

Разряд конденсаторных батарей

установок компенсации реактивной мощности

При отключении конденсаторной установки от компенсируемой сети в ней остается электрический заряд, напряжение которого примерно равно напряжению сети в момент отключения. Поскольку естественный саморазряд отключенных конденсаторных батарей (КБ) — группы электрически соединенных косинусных конденсаторов (КК) — происходит медленно, для быстрого снижения напряжения, согласно ПУЭ (гл. 5.6.13), в качестве разрядных устройств могут применяться активные или активно-индуктивные сопротивления, подключаемые параллельно выводам КК.

Сергей Шишкин,
к. т. н.

shishkin53@mail.ru

Перед каждым повторным включением КБ необходимо разрядить ниже 10% ее номинального значения напряжения. Данное требование во многом регламентирует величину интервала переключения ступеней автоматизированных конденсаторных установок (АКУ) компенсации реактивной мощности. В то же время разряд до напряжения ≤ 75 В для КК на номинальное напряжение — $U_{ном.}$ — ниже 660 В должен продолжаться не более 180 с (стандарт IEC 831), а для КК с $U_{ном.} \geq 660$ В не превышать 10 мин (стандарт IEC 871).

Как известно, суммарная величина активного разрядного сопротивления R (Ом), определяется по формуле [1]:

$$R \leq 15 \times (U_{\phi} / Q_{КБ}) \times 10^6, \quad (1)$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение сети (кВ), а $Q_{КБ}$ — номинальная мощность КБ (квар). Соответственно время разряда одно- или трехфазного КК — t от $U_{ном.}$ до максимально допустимого напряжения разряда — $U_{раз.}$ — составит [2]:

$$t = R \times C \times \ln \frac{\sqrt{2} \times U_{ном.}}{U_{раз.}},$$

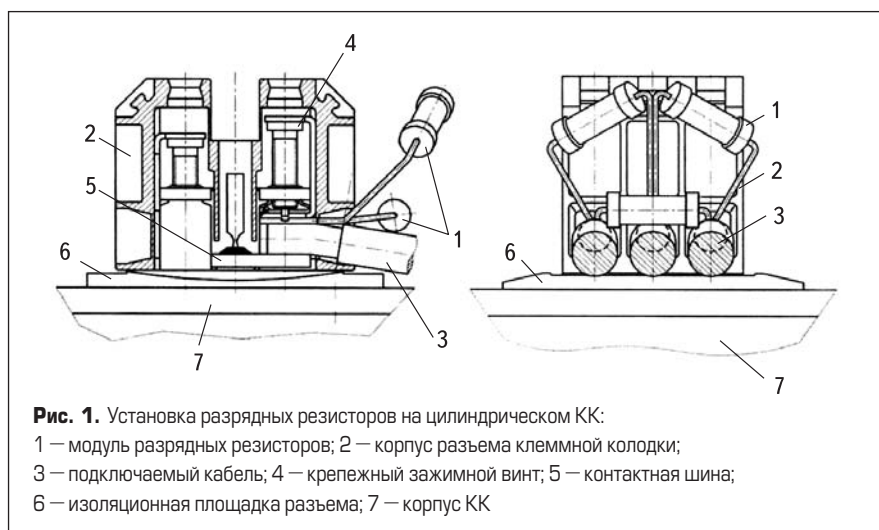


Рис. 1. Установка разрядных резисторов на цилиндрическом КК:

1 — модуль разрядных резисторов; 2 — корпус разъема клеммной колодки; 3 — подключаемый кабель; 4 — крепежный зажимной винт; 5 — контактная шина; 6 — изоляционная площадка разъема; 7 — корпус КК

где C — емкость одной фазы трехфазного КК и

$$t = R \times C \times \ln \frac{\sqrt{2} \times U_{ном.}}{1,5 \times U_{раз.}},$$

где C — общая емкость однофазного КК.

Разряд КБ должен производиться автоматически после каждого отключения от сети. Поэтому к КК постоянно и непосредственно (без промежуточных разъединителей и предохранителей) присоединяются специальные разрядные устройства (кроме случая подключения индивидуальной КБ компенсации реактивной мощности трансформатора или электродвигателя через общий выключатель, поскольку при данных условиях разряд конденсаторов происходит через обмотки этих электроприемников).

