

# Защитные антирезонансные дроссели

## низковольтных батарей конденсаторов

Структуру современного электропотребления во многом определяет интенсивное внедрение силового электротехнологического оборудования на базе дискретно коммутируемых ключевых вентиляльных элементов (различного вида преобразователи, классифицируемые в электротехнике термином «нелинейные электроприемники»). Как известно [1], при превышении нелинейными электроприемниками 15...20% части суммарной мощности нагрузки, генерируемые ими гармонические искажения напряжения распределительной сети вызывают дополнительные потери электроэнергии в проводниках, магнитных системах трансформаторов и электродвигателей, вынуждающие, во избежание тепловой перегрузки, снижать их номинальную производительность. Кроме того, в низковольтных распределительных сетях энергосистем отмечены случаи, когда при подключении конденсаторных батарей (КБ) компенсации реактивной мощности (КРМ) на одной из частот присутствующего спектра гармоник (обычно между 250 и 600 Гц [2]) емкость КБ образовывала резонансный контур с индуктивностью сети. Для косинусных конденсаторов ГОСТ 1282-88 «Конденсаторы для повышения коэффициента мощности. Общие технические условия» допускает совокупное увеличение номинального тока —  $I_{НОМ}$  не более чем на 30%, как от превышения номинального напряжения —  $U_{НОМ}$ , так и от наличия высших гармоник, поэтому из-за возможных значительных токовых перегрузок использование в таких сетях КБ без соответствующей схемной защиты недопустимо.

Сергей Шишкин, к.т.н.

shishkin53@mail.ru

Порядковый номер кратной по отношению к промышленной частоте ( $f_1 = 50$  Гц) резонансной гармоники —  $n$ , определяется по выражению [3]:

$$v_p = \sqrt{\frac{S_{КЗ}}{Q_{КБ}}}, \quad (1)$$

где  $S_{КЗ}$  — мощность короткого замыкания сети в месте установки КБ с реактивной мощностью (РМ) —  $Q_{КБ}$ . Для наиболее часто встречающегося варианта централизованного присоединения батарей КРМ низковольтных сетей (до 1 кВ) непосредственно на сборные шины ТП  $v_p$  (1) можно рассчитать через номинальную мощность —  $S_{НОМ}$  и напряжение короткого замыкания —  $u_k$  (%) силового трансформатора [2]:

$$v_p = \sqrt{\frac{S_{НОМ} \times 100\%}{Q_{КБ} \times u_k}}. \quad (2)$$

При ступенчатом регулировании  $Q_{КБ}$  (1, 2) автоматизированных конденсаторных установок (КУ) на меняющихся частотах резонанса переключаемых КБ [2] полное сопротивление (импеданс) компенсируемой сети  $Z$  будет близким к активному (точка  $f_s$ , рис. 1). Обусловленный резонансом 5-6-кратный рост амплитуды тока гармоник (в пер-

вую очередь канонического порядка — 5-й, 7-й, 11-й, 13-й, характерного для несогласованной работы 6- и 12-пульсных схем выпрямителей низковольтных преобразователей [3]), существенно повысит коэффициент искажения синусоидальности  $THD_1$  (Total Harmonic Distortion [1]), отношение геометрической суммы токов высших гармоник действующему значению тока основной гармоники —  $I_1$ , а также протекающий в сети среднеквадратичный ток:

$$I_{RMS} = I_1 \sqrt{1 + THD_1^2}.$$

В свою очередь, снижение сопротивления конденсаторов  $x_{КБ} = 1/(\omega C)$  циркулирующим в сети токам гармоник  $v_n$  и частотно зависимый рост угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  увеличит собственные (внутренние) потери, определяющие температуру их активной части. Например, для конденсаторов серии PhaseCap® [4], имеющих, в соответствии с IEC 60831-1 «LV-PFC Capacitor Standard», температурный класс D [4, 5], разность температур наиболее нагретой точки (hot spot) обмотки  $T_{th}$  и окружающей среды (ambient)  $dT_{th-a}$  (К) составит:

