

## УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННЫМ СОСТОЯНИЕМ ПЛОСКОЙ МНОГОСЛОЙНОЙ КАТУШКИ ТОРОИДАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Б.Ф. Зайцев, Н.Г. Шульженко,

*Национальный технический университет "ХПИ", Харьков, Украина*

The possibility of reducing maximum stress in multilayer electromagnetic coils is considered. Optimum separation of conducting and nonconducting layers, which introduces the elastic support effect, is suggested. The finite-element method and the modified plane stress state scheme are applied.

Механическая напряженность катушек тороидального магнитного поля является одним из основных факторов, препятствующих достижению высоких параметров электромагнитных полей в установках по удержанию плазмы.

Исследования по рациональному проектированию катушек минимальной механической напряженности рассматривались в ряде работ [1-4]. В одних работах проблема решалась получением оптимальной формы катушек [1, 2], в других – прибегали к дополнительному упругому подкреплению, имеющему различное конструктивное исполнение [3, 4]. Ко второму направлению относится и данная работа.

Схема рассматриваемой плоской катушки представлена на рис. 1. Ряд катушек данной конструкции циклически симметрично расположены относительно колонны установки с опиранием на нее. Совокупность катушек составляет систему тороидального магнитного поля установки [5].

Катушка относится к биттеровскому типу и представляет собой многослойную пластину со стальными подкрепляющими накладками (Б) и проводящей части катушки (ПЧК) в виде медно-изоляционного компаунда. Коммутация витков ПЧК выполнена в "контактной" зоне (К), а скрепление всего пакета осуществляется поперечными шпильками (на рисунке показаны крестиками). Катушка нагружена электромагнитными силами, приложенными к ПЧК в ее плоскости, приближенно задаваемыми формулой [5]

$$F_r = \frac{k}{[\ln(r_e/a)^2]} \cdot \frac{\ln(r_e/r)^2}{r(R_0 - r \cos \theta)},$$

где  $R_0$  – радиус от оси колонны до центра катушки,  $k$  – коэффициент, определяемый уровнем магнитного поля катушки.

Приведенная формула точна для круглой катушки и обобщена на случай переменного внешнего радиуса  $r_e$ .

Равнодействующая объемных сил  $F_r$  направлена к колонне и воспринимается введенным опиранием. Вследствие симметрии катушки и четности  $F_r$  от  $\theta$  рассматривается половина области, а на линии разреза

вводятся условия симметрии.

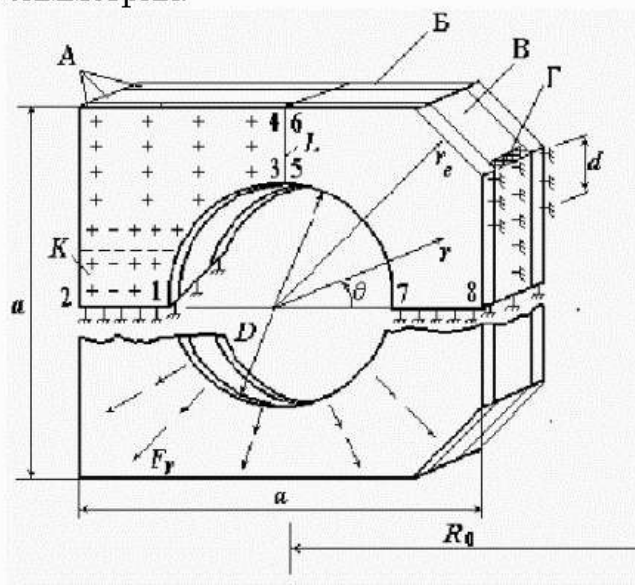


Рис. 1 – Схема катушки: А – скрепленная часть; Б – стальные накладки; В – пакет медных витков; Г – прокладка; К – “контактная” зона

В базовом варианте конструкции скрепление слоев предполагается по всей площади катушки. В этом случае взаимное смещение слоев отсутствует. Геометрия катушки и характер действующих сил позволяют применять обычную схему плоского напряженного состояния, для численной реализации которой использован МКЭ [7]. При этом вводятся эффективные механические характеристики слоистого композита.

Анализ НДС базовой конструкции, как и в случае классической круглой катушки, показал существенную неравномерность распределения напряжений, которые носят изгибный характер (табл., вар. I).