Композиционно разрядные сопротивления КК могут:

- монтироваться снаружи между зажимами (рис. 1) — степень защиты IP00 [3];
- встраиваться в монтажный разъем выводов (рис. 2) — степень защиты IP20 (стандарт VDE0106, часть 100), что обеспечивает возможность заводского монтажа разрядного модуля и надежность подключения соединительного кабеля [4];
- устанавливаться непосредственно в объеме корпуса — внутри верхней части стального бака (рис. 3) — и подсоединяться (иногда последовательной цепочкой) параллельно выводам, что особенно характерно для высоковольтных КК (3–10 кВ) ввиду отсутствия малогабаритных резисторов, рассчитанных на высокое напряжение. Это исключает необходимость использования для разряда высоковольтных КБ обмоток трансформаторов напряжения или разрядных реакторов. Компонировка встроенными в корпус разрядными резисторами применяется и для низковольтных КК, например типа КЭК производства ОАО СКЗ «КВАР».

У данного способа установки разрядных резисторов есть свои недостатки. Во-первых, выделение резисторами тепла внутрь корпуса, что ухудшает температурный режим активной части конденсатора. А во-вторых, невозможность измерения сопротивления изоляции между его выводами, предусмотренную

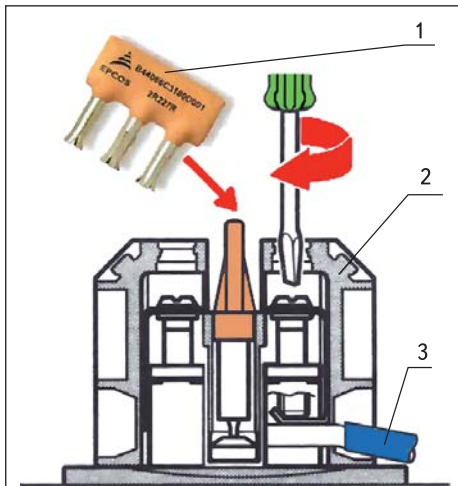


Рис. 2. 1 — съемный разрядный резисторный модуль; 2 — разрез корпуса разъема SIGUT с установленным разрядным резисторным модулем; 3 — подключаемый кабель

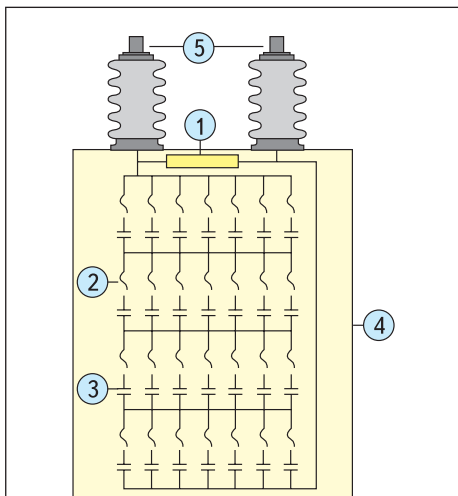


Рис. 3. Разрез высоковольтного КК типа All-film: 1 — разрядное сопротивление; 2 — внутренние предохранители; 3 — емкостные пакеты активной части; 4 — корпус; 5 — выводы

Таблица 1. Основные технические параметры модулей разрядных сопротивлений ELECTRONICON Kondensatoren GmbH

Тип КК, соединение разрядных сопротивлений	Сопротивление, R, Ом	Максимальное значение напряжения КК, U _{макс.} , В
Однофазные	180	600
	300	750
Трехфазные, схема соединения «открытый треугольник»	2×120	480
	2×180	600
	2×200	630
	2×300	750
Трехфазные, схема соединения «треугольник»	3×82	400
	3×120	480
	3×180	600
	2×300	760
При параллельном соединении КК общей мощностью > 40 квар	3×68	440
	3×82	480
	3×100	530
	3×120	600
	3×180	720

Таблица 2. Резисторы для быстрого разряда КК компании Lovato electric

Мощность КБ, квар	Напряжение 220/230 В		Напряжение 380/500 В	
	Сопротивление, Ом	Мощность рассеяния, Вт	Сопротивление, Ом	Мощность рассеяния, Вт
2,5–5	3900	12	8200	12
10–15	1800	25	4300	25
20–50	1000	50	2200	50

Таблица 3. Сдвоенные резисторы для быстрого разряда КК компании CIRCUTOR

Мощность КБ, квар	Тип	Сопротивление, Ом	Мощность рассеяния, Вт
5–25	RD-25	2×1500	20
40–60	RD-60	2×1000	20
60–100	RD-100	2×1000	37,5

нормами испытаний КК (ПУЭ, гл. 1.8.27). Это особенно важно для контроля состояния изоляции металлопленочных КК, обладающих свойством «самовосстановления», так как при частичных пробоях и последующем восстановлении электрической прочности диэлектрика [5], из-за выделения свободного углерода, содержащегося в полимерной пленке, сопротивление изоляции конденсатора постепенно снижается.

