

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОВОДНИКЕ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Чемерис В.Т.

*Министерство Украины по делам науки и технологий  
252601, Киев-30, бульвар Т.Шевченко, 16, vchemer@sabbo.net*

**АННОТАЦИЯ.** Рассматривается влияние деформации проводника и локальных перегревов, обусловленных структурными неоднородностями материала, на долговечность импульсного индуктора. Описан подход к оценке этих явлений расчетным путем и приведены данные об имеющихся программных средствах для моделирования распределения плотности тока и температуры с применением метода конечных элементов и метода конечных разностей.

Применение магнитно-импульсных индукторов для массовой обработки серийных металлоизделий связано с проблемой ускоренного разрушения индуктора при амплитудных значениях поля, достигающих 30 - 40 Тл и более. Впервые с проблемой разрушения проводника соленоидов для создания сверхсильных магнитных полей встретился П.Л.Капица [1]. В его работе причиной разрушения соленоида был разрыв проводника, вызванный электродинамическими усилиями, которые стремятся увеличить диаметр соленоида и вызвать частичное раскручивание его витков. Как было выявлено позднее экспериментальными исследованиями ряда авторов (В.П.Чибисов и др.), помимо этой причины, в индукторах для МИОМ существенно проявляется еще один важный фактор разрушения: пережигание поперечного сечения проводника за счет концентрации плотности тока в тех местах, где имеется сужение эффективного сечения из-за неоднородности внутренней структуры проводника или появления начальной трещины, обусловленной усталостью металла под действием циклических деформаций. Приближенное теоретическое описание процессов разрушения проводника было предпринято проф. Ю.И.Головиным и соавторами в серии работ, опубликованных в журнале "Физика разрушения материалов". Было отмечено, что возможны три механизма разрушения проводника импульсным током: 1) чисто силовое разрушение, ког-

да тепловые процессы не успевают сыграть сколь-нибудь значительной роли; 2) термическое разрушение, когда основную роль играет локальное оплавление проводника при незначительном влиянии электродинамических усилий; 3) магнитогидродинамическое разрушение, характеризующее совместным проявлением процессов локального плавления проводника и выноса материала электродинамическими силами. При сверхсильных быстро нарастающих во времени полях возможно и прямое испарение проводника в месте концентрации плотности тока, минуя фазу плавления, о чем неоднократно сообщалось в работах зарубежных авторов (например, в работах группы Ф.Герлаха, Бельгия). При создании импульсных магнитов для применения в технике физического эксперимента вопросу структурной целостности и однородности проводника уделяется значительное внимание (см., например, сообщение Г. Шнейдера-Мунтау и сотр. из Национальной лаборатории сильных магнитных полей, США [2]). Экономические факторы, т.е. необходимость снизить затраты на воспроизводство индукторных систем, стимулировали исследование этого вопроса и в практике МИОМ. Стали разрабатываться специальные методы крепления вывода, допускающие его проскальзывание относительно контактной шины, что восходит к решениям, примененным П.Л.Капицей. Стали уделять особое внимание подбору материала для проводника индуктора, ставя на первое место при выборе не величину удельного электросопротивления материала, а его устойчивость к циклическим деформациям и ударную вязкость, что в итоге привело к применению пружинных сталей для изготовления индукторов.

По инициативе и под руководством автора в Институте электродинамики НАН Украины Ю.В.Аристовым разработана и испытана достаточно простая и надежная программа расчета напряженного состояния и деформаций спиральных индукторов. Учитывается возможное раскручивание витков при недостаточно жестком закреплении выводов.

По мере накопления практического опыта было установлено (прежде всего благодаря работам Тульского НИИ технологии), что под воздействием импульсного тока пружинная сталь выдерживает в 50 раз раз меньше циклов деформаций, чем при чисто механическом нагружении. Причиной этому является влияние структурных неоднородностей в сечении проводника, которые под действием тока способны лавинообразно разрастаться. Таким образом, не-

значительная начальная трещина или инородное включение с пониженной электропроводностью в определенный момент приводят к катастрофическому разрушению проводника в результате накопления и развития дефекта в материале под действием тепловых и силовых факторов, обусловленных импульсным током.

Наряду с чисто конструктивными мерами предупреждения разрушения индуктора под действием указанных факторов, необходимы способы анализа ожидаемых деструктивных процессов на стадии проектирования индуктора. Строгий анализ диффузии поля в проводнике, обладающем нелинейными свойствами электропроводности и теплопроводности, к тому же сопровождаемой возможной потерей массы проводника, выполнить теоретически крайне затруднительно. Многие авторы в целях упрощения решают задачи обтекания неоднородного включения электрическим током в стационарном приближении, что далеко от потребностей техники МИОМ. Последнее такое решение опубликовано проф. Ю. П. Емцем [3]. Эти результаты полезны только для выяснения влияния соотношения между значениями коэффициента электропроводности основного проводника и включения на перераспределение плотности тока между основным проводником и областью, занятой включением. Что же касается степени концентрации тока в сужении проводника вблизи включения, то ясно, что здесь вклад скин-эффекта является значительным и необходимо рассматривать неустановившееся решение.