Тангенциальные напряжения в точках 1÷8 ПЧК и характеристика опирания

№	Вариант	$\sigma_t$ , МПа								F'/F
		1	2	3	4	5	6	7	8	
I	Базовая конструкция	32,1	10,7	12,1	24,0	12,1	24,0	41,6	18,9	0
II	$d = d_{\max}; C = C_{\text{опт}}$	22,8	14,4	20,7	15,6	31,2	22,3	30,5	29,4	0,6
III	$d = \frac{2}{3}d_{\max}; C > C_{\text{опт}}$	23,4	14,6	17,0	18,9	31,5	16,9	31,4	25,6	0,4
IV	$d < d_{\max}; C \ll C_{\text{опт}}$	18,4	17,0	23,6	13,3	46,1	20,4	21,2	38,9	1

Для уменьшения влияния изгибного фактора рекомендуется упругое подкрепление катушек [3-5]. Для данной конструкции катушки это возможно за счет частичного разобщения стальных накладок и ПЧК, опирания стальных

накладок (СН) непосредственно на колонну, а ПЧК – на колонну через прокладку.

Следствием этого является приложение реакции под накладками к катушке через линию разобщения  $L$  (см. рис. 1), что соответствует упругому опиранию. Как механическая система катушка с разобщением представляет собой многослойную пластину, на части области которой слои скреплены (А), а на части деформируются независимо (Б и В). Во всех слоях реализуется схема плоского напряженного состояния (ПНС).

В математическом плане введенная схема деформирования в рамках ПНС имеет нетрадиционную формулировку, более подробно рассмотренную в [6]. В системе уравнений МКЭ, получаемой согласно [7], связь между подобластями А, Б, В осуществляется через уравнения, которые соответствуют узлам линии стыковки (разобщения)  $L$ .

Каждая подобласть пластины имеет свои эквивалентные жесткостные характеристики, зависящие от сочетания слоев, их толщин и упругих характеристик и определяемые правилами механики композитов. В результате расчета определяются реальные перемещения в плоскостях пластин, а также получаются макронапряжения, которые используются для пересчета напряжений в составляющих подобласть слоях по простым формулам.

Из решения задачи об оптимальном упругом подкреплении круглой катушки тороидального магнитного поля по стержневой модели известно, что наибольший эффект снижения напряжений имеет место при реализации упругого опирания через среднюю часть катушки ( $\theta_L \approx 0,5\pi$ ). Это подтвердили и проведенные численные исследования по предложенной схеме при различных углах разобщения  $\theta_L$ . Более предметно в дальнейшем рассматривается именно такой случай.

На рис. 2, 3 представлены результаты расчеты НДС катушки с разобщением при полном опирании ( $d = 0$ ) на стальные накладки. Картина смещений и распределение напряжений физически интерпретируемы. Существенно более низкий уровень напряжений в ПЧК подобласти А связан с подкрепляющим действием СН. Выясним условия оптимального упругого опирания катушки без подкрепления в подобласти А.

Стальные накладки, соединенные с медным пакетом по линии  $L$ , воспринимают не только продольную силу, которая частично уравнивает равнодействующую внешних сил, но и изгибающий момент и перерезывающую силу. Смоделируем случай, близкий к оптимальному упругому подкреплению круглых катушек [5], предусматривающему передачу только продольной силы. Для этого введем сосредоточенное опирание СН при  $d = d_{\max}$ . Распределение напряжений  $\sigma_\theta$  в СН на линии  $L$  практически равномерное, т.е. действительно опоры передают только продольную силу.

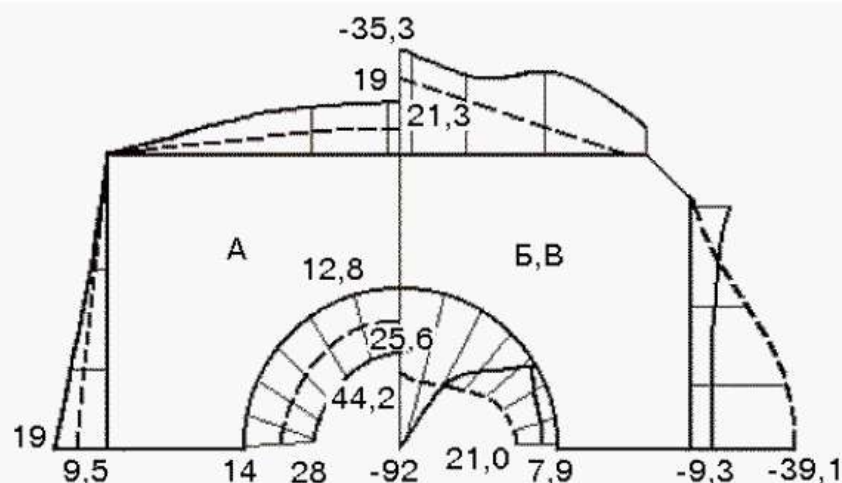


Рис. 2. Тангенциальные напряжения (МПа) в стальных (сплошная линия) и медных (пунктирная линия) элементах катушки при их частичном разобшении

