyav), В	30
Число витков в фазе ОЯГ	160
Число витков в фазе ОЯГ	400
Число витков ОЯГ	520
Число витков ОЯГ	120
Обмоточный коэффициент ОЯГ	0.82
Обмоточный коэффициент ОЯГ	0.966
Обмоточный коэффициент ОЯГ	0.85
Обмоточный коэффициент ОЯГ	0.85
Шаг ОЯГ по пазам	12
Шаг ОЯГ по пазам	12
Шаг ОЯГ по пазам	5
Шаг ОЯГ по пазам	5
Число элем. пров. в эффективном ОЯГ	1
Число элем. пров. в эффективном ОЯГ	1
Число элем. пров. в эффективном ОЯГ	1
Число элем. пров. в эффективном ОЯГ	1
Число элем. пров. в эффективном ОЯГ	5
Число элем. пров. в эффективном ОЯГ	1
Проводники ОЯГ	ПЭТВ, П

Рис. 4. Окно непосредственного ввода исходных данных поверочного расчёта

Рис. 4. Окно непосредственного ввода исходных данных поверочного расчёта

После ввода исходных данных выполняется поверочный расчёт машины. Программа позволяет выполнить расчёт при открытых или трапециевидных пазах статора, а также при грушевидных или полузакрытых пазах ротора.

Разработке алгоритма расчёта магнитной цепи предшествовало исследование магнитных полей в образце БССГ методом конечных элементов с использованием программы FEMM и сопоставление полученных расчетных результатов с данными эксперимента. Образец выполнен на базе двигателя АИРУ132М2 и испытан в лаборатории электромашиностроительного завода ПО "Южэлектромаш" (г. Новая Каховка). В результате проведенных исследований предложен корректировочный коэффициент, позволивший с достаточной для инженерных расчетов степенью точности учитывать наложение магнитных полей в ферромагнитных участках магнитопровода БССГ.

Блок 2.1 выполняет расчёт холостого хода БССГ и позволяет выводить на экран результаты расчета в виде таблиц или графиков. Допускается расчет с учетом и без учета наложения полей. С целью выполнения сравнительного анализа предусмотрена возможность ввода свободных данных и нанесения их точки на графики.

На рис. 5 приведены результаты расчета характеристик холостого хода образца БССГ с учетом наложения магнитных полей (сплошная кривая) и при отсутствии такого учета (пунктирная кривая). Экспериментальные данные нанесены точками. Сопоставление данных расчёта и эксперимента на рис. 5 свидетельствует о хорошем их совпадении.

