

# Метод расчета магнитных полей с учетом трехмерной неоднородности сердечников электрических машин

ИВАНОВ-СМОЛЕНСКИЙ А.В., КУЗНЕЦОВ В.А.

*Предложен модифицированный подход к расчету магнитных полей электрических машин (ЭМ) с аксиальной неоднородностью сердечников. Применяется двухмерный численный метод при одновременной модификации свойств магнитных сред, пазовых областей и воздушных зазоров, позволяющий учесть структуру сердечников в осевом направлении. Магнитные потокоцепления обмоток ЭМ определяются на основе топологического подхода, универсальным методом, позволяющим во много раз сократить время счета магнитных полей, параметров, характеристик и явлений в ЭМ.*

**Ключевые слова:** электрическая машина, магнитное поле, магнитные сердечники, аксиальная неоднородность

*A modified approach to calculating the magnetic fields of electrical machines with an axial nonuniformity of their cores is proposed. The use of a two-dimensional numerical method is proposed with modifying simultaneously the properties of magnetic media, slot areas and air gaps, which enables the structure of the cores to be taken into account along the axial direction. The magnetic flux linkages of the windings of electrical machines are determined on the basis of a topological approach, using a universal method that enables the time taken to compute the magnetic fields, parameters, characteristics and phenomena in electrical machines to be reduced several-fold.*

**Key words:** electrical machine, magnetic field, magnetic cores, axial nonuniformity

В последние 30–40 лет при разработке электромагнитных устройств (ЭМУ) лидирующее положение для расчета магнитных полей, безусловно, занимали численные методы. Аналитические способы расчета сохраняют свои позиции, что обусловлено целым рядом существенных преимуществ при решении специфических задач анализа магнитных полей и процессов в ЭМУ. Однако они не могут успешно конкурировать с численными способами при описании сложной конфигурации областей анализа, наличии сред с нелинейными характеристиками, вовлекаемыми в расчет, необходимости учета реакции вторичных сторон, а также при попытках воспроизведения объемных и слоистых структур. Эти причины, а также ряд дополнительных свойств специфических конструкций ЭМУ привели, как известно, к подавляющему доминированию численных методов, среди которых до середины 70-х годов прошлого столетия наибольшей популярностью пользовался метод конечных разностей (МКР), а после 70-х годов — метод конечных элементов (МКЭ). Вне всяких сомнений, решающим фактором стремительного развития численных методов в последние 30 лет было создание мощных вычислительных средств и соответствующего программного обеспечения. Существенную роль сыграло и развитие методов математического моделирования ЭМУ.

Параллельно с развитием средств и методов расчета возрастали потребности исследователей

в повышении размерности решаемых задач с увеличением числа учитываемых факторов при конструировании и функционировании ЭМУ в различных режимах и условиях.

В настоящее время при создании ЭМУ наметилась еще одна дополнительная тенденция — необходимость анализа их электромагнитной совместимости с комплексом присоединяемых устройств и окружающей средой.

Математическое моделирование позволяет решать задачи оптимизации ЭМУ и систем, сопрягаемых с ними, в различных рутинных и экстремальных ситуациях. Одно из возможных направлений моделирования — создание средств воспроизведения поведения ЭМУ и всех его установок в темпе, приближенном к эксплуатационному. Это позволяет объединить физические и математические модели, создать специальные тренажеры для исследования неординарных режимов в широком спектре возможных ситуаций и, как следствие, повысить надежность отдельных элементов и установок в целом.

Электрическая машина (ЭМ) любого ЭМУ является ядром и наиболее сложным его элементом и может рассматриваться как весьма сложная система, интегрирующая в себе электромагнитные, тепловые, волновые, гидродинамические и механические явления. Порядок системы оказывается весьма высоким, однако часть связей между перечисленными явлениями может в ряде случаев приниматься довольно слабой и в незначитель-