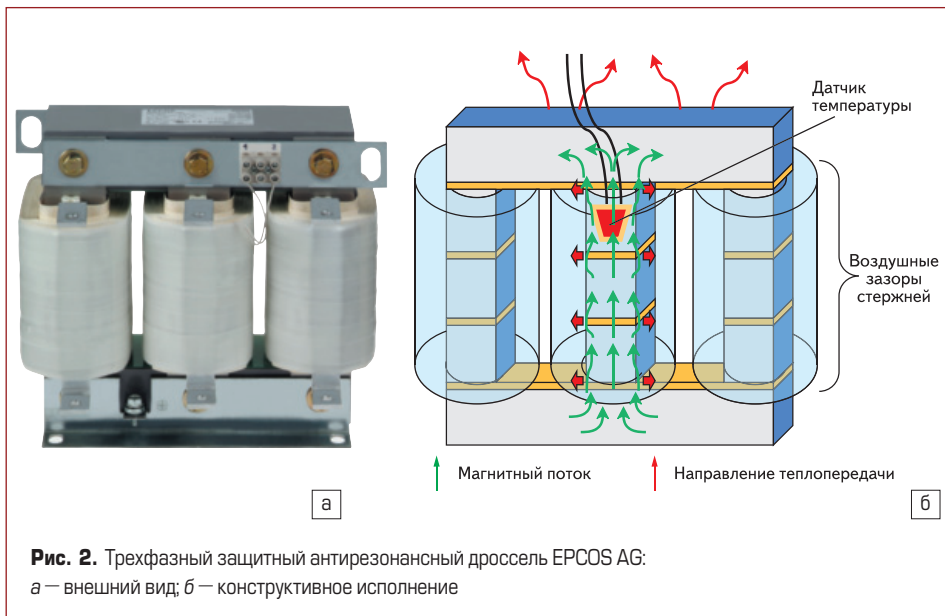
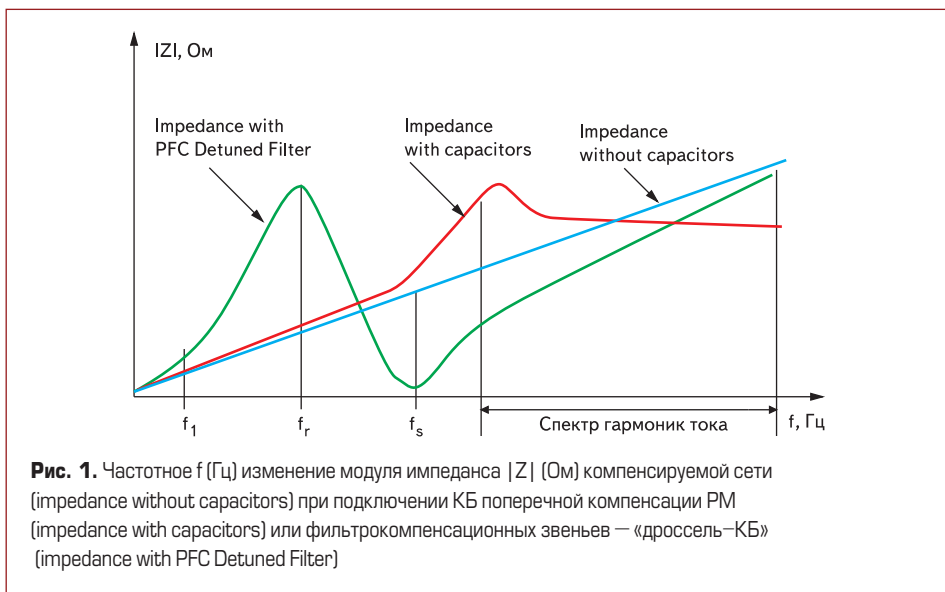
$$dT_{th-a} = 0,45 \times R_{th} \times Q, \quad (3)$$

где 0,45 (Вт/квар) — каталожная величина удельных внутренних потерь [4];  $R_{th}$  (2...3 К/Вт [5]) — тепло-

**Таблица.** Основные технические данные трехфазных антирезонансных фильтрующих дросселей EPCOS AG [4], стандарты EN 60289, EN 61558, VDE 0532