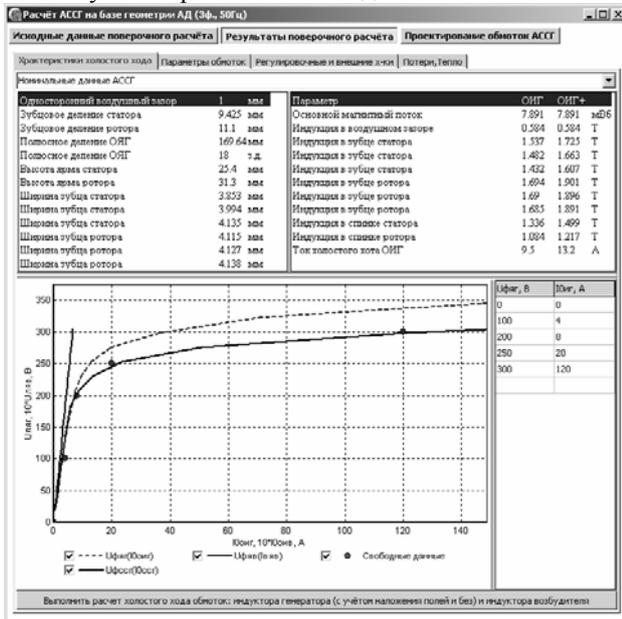


Рис. 5. Окно результатов расчёта XX генератора

Удельное сопротивление меди при 20 С	0,017	МОм*мм
Удельное сопротивление меди при рабочей температуре	0,02074	МОм*мм
Среднее зубцовое деление Якоря Генератора	10,8	мм
Среднее зубцовое деление Якоря Возбудителя	8,8	мм
Ширина котушки Якоря Генератора	130	мм
Ширина котушки Якоря Возбудителя	44,1	мм
Длина лобовой части Якоря Генератора	175,9	см
Длина лобовой части Якоря Возбудителя	63	см
Средняя длина полуитка Якоря Генератора	309,9	см
Средняя длина полуитка Якоря Возбудителя	188	см
Длина проводников фазы Якоря Генератора на I ветвь	96303,6	см
Длина проводников фазы Якоря Возбудителя на I ветвь	180448,6	см
Сечение элементарного проводника Якоря Генератора	0,5	кв.мм
Сечение элементарного проводника Якоря Возбудителя	0,88	кв.мм
Акт. сопротивление фазы Якоря Генератора	3,98	Ом
Акт. сопротивление фазы Якоря Возбудителя	4,24	Ом
Коэффициент проводимости пазового рассеяния возбудителя	1,41	-
Коэффициент проводимости пазового рассеяния генератора	1,05	-
Коэффициент проводимости лобового рассеяния возбудителя	0,29	-
Коэффициент проводимости лобового рассеяния генератора	0,26	-
Коэффициент проводимости по коронкам зубц. возбуд.	0,18	-
Коэффициент проводимости по коронкам зубц. генер.	0,14	-
Синдр. инд. сопр. Якоря Возбудителя	1	-
Синдр. инд. сопр. Якоря Генератора	0,019125	-
Базовое сопротивление Якоря Возбудителя	1	Ом
Базовое сопротивление Якоря Генератора	31,94444	Ом
Синдр. инд. сопр. Якоря Возбудителя	1	Ом
Синдр. инд. сопр. Якоря Генератора	0,610959	Ом
Ток возбуждения генератора под нагрузкой	7,8838108	Ом

Рис. 6. Результаты расчета параметров обмоток БССГ

Блок 2.2 осуществляет расчёт параметров обмоток БССГ и регулировочные характеристики генератора и возбудителя при значениях коэффициента мощности 0,8 и 1. Расчет выполняется при расчетных значениях температуры обмоток. На рис. 6 приведено окно программы, соответствующее блоку 2.2.

В блоке 2.3 выполняется расчёт внешних и регулировочных характеристик БССГ с возможностью вывода на экран в табличном виде или в виде графиков, которые приведены в качестве примера на рис. 7.

Блок 2.4 отображает результаты расчета потерь и коэффициента полезного действия генератора, а также результаты теплового расчета. Окно программы, демонстрирующее результаты расчёта потерь и теплового расчёта приведено на рис. 8.