Схемные соединения разрядных сопротивлений R трехфазных КК выполняются «треугольником», «открытым треугольником» и реже «звездой». Наиболее надежным для КБ до 1 кВ следует считать соединение «треугольником», поскольку в случае обрыва сопротивления одной из фаз разряд будет происходить по схеме «открытого треугольника» во всех трех фазах конденсатора [1]. Многие изготовители [2, 3] комплектуют низковольтные КК модулями разрядных резисторов (табл. 1), адаптированными к типоразмерам конденсаторов.

Хотя, учитывая величину сопротивления (1), мощность рассеяния модулей резисторов для низковольтных (до 1 кВ) КК, при Q_{ном.} = 5–100 квар, составляет 2–8 Вт, потери в них активной энергии и высокая температура нагрева (до 200 °С при разряде) снижает удельные энергетические характеристики АКУ. Фактически наличие разрядных резисторов примерно вдвое увеличивает собственные удельные (Вт/квар) потери современных низковольтных металлопленочных КК [2, 3].

С помощью подключения добавочными контактными блоками электромеханических конденсаторных контакторов [6], дополнительных разрядных резисторов параллельно стационарно установленному на КБ разрядному модулю, можно сократить время ее разряда и соответственно снизить интервал переклЮчения ступеней регулирования АКУ. В таблицах 2 и 3 приводятся номинальные данные дополнительных разрядных резисторов для уменьшения времени разряда КБ приблизительно до 2 с [9].

С этой же целью в ступенях КБ, управляемых электромеханическими контакторами, допускается применение специальных разрядных дросселей [2, 3]. Потери в разрядных дросселях (табл. 4–6) значительно ниже, чем в резисторах (табл. 1), из-за большого (в основном индуктивного импеданса) внутреннего сопротивления Z переменному току при их

подключении к компенсируемой сети, но при отключении ступеней АКУ разряд КК будет происходить по цепи постоянного тока через небольшое активное сопротивление обмоток дросселя (табл. 4–6). Таким образом, значительно снизится время разряда t ступеней КБ до требуемого значения Ураз.

В общем случае разряда напряжение на конденсаторе емкостью C (Ф) изменяется от его зарядного значения, равного напряжению сети U_c (В), до допустимого уровня U_{раз.}, согласно соотношению [7]:

$$U_c = U_{раз.} \times e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

где $\tau = R \times C$ — постоянная времени контура разряда КБ, с.

Из выражения (2) значение t составит:

$$t = \tau \times \ln(U_{раз.}/U_c) = t \times (\ln U_{раз.} - \ln U_c). \quad (3)$$

Сопоставим время разряда t (3) одинаковой по мощности КБ при использовании разрядного дросселя с двумя V-образными обмотками и модуля разрядных резисторов. Как указано выше, повторное включение ступени КБ возможно не ранее времени (3) ее разряда

Таблица 4. Основные технические параметры разрядного дросселя типа 40E.001–69000 производства ELECTRONICON Kondensatoren GmbH