Параметр	Значение
Номинальная частота, $f$ , Гц	50/60
Номинальное напряжение, $U_{НОМ}$ , В	400, 440, 480
Номинальная мощность, квар	от 10 до 100
Коэффициенты частотной расстройки, $p$ , %	14; 7; 5,67
Номинальный среднеквадратичный ток, $I_{RMS}$ (при $f = 50$ Гц), А	15,4...154 ( $p = 14\%$ ), 16,4...164,2 ( $p = 7\%$ ), 18,5...183,8 ( $p = 5,67\%$ )
Ток основной гармоники	$I_1 = 1,06 \cdot I_{НОМ}$ (ток КБ с частотой 50/60 Гц)
Максимальный ток термической перегрузки	$I_{th} = 1,05 \cdot I_{RMS}$
Нагрузка высшими гармониками при 100% продолжительности включения*	$U_3 = 0,5\% U_{НОМ}$ $U_{11} = 3,5\% U_{НОМ}$ $U_5 = 6,0\% U_{НОМ}$ $U_{13} = 3,0\% U_{НОМ}$ $U_7 = 5,0\% U_{НОМ}$
Номинальная индуктивность, $L_{НОМ}$ , мГн	8,23...0,829 ( $p = 14\%$ ), 3,83...0,383 ( $p = 7\%$ ), 3,06...0,306 ( $p = 5,67\%$ )
Линейность	$L \geq 0,95 L_{НОМ}$ при токе до $2,08 \cdot I_1$ ( $p = 5,67\%$ ), $1,73 \cdot I_1$ ( $p = 7\%$ ), $1,4 \cdot I_1$ ( $p = 14\%$ )
Максимальные потери в дросселе при допустимом превышении $U_{НОМ}$ и $I_{RMS}$ , $P_V$ , Вт	87...450 ( $p = 14\%$ ), 73...370 ( $p = 7\%$ ), 64...390 ( $p = 5,67\%$ )
Класс, степень защиты	I, IP00
Допустимая среднесуточная температура окружающей среды, °С	+40
Охлаждение	Естественное, с защитой от превышения температуры
Масса, кг	от 5,9 до 62

\*Согласно DIN ENV VV6 1000-2-2.



вое сопротивление;  $Q$  (квар) — РМ конденсатора. Повышение  $T_{th}$  МКК (Metallized Kunststoff Kompakt [4])-конденсаторов более 70 °С [5] способствует ускоренной деградации полимерной пленки диэлектрика. Принято считать, что длительное превышение  $T_{th}$  на 7 °С вдвое сократит нормативный срок службы (рабочий ресурс) конденсатора [6].

Последовательное включение с КБ специального дросселя (реакторного фильтра) позволяет обеспечить защиту конденсаторов и избежать появления резонанса за счет смещения собственной частоты  $f_r$  контура «дроссель-КБ» (рис. 1) ниже диапазона частот наиболее мощных присутствующих в сети гармоник (спектр гармоник тока — рис. 1). Вносимый дросселем коэффициент частотной расстройки  $p$ , образованный с КБ последовательного резонансного контура, равен [4]:

$$p = (f_1/f_r)^2 \times 100\%, \quad (4)$$

а его принятые VDEW (Association of German Power Supply Companies) стандартные величины — 14, 7, 5,67% (см. табл.) соответствуют резонансным частотам — 135, 189, 210 Гц. Причем в отличие от антирезонансной защитной функции, реализуемой с помощью аварийного отключения части  $Q_{КБ}$  (1) КУ регулятором РМ (например, BR6000 [4]), опосредованной тождественным снижением коэффициента мощности системы электроснабжения (режим «недокомпенсации»), оборудованные дросселями КБ способны поддерживать требуемый уровень КРМ.

Поскольку правильно выбранное значение  $f_r$  (4) расположено ниже частоты наименьшей гармоники  $\nu_{min}$ , для присутствующей в сети гармоники тока с частотой выше резонансной индуктивный характер  $Z$  исключает возможность резонанса на этих частотах, а на основной частоте  $f_1$  расстроенная система будет функционировать как емкостная, обеспечивая КРМ нагрузки (рис. 1). Так как приложенное к КБ напряжение  $U_{КБ}$  складывается из напряжения сети  $U_C$  и падения напряжения на дросселе  $U_L$ :

$$U_{КБ} = U_C + U_L = U_C / (1 - p), \quad (5)$$

то в зависимости от значения  $p$  (5)  $U_{НОМ}$  соединенных «треугольником» низковольтных конденсаторов батареи необходимо увеличить на 10...20% относительно  $U_C$ , а индуктивный характер РМ дросселя уравновесить коррекцией  $U_{КБ}$  (5) и емкости КБ, увеличивающих на 10...24% РМ специально подобранных (нестандартных) конденсаторов [4].