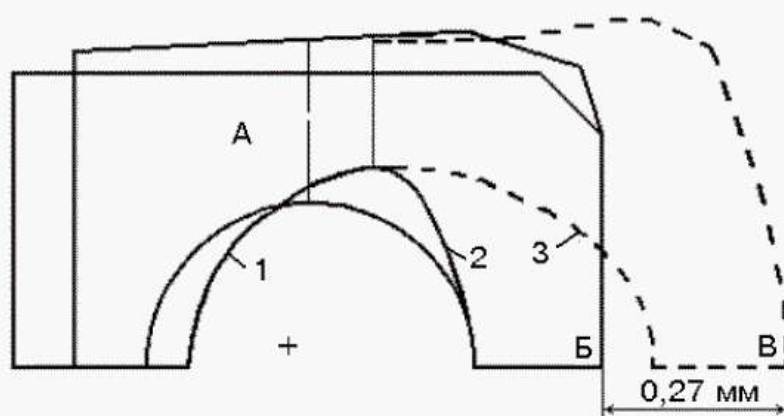


Рис. 3. Деформация катушки с частично разобщенными стальными и медными элементами:

- 1 – положение части А катушки со скрепленными элементами;
- 2, 3 – положение частей Б, В катушки соответственно разобщенных стальных и медных элементов

Варьировалась жесткость прокладки под ПЧК с целью снижения максимальных напряжений в меди (ПЧК). Результаты для оптимального варианта II (жесткость прокладки  $C_{opt}$ ) представлены в таблице для точек, указанных на рис. 1.

Основной характеристикой оптимального упругого опирания является соотношение суммарной реакции упругого опирания на СН  $F'$  и результирующей внешних сил  $F$ . Величина  $F'$  вычислялась как интеграл от напряжения  $\sigma_\theta$  в СН справа от линии  $L$ . Сила  $F$  равна сумме  $F'$  и суммарной реакции прокладки под ПЧК ( $F''$ ). Для данной задачи оптимальная величина  $F'/F$  составила 0,6 (заметим, что для круглой катушки это значение равно 0,8 [5]).

Для реального опирания ("подковообразная" разобшенная часть СН) СН воспринимают все силовые факторы и оптимальное опирание имеет место на более жесткой прокладке. Средняя часть СН теряет контакт с колонной, поэтому целесообразно заранее осуществлять неполное опирание ( $d \approx \frac{2}{3} d_{\max}$ ). Для этого варианта (вар. III таблицы) максимальное напряжение имеет примерно такие же величины, как и для предыдущего, однако характеристика  $F'/F \approx 0,4$ .

Таким образом, оптимальное упругое опирание катушки, полученное частичным разобщением СН и ПЧК, а также частичным жестким опиранием СН и упругим опиранием ПЧК с заданной податливостью, позволяет снизить максимальные растягивающие напряжения в меди с 41,6 до 31,5 МПа.

Другой ответственной характеристикой напряженности меди в ПЧК являются напряжения на границе КЗ, которые для базового и оптимального по максимальным напряжениям вариантов распределены очень неравномерно. Можно добиться почти равномерного (вар. IV) распределения напряжений на границе КЗ, при этом, однако, возрастают максимальные напряжения в других (менее ответственных) частях катушки. Результаты варианта IV получены при неполном опирании СН и очень податливой прокладке по ПЧК.

## Литература

1. Лейтес Л.В. Тороидальный реактор без сердечника для энергосистем//М.: Электричество. – 1960. – № 11. – С.76–81.
2. Шафранов В.Д. Об оптимальной форме тороидальных соленоидов// Журн. техн. физики. – 1972. – 42, вып. 9. – С. 1785–1791.
3. Ваулина И.Г., Елисеев В.В., Пальмов В.А. и др. О расчете прочности электромагнитной системы установки Т-20 //Докл. Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Ленинград, 28–30 июня 1977 г. Л., Науч.-исслед. ин-т электрофизич. аппаратуры им. Д.В. Ефремова, 1977. – I. – С. 265-273.
4. Монтгомери Д.Б. Разработка магнитных систем // Тр. Ин-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. – 1981. – 69, № 8. – С. 133–167.
5. Расчет на прочность биттеровской катушки тороидального магнитного поля установки типа токамак/ А.Н. Подгорный, А.Г. Киров, Б.Ф. Зайцев и др.–Харьков, 1986. – 43 с. (Препринт/АН УССР. Ин-т пробл. машиностроения: № 235)
6. Зайцев Б.Ф. Модифицированная схема плоского напряженного состояния для многослойной пластины // Науковий вісник будівництва. – 2001.– Вып. 14. –С.40–43.
7. Решение прикладных контактных задач методом конечных элементов /А.Н.Подгорный, Г. А. Марченко, П.П. Гонтаровский, Б.Н. Киркач. – Харьков, 1984. – 64 с. (Препринт/АН УССР. Ин-т пробл. машиностроения: № 198)

Поступила в редколлегию 04.09.2001