

РЕАКТОРЫ НА НАПРЯЖЕНИЕ (6÷35) КВ С МАГНИТОПРОВОДАМИ ИЗ РЕЗИСТИВНЫХ КОМПОЗИТОВ

С. В. Горелов

В России и за рубежом продолжается выпуск токоограничивающих реакторов для напряжения (6÷10) кВ с цилиндрической обмоткой из алюминиевого провода, которая собирается в бетонные колонки без магнитопровода. В течение длительного срока эксплуатации модернизировали главным образом конструкцию крепления колонок и схему катушки, что не привело к значительному сокращению массогабаритных показателей. Дальнейшие разработки были направлены на уменьшение массогабаритных параметров и затрат на конструкционные материалы [1–4].

Перспективным с точки зрения изменения конструкции реакторов является использование ферромагнитных магнитопроводов. В настоящее время для компенсации емкостных токов в сетях (6÷35) кВ используются реакторы с линейной характеристикой, имеющие магнитопровод из электротехнической стали с зазорами. Указанные реакторы выполняются на электромагнитную мощность до 1,5 МВА.

Требования к магнитопроводу, одним из которых является линейность характеристики намагничивания реактора, оказываются весьма жесткими. Требования к линейности характеристики реактора с магнитопроводом можно сформулировать следующим образом: в диапазоне токов реактора от $I_{ном}$ до I_k индуктивное сопротивление не должно меняться более чем на 15%.

Проведенный анализ характеристик намагничивания показывает, что при стержневой конструкции реактора и при $I_{к доп} / I_{ном} = 5 \sim 25$ указанное условие достижимо, если для изготовления магнитопровода применить материал, имеющий $\mu_{нач} < 12$ и $B_s < 1,6$ Тл. При магнитопроводе из электротехнической стали для выполнения указанного условия потребуется изготовить шихтованный стержень с большим числом зазоров, что технологически трудно осуществимо. Поэтому предлагается магнитопровод выполнять из магнитодиэлектрика без зазоров [4–5].

В качестве материала для магнитопровода целесообразно использовать магнитодиэлектрик с небольшой магнитной проницаемостью, имеющих линейные характеристики в полях большой напряженности (порядка 200÷400 кА/м). При этом отпадает необходимость в зазорах и не требуется производить шихтовку сердечника, кроме того, потери на вихревые токи существенно уменьшаются. Отечественная промышленность выпускает подобные магнитодиэлектрики для радиотехнических

целей (карбонильное железо, альсифер и пр.), однако их стоимость не позволяет использовать последние для энергетических целей.

В последнее время в ряде организаций (МЭИ, ТОО БЭЛ, СибНИИЭ, НГАВТ) разработаны магнитодиэлектрики на основе промышленных железных порошков ПЖ-2 и ПЖ-5, выпускаемых металлургическими предприятиями России по ГОСТ 9849-74 для порошковой металлургии. Разрабатываются также более дешевые магнитодиэлектрики на базе магнетитовых железорудных порошков и железной окалины (отходов проката стали). В качестве связующих используются различные вещества, такие как эпоксидные смолы, цемент и др. [5–9].

Для производства токоограничивающих реакторов наиболее приемлемыми являются магнитодиэлектрики со связующим в виде цементного раствора – магнитобетоны [4, 5, 8–9].

Магнитная проницаемость магнитобетона определяется процентным содержанием (по объему) цементного раствора и может быть вычислена по формуле

$$M_{мдз} = 300\mu_{Fc} / (300 + M + \mu_{Fc}),$$

где μ_{Fc} – магнитная проницаемость ферромагнитного наполнителя (о.е.); V – объемное содержание цементного раствора (%).

Технически чистое железо имеет следующие значения магнитной проницаемости: $\mu_{нач} = 240$; $\mu_{max} \sim 7000$. В таблице 1 приведены значения магнитной проницаемости магнитобетона в зависимости от объемного содержания в нем железного порошка [4].