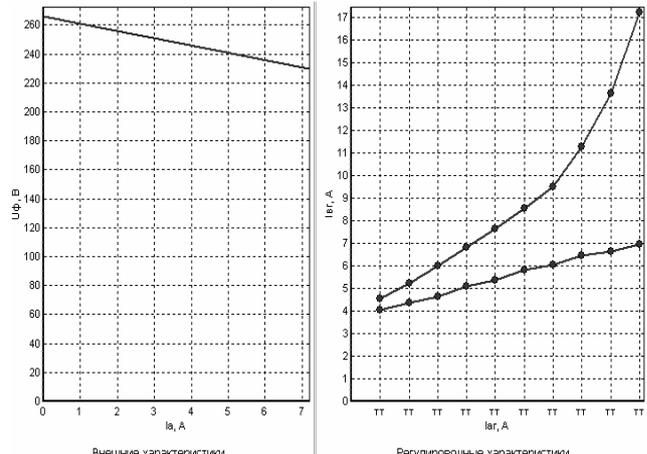


Рис. 7. Внешняя и регулировочные характеристики БССГ

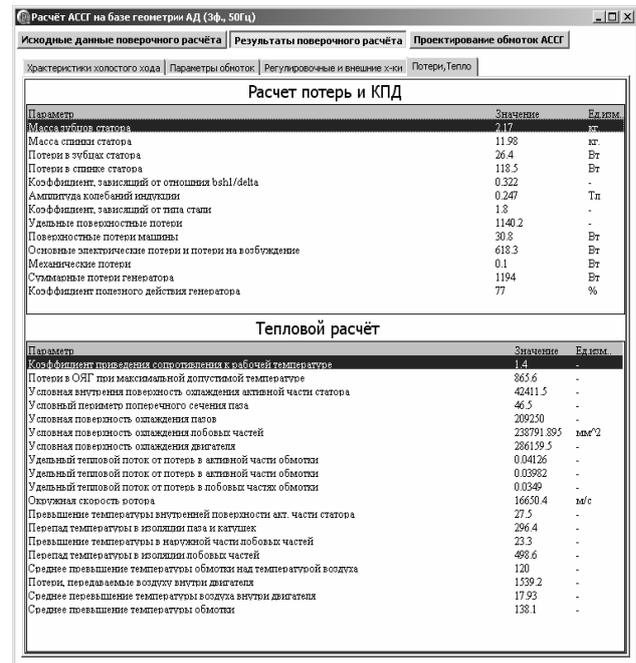


Рис. 8. Окно расчета потерь и теплового расчета БССГ

Модуль 3 позволяет выполнять проектирование обмоток.

Обычно магнитная развязка в БССГ выполняется выбором рабочих гармоник возбудителя и генератора, принадлежащих различным рядам:

$$v_1 = 6k \pm 1 (1, 5, 7, 11, 13...);$$

$$v_2 = 6k \pm 2 (2, 4, 8, 10, 14...);$$

$$v_3 = 3k (3, 6, 9, 12...).$$

В представленной методике выбрано отношение чисел пар полюсов генератора p_r и возбудителя p_v , равное 1:3.

Блок 3.1 выполняет гармонический анализ статорной обмотки генератора на основе ее матричной модели (рис. 9) и обмотки возбуждения возбудителя.

Блок 3.2 позволяет синтезировать различные модификации совмещенных обмоток и выполнять визуализацию схем коммутации и схем-разверток спроектированных обмоток. На рис. 10 приведено окно проектирования равнокатушечных совмещенных обмоток.

На рис. 11 приведено окно проектирования совмещенных обмоток, выполненных вразвалку.

Блок 3.3 выполняет построение результирующей кривой ЭДС на зажимах статорной обмотки генератора с учетом потокоцепления высших гармоник и рас-

считывает коэффициент несинусоидальности выходного напряжения. На рис. 12 приведено окно с результатами расчета кривой выходного напряжения и (блок 3.3).

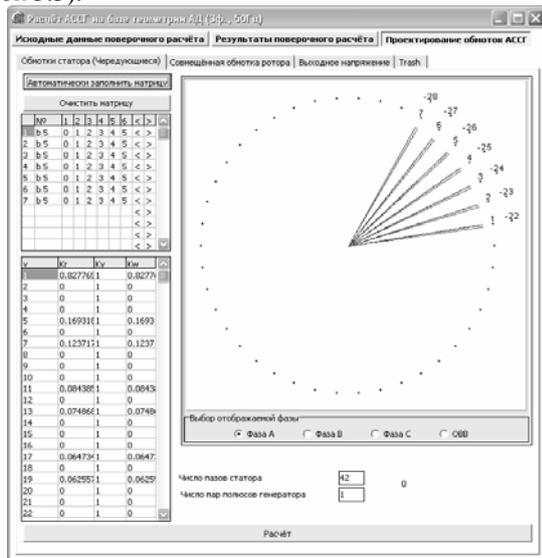


Рис. 9. Окно анализа матричной модели статорных обмоток

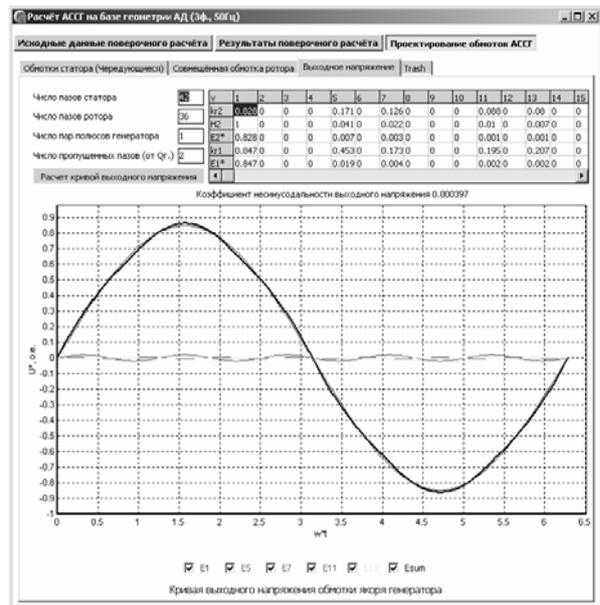


Рис. 12. Окно результатов анализа формы выходного напряжения

Помимо кривой выходного напряжения генератора в таблице приведены значения коэффициентов распределения ОЯГ и совмещенной обмотки, а именно той её части, которая исполняет роль обмотки возбуждения генератора.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета бесконтактных синхронных генераторов с совмещенной магнитной системой, достоверность которой подтверждена совпадением расчетных и экспериментальных данных.