Сухие трехфазные защитные антирезонансные дроссели компании EPCOS AG (рис. 2а, таблица) собираются на стыковом магнитопроводе из холоднокатаных, толщиной 0,25–0,5 мм, листов электротехнической стали с ориентированной зернистой структурой. Воздушные зазоры стержней магнитопровода (рис. 2б) за счет постоянства магнитного сопротивления обеспечивают линейность нагрузочной характеристики (кривой индуктивности) дросселя, ограниченной максимальным значением тока  $I_1$ , при котором снижение индуктивности  $L$  не превы-

сит 5%  $L_{НОМ}$  (табл.), и одновременно являются вентиляционными каналами отвода тепла. Цилиндрические обмотки выполнены алюминиевым или медным проводом с классом изоляции В (130 °С) для дросселей небольшой (до 20 квар включительно) РМ и Н (180 °С) — для больших типоразмеров. Расположенный внутри средней обмотки (рис. 26) температурный датчик (биметаллическое тепловое реле) своим нормально замкнутым контактом [4] отключает дроссель в случае превышения температуры, отвечающей классу изоляции.

Искажение, вносимое каждой из гармоник, определяет процентное соотношение их амплитуд и сигнала основной частоты. Степень подавления рассогласованным LC-звеном мощности отдельно взятой гармоники зависит от ее близости к  $f_r$  (рис. 1), а снижение в сети синусоидальности напряжения, регламентируемое ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения», практически находится в пределах 1...3 дБ. Отметим, что при значительной (свыше 50% [1]) нелинейной нагрузке требуемая ( $\geq 10$ ) степень фильтрации гармоник и КРМ возможна только с помощью пассивных резонансных LC-цепей (passive tuned filter circuits) или системы активной фильтрации (active restoring system) — управляемого источника тока, в противофазе генерирующего гармоники, эквивалентные по частоте и мощности присутствующим в сети.

Суммарные потери звена «дроссель-КБ»  $\Delta P$  рассчитывают как [3]:

$$\Delta P = Q_{КБ} \times a_n^2 \left( \operatorname{tg} \delta + \frac{r_{dp}}{n \times x_{dp} \times V_{\min}} \right), \quad (6)$$

где  $r_{dp}$  и  $x_{dp}$  — активное и индуктивное сопротивление дросселя;

$$n = \frac{x_{КБ}}{x_{dp} \times V_{\min}^2};$$

$$a_n = \frac{n \times V_{\min}}{n \times V_{\min}^2 - 1}.$$

Из формулы (6) видно, что основная часть потерь приходится на дроссель. Соответственно их допустимая тепловая нагрузка на порядок выше, чем у конденсаторов эквивалентной РМ [4]. В результате температура поверхности магнитопровода дросселя может достигать 260 °С, в то время как нагрев корпуса конденсаторов PhaseCap® не должен превышать 55 °С [4, 5].



**Рис. 3.** Пример расположения компонентов фильтрокомпенсирующих звеньев КУ:  
1 — регулятор РМ; 2 — вентилятор;  
3 — защитные дроссели; 4 — КБ PhaseCap

Это необходимо учитывать при компоновке модулей расстроенных систем (detuned systems): дроссели монтируются сверху КБ, а поток охлаждающего воздуха принудительной вентиляции не перекрывается элементами конструкции КУ (рис. 3).

Наряду с защитой КБ, предотвращением резонансных явлений и частичным подавлением гармоник индуктивность дросселей сглаживает броски пускового тока КБ. Отметим, что, хотя IEC 60831 ограничивает число включений косинусных конденсаторов до 5000 в год, при коммутации расстроенных ступеней КУ за год было зафиксировано более 150 000 операций переключения, не ухудшивших технические параметры КБ PhaseCap® [6]. Многолетний зарубежный опыт эксплуатации показал высокую эффективность применения в установках КРМ низковольтных сетей электроснабжения частотно-расстроенных звеньев «дроссель-КБ». Сегодня доля таких установок в системах промышленного электроснабжения Центральной Европы составляет около 90% [6].

### Литература

1. Catalog Low-Voltage Capacitors and Power Factor Correction Units MODLCON. <http://www.modl.de>.
2. Fassbinder S. Capacitors in Harmonic-Rich Environments. Power Quality Application Guide 3.1.2, 2004. <http://www.lpqi.org>.
3. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергия, 1974.
4. Power Factor Correction. Power Quality Solutions. Published by EPCOS AG. Ordering No. EPC: 26017-7600. Germany, 2006.
5. Vetter H. More Power with PhaseCap. <http://www.epcos.com/pfc>.
6. Muller R. Optimized Design of PFC Systems. <http://www.epcos.com/pfc>.