Таблица 1
Магнитная проницаемость магнитобетона

μ , о.е.	3	5	7	10	12	15	20
V , %	12,0	41,2	58,3	71,2	76,2	81,2	6,2

Магнитная проницаемость магнитодиэлектриков слабо зависит от напряженности магнитного поля вплоть до значений в (60÷70) кА/м. Потери на вихревые токи в них незначительны, а полные потери определяются только потерями на перемагничивание. В таблице 2 приведены зависимости $B_{max} = f(H)$, $\mu = f(H)$ и $\Delta P = f(H)$ для магнитобетона с $\mu_{нач} = 8$. В таблице 3 приведены зависимости $B_{max} = f(H)$ в сильных полях для магнитобетона с $\mu_{нач} = 4$; 6; 8 и 12,7, соответственно.

Теплопроводность магнитобетона существенно выше, чем у обычного бетона, а прочность из-

РЕАКТОРЫ НА НАПРЯЖЕНИЕ (6÷35) КВ С МАГНИТОПРОВОДАМИ ИЗ РЕЗИСТИВНЫХ КОМПОЗИТОВ

Таблица 2

Зависимости $B_{max} = f(H)$, $\mu = f(H)$ и $\Delta P = f(H)$ для магнитобетона с $\mu_{нач} = 8$

H, кА/м	2,866	5,589	6,95	10,31	14,04	21,64	28,66	34,4
B, Тл	0,041	0,077	0,092	0,133	0,172	0,237	0,306	0,344
μ, о.е.	8,188	7,79	7,47	7,24	6,91	6,16	6,0	5,63
ΔP, Вт/кг	0,23	0,587	0,749	1,339	1,821	2,678	4,49	5,35

делий из него определяется технологией изготовления последних. Магнитобетон на основе железных порошков имеет достаточно высокую электропроводность и обладает электрической прочностью (300÷400) В/см.

Для изготовления магнитобетона не требуется высоких температур и давлений, при этом он обладает достаточной прочностью (предел прочности на сжатие, например, достигает 30 МПа). При предварительном исследовании моделей реакторов со стержневым магнитопроводом из магнитобетона с $\mu_{нач} < 8$ было выявлено, что при использовании коротких магнитопроводов, для которых $h_{ст} < D_{ст}$, наблюдается существенное изменение индукции в магнитопроводе в радиальном направлении. При $h_{ст} > D_{ст}$ наблюдались существенные различия индукции в середине и по краям стержня. С учетом этих особенностей для расчетов принята модель с разбиением магнитопровода на отдельные кольцевые элементы и для учета их намагнитченности применен метод вторичных источников. Проведенные испытания опытного образца реактора показали следующее [5]:

- использование магнитопровода из бетэла с магнитными свойствами – магнитобетона – позволяет увеличить индуктивность катушки при оптимальной конструкции реактора в 3 и более раз;
- расхождение измеренных значений индуктивного сопротивления в расчетном диапазоне токов не превышает 10%;
- потери в магнитопроводе в ненасыщенном состоянии незначительны и составляют не более 5% от потерь в катушке при плотности тока до 10 А/мм; а при уменьшении тока катушки потери в магнитопроводе снижаются до (2÷2,5)%;

- в области максимальных токов к.з. наблюдается насыщение магнитопровода и индуктивное сопротивление, определяемое опытным путем для данных токов, снижается по сравнению с номинальным режимом до 2%;

- в области насыщения магнитопровода не отмечен рост потерь, несмотря на увеличение плотности токов катушки до 50 А/мм;

- наличие высших гармоник в напряжении на реакторе при синусоидальном токе намагничения и в отсутствии насыщения не отмечено, а при наличии насыщения изменение индуктивного сопротивления реактора за период составляет $\pm 5\%$.

Результаты испытаний показали, что использование стержневых магнитопроводов и магнитобетона позволяет снизить на (50÷55)% расход обмоточных материалов, уменьшить габариты реактора, вес и электрические потери в (3÷5) раз.