Параметр	Номинальное значение
Номинальное напряжение, U _{ном.}	230–690 В
Номинальная частота, f	50/60 Гц
Сопротивление постоянному току, R	4900 Ом
Время разряда (≤50 В)	при напряжении 230 В: до 25 квар < 10 с, до 50 квар < 20 с, до 100 квар < 40 с; при напряжении 400 В: до 25 квар < 5 с, до 50 квар < 10 с, до 100 квар < 20 с; при напряжении 525 В: до 25 квар < 3 с, до 50 квар < 6 с, до 100 квар < 12 с; при напряжении 690 В: до 25 квар < 2 с, до 50 квар < 4 с, до 100 квар < 8 с.
Собственные потери, ΔP	< 1 Вт
Разрядный ток	при напряжении 230 В < 1,7 мА при напряжении 440 В < 3,3 мА при напряжении 525 В < 4,8 мА при напряжении 690 В < 9 мА
Допустимое число разрядов (при температуре 40 °С)	4/мин при Q _{кб} = 12,5 квар 3/мин при Q _{кб} = 25 квар 2/мин при Q _{кб} = 50 квар 1/мин при Q _{кб} = 100 квар
Степень защиты	IP20
Класс изоляции	B (соответствует VDE 0532)
Рабочая температура	–25...+55 °С (средняя за 24 часа)
Температура окружающей среды	макс. + 40 °С
Охлаждение	естественное
Размеры	36×60×90 мм
Масса	0,38 кг

Таблица 5. Основные технические параметры разрядного дросселя 40E.003-60002 производства ELECTRONICON Kondensatoren GmbH

Параметр	Номинальное значение
Номинальное напряжение, $U_{ном}$	230–600 В
Номинальная частота, f	50/60 Гц
Сопротивление постоянному току, R	7600 Ом
Время разряда (≤ 50 В)	при напряжении 230 В: до 12,5 квар < 12 с, до 25 квар < 24 с; при напряжении 400 В: до 12,5 квар < 5 с, до 25 квар < 10 с, до 30 квар < 12 с, до 50 квар < 20 с; при напряжении 440 В: до 12,5 квар < 4 с, до 25 квар < 9 с, до 30 квар < 10 с, до 50 квар < 17 с; при напряжении 480 В: до 12,5 квар < 4 с, до 25 квар < 8 с, до 30 квар < 9 с, до 50 квар < 15 с; при напряжении 525 В: до 12,5 квар < 4 с, до 25 квар < 7 с, до 30 квар < 8 с, до 50 квар < 14 с; при напряжении 600 В: до 12,5 квар < 2,6 с, до 25 квар < 5 с, до 30 квар < 6 с, до 50 квар < 10,5 с.
Собственные потери, ΔP	< 1 Вт
Разрядный ток	при напряжении 230 В < 1,8 мА при напряжении 400 В < 3,2 мА при напряжении 525 В < 4,9 мА при напряжении 600 В < 6,8 мА
Допустимое число разрядов (при температуре 40 °С)	5/мин при $Q_{кв} = 12,5$ квар 4/мин при $Q_{кв} = 25$ квар 3/мин при $Q_{кв} = 30$ квар 2/мин при $Q_{кв} = 50$ квар
Степень защиты	IP20
Класс изоляции	В (соответствует VDE 0532)
Рабочая температура	-25...+55 °С (средняя за 24 часа)
Температура окружающей среды	макс. + 40 °С
Охлаждение	естественное
Размеры	58×49×39 мм
Масса	0,29 кг

Таблица 6. Основные технические параметры разрядного дросселя B44066E9900S001 производства EPCOS AG

Параметр	Номинальное значение
Номинальное напряжение, $U_{ном}$	230–525 В
Номинальная частота, f	50/60 Гц
Сопротивление постоянному току, R	4900 Ом
Время разряда	при напряжении 230 В: до 25 квар < 10 с, до 50 квар < 20 с, до 100 квар < 40 с; при напряжении 400–525 В: до 25 квар < 5 с, до 50 квар < 10 с, до 100 квар < 20 с.
Индуктивность, L	при напряжении 230 В 730 Гн при напряжении 400 В 710 Гн при напряжении 525 В 670 Гн
Собственные потери, ΔP	< 1,8 Вт
Разрядный ток	< 4,5 мА
Допустимое число разрядов	4/мин при $Q_{кв} = 12,5$ квар 3/мин при $Q_{кв} = 25$ квар 2/мин при $Q_{кв} = 50$ квар 1/мин при $Q_{кв} = 100$ квар
Класс изоляции обмоток	T 40/В
Рабочая температура	-25...+55 °С (средняя за 24 часа)
Охлаждение	естественное
Размеры	90×45×59 мм
Масса	0,5 кг