Широкое распространение численных методов, и в первую очередь, базирующих на конечно-элементной аппроксимации уравнений диффузии поля и тепла в проводнике, позволило подойти к решению задачи об исследовании электрофизических процессов, имеющих деструктивный характер и угрожающих целостности индуктора, на основе все более сложных расчетных моделей, избегая чрезмерного упрощения, неизбежного при теоретическом рассмотрении. Задача о распределении тока и температуры в окрестности начальной трещины на поверхности проводника была решена методом конечных разностей в работе [4] при совместном рассмотрении уравнений диффузии поля и диффузии тепла. Программное обеспечение, разработанное указанными авторами, не является достаточно универсальным и доступным для применения.

К числу общедоступных программ, пригодных для применения в практике проектирования индукторов, относится программа Quick Field, версия 3.4 которой свободно распространяется через Интер-

нет. Эта программа разработана фирмой "Тор" в Санкт-Петербурге. Она позволяет решать связанные задачи (электрические + тепловые, тепловые + механические, электромагнитные + механические) в области ограниченных размеров (до 500 узлов), имеет достаточно развитый пост-процессор. Более мощная версия программы, способная решать задачи в области, насчитывающей до 100 тыс.узлов, распространяется как коммерческая фирмой Tetra Analysis, штаб-квартира которой находится в США. Стоимость такой программы для стран СНГ исчисляется несколькими тысячами долларов.

Программа, подобная по назначению Quick Field v.3.4, однако менее универсальная, создана в Институте электродинамики к.т.н. И.С.Петуховым. Она специализирована в основном для решения электромагнитных задач. Как и Quick Field, она имеет графический редактор для построения исходной модели и достаточно развитый пост-процессор.

Среди зарубежных программ, распространяемых на коммерческих началах, наиболее привлекательной является программа фирмы Macsyma Inc., США, известная под названием PDEase2D. При достаточно мощном решателе эта программа имеет относительно невысокую стоимость (около 700 долларов США, для студентов 200 долларов). В этой программе применяется формальный язык, с помощью которого осуществляется построение исходной модели, задается вид уравнений краевой задачи и граничные условия. Пост-процессор обеспечивает достаточно высокий уровень сервиса в отображении результатов.

Автором выполнен мониторинг имеющихся на мировом рынке программных средств для моделирования электромагнитных полей и краевых задач различного типа. Программы, разработанные фирмами Infolytica Corp. (Канада), Vector Fields (Англия), Ansoft Corp., Magsoft Corp., Remcom Inc., Integrated Engineering Software, Argus Interware и др. (США), имеют мощные решатели, обладают большими возможностями, однако их стоимость исчисляется десятками тысяч долларов США. К тому же зачастую они требуют наличия иной операционной системы (например, Lynux для разработок Remcom Inc.), чем применяется в широко распространенных компьютерах.

Эффективное применение компьютерных программ, реализующих численные методы, при рассмотрении проблем, определяющих циклическую стойкость индукторов, в сочетании с накоплен-

ным опытом инженерных решений позволяет достичь нового, более высокого уровня долговечности индукторных систем для установок МИОМ с напряженным рабочим режимом.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Капица П.Л. Дальнейшее развитие метода получения сильных магнитных полей. - В кн.: П.Л.Капица. Научные труды. Сильные магнитные поля.- М., Наука, 1988, с.95-110.

2. B.J.Gao, H.J.Schneider-Muntau et al. A poly-layer reinforcement scheme for pulse magnets.- Proceedings of 15th Intern.Conf. on Magnet Technology, Beijing, China, October 20-24, 1997, part 1, pp.648-652.

3. Барабанова Н.В., Емец Ю.П. Формирование электрического поля в проводнике с цилиндрическим включением на границе. - Техническая электродинамика, 1998, № 6, с.3-9.

4. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Численный расчет связанных электромагнитных и тепловых полей в нелинейных электропроводящих средах.- Препринт № 720 Института электродинамики АН Украины. Киев, 1991, 26с.

### **ОБ УЧАСТИИ УКРАИНСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ В РАБОТЕ ПЕРВОГО МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА ПО НЕТЕРМИЧЕСКОМУ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ИОНИЗИРОВАННЫХ ГАЗОВ**

**(г. Норфолк, США, штат Вирджиния, 12-14 апреля 1999 года)**

**Чемерис В.Т.**

*Министерство Украины по делам науки и технологий*

12-14 апреля 1999 года по инициативе и при поддержке Офиса научных исследований Военно-воздушных сил армии США (US Air Force Office of Scientific Research - сокращенно US AFOSR) в г. Норфолк, США (штат Вирджиния) был проведен первый международный симпозиум по нетермическому медико-биологическо-