Отмечены следующие положительные физические явления, характерные для стержневых реакторов из магнитобетона: сложная нелинейная зависимость индуктивного сопротивления от соотношения длины стержня к диаметру сечения провода, числа витков и слоев. Оптимальный реактор видится имеющим соотношение длины стержня к диаметру равным 5 с однослойной катушкой. Так, например, реактор неоднослойной катушки со 100 витками имел сопротивление 2 Ом, а трехслойный с 350 витками – 5 Ом, тогда как эти же реакторы без сердечника имели сопротивления, различающиеся между собой в 12 раз. С учетом сказанного сопротивление реактора может быть рассчитано по формуле

$$X = W m_0 \frac{\mu}{4l} W^2 d \phi,$$

Зависимости $B_{max} = f(H)$ в сильных полях для магнитобетона

Таблица 3

$\mu_{нач} = 4$												
H, кА/м	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
B, Тл	0,22	0,43	0,61	0,75	0,86	0,97	1,07	1,16	1,24	1,3	1,33	1,36
$\mu_{нач} = 6$												
H, кА/м	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
B, Тл	0,32	0,56	0,77	0,9	1,04	1,16	1,26	1,35	1,42	1,47	1,51	1,55
$\mu_{нач} = 8$												
H, кА/м	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
B, Тл	0,4	0,65	0,85	1,03	1,18	1,31	1,4	1,47	1,54	1,59	1,6	1,63
$\mu_{нач} = 12,7$												
H, кА/м	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
B, Тл	0,5	0,75	0,96	1,13	1,3	1,4	1,47	1,53	1,6	1,65	1,67	1,69

где Φ – коэффициент формы, зависящей от характеристик реактора без магнитобетонного сердечника; W – число витков; μ_0 – магнитная проницаемость для воздуха; d – диаметр реактора; w – круговая частота; μ – характеристика магнитопровода, зависящая от параметров реактора. Ее среднее значение в исследованных вариантах колебалось в пределах (1,4÷50) (первая цифра для варианта, далекого от оптимального). Выполнение обмотки из двух параллельных витков уменьшает μ в (1,4÷1,7) раза, из трех – в (2÷2,5) раза.

Указанные средние значения μ меняются от начального значения $\mu_{нач}$ меньшего среднего в (1,2÷1,3) раза до максимального μ , больше среднего в (1,2÷1,3) раза и насыщенного меньше максимального в (1,5÷2,0) раза. Последнее значение может быть получено при использовании материала, в котором в качестве связующего находится жидкое стекло. Значение 2,0 получено при использовании для этой цели цемента. Необходимо при этом строгое выполнение технологических правил на изготовление магнитобетонных сердечников. Предельное насыщение имеет место при токах, значительно превышающих максимальное значение токов к.з. для витков от начального $\mu_{нач}$ до предельного μ насыщенного, и не соответствует аналогичным изменениям для электротехнической стали. Поэтому, если трансформатор может работать в пределах повышающейся части изменения характеристики, то реактор – также и в пределах падающей характеристики. В этом и состоит особенность магнитобетона и перспективность его применения. В пределах реального изменения токов от максимального тока к.з. сопротивление реактора будет изменяться на $\pm 5\%$.

Для токоограничивающих и компенсирующих реакторов предлагается реактивный модуль на длительный ток до 100 А, сопротивлением до 1,0 Ом, выполненный из сердечника длиной 50 см и диаметром 10 см, состоящий из пяти элементов длиной 10 см и диаметром 10 см. Обмотка литая из (18÷36) витков, однослойная или катушечная непрерывная. Сторона провода до 10 мм, максимальное сечение 10x20 для алюминиевой обмотки, 10x10 – для медной. Возможно выполнение обмотки из (2÷3) параллельных витков.

Требуемое индуктивное сопротивление и рабочий ток могут быть получены последовательно-параллельным соединением модулей. При этом должна учитываться взаимная связь между модулями для оптимизации реакторов.

Для заземляющих реакторов (6÷35) кВ предлагается реакторный модуль на длительный ток до 10 А сопротивлением до 16 Ом, выполненный на сердечнике длиной 25 см и диаметром 5 см, из элементов длиной 5 см и диаметром 5 см. Обмотка литая (до 100 витков) из медного провода сечением 2 мм.