Рис. 4. Внешний вид разрядного дросселя B44066E9900S001 производства EPCOS AG

ниже 10% $U_{ном}$. Таким образом, на разряд резисторным модулем при 8-кратном снижении напряжения на КК мощностью 25 квар (3×166 мкФ) с резисторным модулем 3×82 кОм (табл. 1) от 400 до 50 В потребуются 33 с; с модулем 3×120 кОм (табл. 1) — 50 с [8], что в 6,5–10 раз выше, чем у разрядных дросселей (табл. 4, 6), и в 3,3–5 раз выше, нежели у разрядного дросселя (табл. 5). При разряде КБ (3×332 мкФ) из двух параллельно соединенных КК по 25 квар, резисторный модуль 3×68 кОм (табл. 1) обеспечит ее разряд до 50 В за 55 с [8]. Следовательно, подключение к аналогичной по мощности КБ вместо резисторного модуля 3×68 кОм разрядного дросселя (табл. 4–6) позволит за равные промежутки времени в 2–5 раз увеличить допустимое количество разрядов КБ, тем самым значительно повысив быстродействие АКУ [1]. Кроме того, собственные активные потери электроэнергии в разрядном дросселе примерно в 3 раза ниже потерь в резисторных модулях (табл. 1), что, например, при годовом числе часов максимума нагрузки предприятия, равном 5000, соответствующему времени наибольшей загрузки АКУ мощностью 400 квар, эквивалентно экономии ≈ 20 –25 кВт·ч.

Конструктивно разрядные дроссели (рис. 4) имеют литой, ударопрочный, пластиковый корпус, винтовые зажимы (U, V, W), допускающие верхнее или нижнее присоединение проводников сечением от 0,75 до 2,5 мм², связанных с клеммами конденсаторов, и лапки для крепления на стандартной профильной шине TS 35 в соответствии с EN 50022. Разрядные дроссели (типа 40E.003-60002) монтируются непосредственно на выводы цилиндрического КК мощностью 5–50 квар (рис. 5) без дополнительных соединительных проводов.

При коммутации КБ тиристорными контакторами различной модификации [2, 3, 10] разрядные дроссели применять нельзя, так как это приведет к короткому замыканию силовых электронных ключей по цепи постоянного тока. Поскольку в контакторах с электронными ключами отключение КБ происходит при переходе протекающего через них фазного тока через нулевое значение, разрядные сопротивления могут не устанавливаться [10]. В конденсаторных тиристорных контакторах с двумя электронными ключами типа TSM-C, TSM-LC [3] для разряда соединенных «треугольником» КК компания EPCOS AG рекомендует использо-

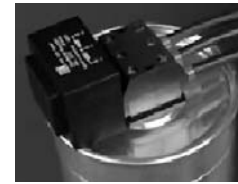


Рис. 5. Разрядный дроссель 40E.003-60002 «ELECTRONICON Kondensatoren GmbH», установленный на выводах цилиндрического КК



Рис. 6. Резистор EW-22 производства EPCOS AG для разряда КБ, управляемых тиристорными контакторами, установленный на монтажной панели

вать специальный высоковольтный резистор марки EW-22 (1200 В/100 Вт, рис. 6).

В целом рациональный выбор способа разряда КБ помогает оптимизировать технологические показатели работы и безопасной эксплуатации установок компенсации реактивной мощности.

Литература

1. Шишкин С. А. Разрядные дроссели конденсаторных батарей // Электрика. 2003. № 5.
2. Конденсаторы, дроссели, автоматические регуляторы для компенсации реактивной мощности. ELECTRONICON Kondensatoren GmbH Gera. Germany. 2003.
3. Power Factor Correction. Product Profile 2005. Published by EPCOS AG. Ordering No EPC: 26013-7600. Germany.
4. Easy-to-mount discharge resistor module // EPCOS COMPONENTS. 2005. № 1.
5. Шишкин С. А. Обеспечение функции самовосстановления силовых металлопленочных конденсаторов // Силовая электроника. 2005. № 4.
6. Шишкин С. А. Электромеханические контакторы для коммутации низковольтных конденсаторных батарей // Силовая электроника. 2005. № 1.
7. Кучинский Г. С., Назаров Н. И. Силовые электрические конденсаторы. М.: Энергоатомиздат. 1992.
8. Capacitors and reactors for power factor correction. // <http://electronicon.com>
9. Lovato electric. Компоненты для автоматизации в промышленности. Общий каталог 2003–2004. Italy. 2004.
10. CIRCUTOR. Power Factor Correction and harmonic filtering. General Catalogue 2002–2003. Cod.: 8012943120. Printed in Spain.