2. Созданный на ее основе программный комплекс позволяет существенно сократить время затраты при инженерном проектировании и может быть использован в учебном процессе при подготовке специалистов-электромехаников.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. – Л.: Энергия. – 1974. – 503 с.
- [2] Сергеев П.С. "Проектирование турбогенераторов", учебное пособие. М.: ГЭИ 1961.–108 с.
- [3] Дегтев В.Г., Билоненко Н.И. Трехфазный неявнополюсный синхронный генератор // Праці науково-технічної конференції, присвяченої 100-річчю від дня народження видатного українського вченого-електромеханіка Тихона Губенко, Львів-Славськ, 1996. - С. 63-65; 3/2;
- [4] Дегтев В.Г., Довгий С.С. Синтез совмещенной обмотки автономного синхронного генератора // Міжвід. наук. техн. зб., "Електромашинобудування та електрообладнання", Київ, Техніка.– №53, 1999.– С. 60-63.
- [5] Караваев В.Т. Бесконтактный совмещенный синхронный генератор. Электричество, №11, 1990. – С. 17-25.
- [6] Луицк В.Д. Совмещённые электрические машины и аппараты. – К.: Техника, 1993. – 203 с.
- [7] А.с. СССР №44748 от 07.02.72 г. Бесконтактная синхронная машина. Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. Бюл. №31, 1974. С. 146.
- [8] Патент 25062 України. Безконтактна синхронна електрична машина / Клементьев О.В., Бондарев В.М. // Бюл. №6, 1998.
- [9] Патент 2144253 РФ. Электрическая машина совмещенного типа / Климентьев А.В., Бондарев В.Н. // Бюл. №1, 2000.

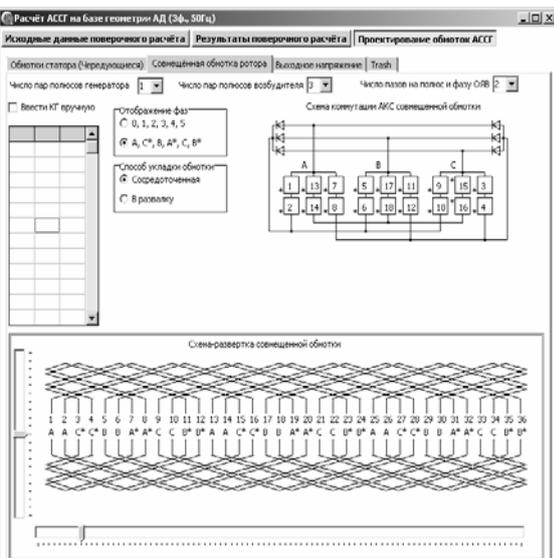


Рис. 10. Окно проектирования совмещенных обмоток

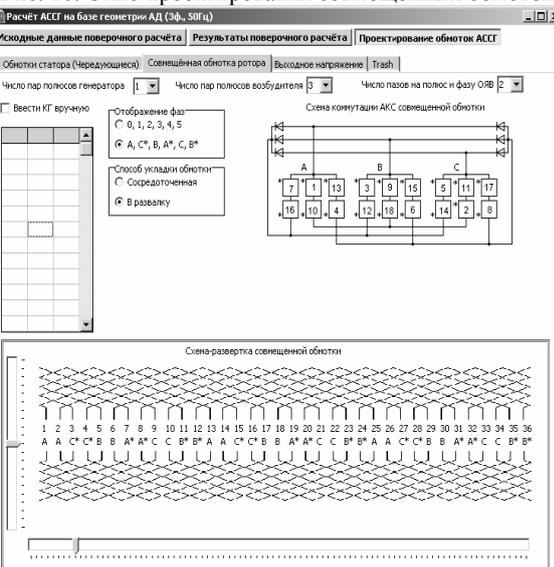


Рис. 11. Окно проектирования совмещенных обмоток

Поступила 30.08.2007