При разработке макетного образца реактора с магнитопроводом из магнитобетона была проведена оценка возможности изготовления в промышленных масштабах только магнитопроводов, поскольку остальные операции (изготовление катушки из шины, колонок из стеклопластика и т.д.) не являются принципиально новыми и промышленностью широко освоены.

Как показал опыт изготовления магнитопровода для макетного образца реактора, в настоящее время достаточно быстро может быть освоено производство наборных магнитопроводов, составляемых из изготовленных по оригинальной технологии, принятой при производстве бетэловых резисторов, дисков диаметром 50, 100 и 200 мм [3, 4, 6, 9].

Применение магнитобетона позволяет:

- создать токоограничивающие реакторы с уменьшенным, по сравнению с применяемыми в настоящее время бетонными, расходом обмоточных материалов до 50% при одновременном сокращении габаритов изделия на (50÷60)%;
- создать конструкцию пусковых реакторов с уменьшенными в (2–3) раза линейными размерами, по сравнению с бетонными, и соответствующим сокращением массы обмоточного материала, что позволит разместить указанные реакторы в ячейках КРУ и КРУН;
- уменьшить отношение индуктивного сопротивления реактора к активному при протекании токов короткого замыкания по сравнению с номинальным режимом и соответственно ударный ток;
- менять оснастку, изготавливать магнитопроводы любой конфигурации;
- создать в короткие сроки конкурентоспособные конструкции реакторов.

Токоограничивающие реакторы используются на электрических станциях, подстанциях и линиях электропередачи. Пусковые реакторы – для пуска и предотвращения самозапуска мощных синхронных и асинхронных двигателей на газо- и нефтеперекачивающих станциях.

Таким образом, для повышения эффективности работы и совершенствования токоограничивающих реакторов необходим переход от конструкций без стали к конструкциям с магнитопроводами. Наиболее эффективным в качестве материала магнитопровода является применение магнетика типа магнитобетон. Применение магнитобетонных стержневых магнитопроводов приводит к уменьшению объема реактора на 50% и экономии обмоточных материалов до 40%.

Литература

1. Соколов В.П. Расчет токоограничивающих реакторов. М.: Изд-во Моск. энерг. ин-та, 1985. 237 с.

РЕАКТОРЫ НА НАПРЯЖЕНИЕ (6÷35) КВ С МАГНИТОПРОВОДАМИ ИЗ РЕЗИСТИВНЫХ КОМПОЗИТОВ

2. Михайлов В.В. Магнитоэлектрики в устройствах автоматики и релейной защиты. М.: Энергоатомиздат, 1986. 196 с.

3. Горелов В.П. Композиционные резисторы для энергетического строительства / В.П. Горелов, Г.А. Пугачев; Под ред. В.Е. Накорякова. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е, 1989. 216 с.

4. Старшинов В.А. Исследование токоограничивающих реакторов с магнитопроводами из магнитоэлектрика / В.А. Старшинов, Л.Е. Врублевский, В.В. Михайлов и др. // Вестник Моск. энерг. ин-та. 1994. №1. С. 45–50.

5. Горелов В.П. Особенности работы реакторов с бетэловыми сердечниками / В.П. Горелов, С.В. Горелов, Е.В. Дмитриев и др. // Электрофизика, электроснабжение, электрооборудование, автоматика речных судов и промышленных предприятий: Сб. науч. тр. / Новосибир. гос. акад. водн. трансп. Новосибирск, 1998. С. 7–9.

6. Контактные устройства резисторов из композиционных материалов: Учеб. пособие / П.В. Горелов, С.В. Горелов, Л.И. Суругин и др.; Новосибир.

гос. акад. водн. трансп.; Под ред. В.П. Горелова. 2-е изд., доп. Новосибирск, 2003. Ч. 1. 255 с.

7. Горелов В.П. Низкотемпературные нагреватели из композиционных материалов в промышленности и быту. М.: Энергоатомиздат, 1995. 208 с.

8. Технология конструкционных электротехнических материалов: Учеб. пособие: В 2-х кн. / П.В. Горелов, Н.А. Коваленко и др.; Под ред. В.П. Горелова, М.Н. Иванова. 2-е изд. доп. Новосибирск, 2005. Кн. 1. 354 с.

9. Технология конструкционных электротехнических материалов: Учеб. пособие: В 2-х кн. / П.В. Горелов, Е.Ю. Кислицин, Н.А. Коваленко и др.; Под ред. В.П. Горелова, Е.В. Ивановой. 2-е изд. доп. Новосибирск, 2005. – Кн. 2. 239 с.

10. ГОСТ 7.1-2000. Библиографическая запись. Заголовок. Общие требования и правила составления. Введ. 01.07.2000. М.: Изд-во стандартов, 2001. 8 с.

11. ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. Взамен ГОСТ 7.1-84 [и др.]; Введ. 01.07.04. М.: Изд-во стандартов, 2004. 48 с.

$$U = \sum_{k=1}^n \frac{I_k}{\omega C_k} + \sum_{k=1}^n I_k R_k + \sum_{k=1}^n I_k L_k \omega$$

$$U = \sum_{k=1}^n \frac{I_k}{\omega C_k} + \sum_{k=1}^n I_k R_k + \sum_{k=1}^n I_k L_k \omega$$

$$U = \sum_{k=1}^n \frac{I_k}{\omega C_k} + \sum_{k=1}^n I_k R_k + \sum_{k=1}^n I_k L_k \omega$$

$$U = \sum_{k=1}^n \frac{I_k}{\omega C_k} + \sum_{k=1}^n I_k R_k + \sum_{k=1}^n I_k L_k \omega$$

Здесь U — напряжение в катушке;
 I_k — ток в катушке;
 R_k — активное сопротивление катушки;
 L_k — индуктивность катушки;
 C_k — емкость катушки.

$$U = \sum_{k=1}^n \frac{I_k}{\omega C_k} + \sum_{k=1}^n I_k R_k + \sum_{k=1}^n I_k L_k \omega$$

В уравнении (1) U — напряжение в катушке;
 I_k — ток в катушке;
 R_k — активное сопротивление катушки;
 L_k — индуктивность катушки;
 C_k — емкость катушки.

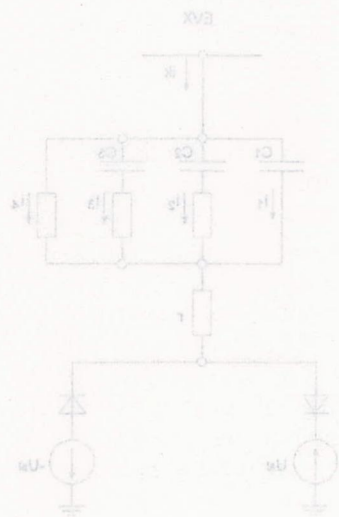
$$U = \sum_{k=1}^n \frac{I_k}{\omega C_k} + \sum_{k=1}^n I_k R_k + \sum_{k=1}^n I_k L_k \omega$$

Ток в катушке I_k — ток в катушке;
 R_k — активное сопротивление катушки;
 L_k — индуктивность катушки;
 C_k — емкость катушки.

$$U = \sum_{k=1}^n \frac{I_k}{\omega C_k} + \sum_{k=1}^n I_k R_k + \sum_{k=1}^n I_k L_k \omega$$

$$U = \sum_{k=1}^n \frac{I_k}{\omega C_k} + \sum_{k=1}^n I_k R_k + \sum_{k=1}^n I_k L_k \omega$$

В уравнении (2) U — напряжение в катушке;
 I_k — ток в катушке;
 R_k — активное сопротивление катушки;
 L_k — индуктивность катушки;
 C_k — емкость катушки.



Полученное уравнение (2) является основным для расчета реактора. Оно учитывает активное сопротивление катушки, индуктивность катушки и емкость катушки.