



Низковольтное оборудование

Коррекция коэффициента мощности и фильтрация гармоник в электроустановках

Серия инженера-конструктора

Power and productivity
for a better world™



Коррекция коэффициента мощности и фильтрация гармоник в электроустановках

Содержание

Введение	2	8 Гармонические искажения в электроустановках	
1 Общие сведения о коррекции коэффициента мощности	3	8.1 Гармоники.....	20
2 Технические преимущества коррекции коэффициента мощности	4	8.2 Предписания стандартов	21
2.1 Повышение эффективности использования электрических машин.....	5	8.3 Действие гармоник.....	21
2.2 Повышение эффективности использования электрических линий.....	5	8.3.1 Перегрузки.....	21
2.3 Снижение потерь.....	6	8.3.2 Явление резонанса.....	22
2.4 Снижение падения напряжения.....	6	8.4 Фильтры гармоник	23
3 Экономические преимущества коррекции коэффициента мощности	7	9 Коммутация и защита конденсаторных батарей	
4 Устройства компенсации реактивной мощности		9.1 Электрические явления при коммутации.....	25
4.1 Синхронные генераторы.....	8	9.2 Коммутация и защита.....	26
4.2 Синхронные компенсаторы.....	8	9.2.1 Выбор защитного устройства	26
4.3 Статические компенсаторы реактивной мощности	8	9.2.2 Выбор коммутирующего устройства (контактора).....	26
4.4 Конденсаторные батареи	9	9.2.3 Выбор конденсатора.....	27
5 Виды коррекции коэффициента мощности		9.2.4 Разряд конденсаторов.....	28
5.1 Индивидуальная коррекция	10	10 Аппаратура АББ	
5.2 Групповая коррекция	11	10.1 Автоматические выключатели.....	30
5.3 Централизованная коррекция.....	11	10.1.1 Автоматические выключатели в литом корпусе.....	30
5.4 Комбинированная коррекция.....	11	10.1.2 Воздушные автоматические выключатели	32
5.5 Автоматическая коррекция	11	10.2 Контакторы	33
6 Расчет коэффициента мощности	12	10.2.1 Контакторы UA...RA.....	33
7 Расчет требуемой реактивной мощности	13	10.2.2 Контакторы UA	34
7.1 Коррекция коэффициента мощности трехфазных электродвигателей.....	14	10.2.3 Контакторы A и AF.....	34
7.2 Коррекция коэффициента мощности трехфазных трансформаторов	17	10.3 Автоматические установки компенсации реактивной мощности.....	35
		10.4 Фильтры PQF	37
		Приложение А:	
		таблицы подбора автоматических выключателей и контакторов	42
		Приложение В:	
		реактивная мощность при изменении напряжения	45
		Приложение С:	
		фильтрация и коррекция коэффициента мощности в установившихся условиях искажения синусоидальности	46
		Приложение D:	
		напряжения и токи при включении и разряде конденсаторов	51
		Приложение E:	
		коррекция коэффициента мощности на установках с фотоэлектрическим генератором	53
		Приложение F:	
		гармоники в четырехпроводной трехфазной системе.....	54
		Глоссарий	56

Введение

Электрические нагрузки потребляют из сети активную электроэнергию для выполнения определенной работы (компьютеры, принтеры, диагностическое оборудование и т. д.) или для преобразования электрической энергии в другие виды энергии (осветительные или нагревательные приборы и т. п.) либо в механическое движение (электродвигатели и т. п.). Для того чтобы потреблять активную энергию, многим нагрузкам необходимо обмениваться с сетью еще и реактивной энергией. Большинство нагрузок имеют, как правило, индуктивный характер. Такой обмен, даже если он не сопровождается немедленным преобразованием энергии в иные формы, увеличивает общий поток энергии в сети, от генераторов к потребителям. Этот нежелательный процесс ограничивают путем коррекции коэффициента мощности электроустановок посредством конденсаторных батарей. Электроустановка получает необходимую для передачи полезной электрической энергии реактивную энергию не из сети, а от собственной батареи, что улучшает ее технические и экономические характеристики.

Еще одна актуальная проблема связана с широким применением потребителей постоянного тока, таких как электронные устройства или электродвигатели. Эти потребители создают в сети гармоники тока, которые искажают форму напряжения и тока на других нагрузках. Для борьбы с гармониками применяются фильтры, пассивные или активные, которые улучшают качество электроэнергии в сети и, при условии правильно выбранных параметров, вносят свой вклад в коррекцию коэффициента мощности.

Цель данной статьи – проанализировать указанные проблемы, не вдаваясь в технические детали. Для начала мы определим, что такое коррекция коэффициента мощности, а затем обсудим технико-

экономические преимущества, формы и способы такой коррекции, а также выбор аппаратов для коммутации конденсаторных батарей и фильтрации гармоник.

После такого введения мы рассмотрим оборудование АББ, применяемое для коррекции коэффициента мощности. К такому оборудованию относятся не только конденсаторы, но и устройства для их коммутации и защиты. Кроме того, мы расскажем о некоторых решениях для пассивной и активной фильтрации гармоник тока, генерируемых нелинейными нагрузками.

У данной статьи есть шесть приложений, которые позволяют:

- быстро подобрать автоматические выключатели и контакторы для коммутации и защиты конденсаторных батарей требуемой мощности;
- выяснить, как меняющееся напряжение питания сказывается на генерации реактивной мощности, и какие меры следует принять, чтобы предотвратить передачу реактивной мощности в сеть;
- рассмотреть коррекцию коэффициента мощности и фильтрацию гармоник в условиях установившейся несинусоидальности, а также связь между канонической коррекцией коэффициента мощности и снижением уровня гармоник в сети;
- получить представление о характеристиках напряжения и тока при включении и разряде конденсаторных батарей;
- рассмотреть коррекцию коэффициента мощности при использовании фотогальванических установок;
- уточнить влияние гармоник на величину тока в нулевом рабочем проводнике трехфазной системы.

1 Общие сведения о коррекции коэффициента мощности

В цепях переменного тока потребляемый ток можно представить как сумму двух составляющих:

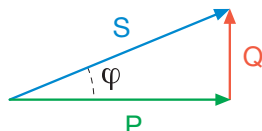
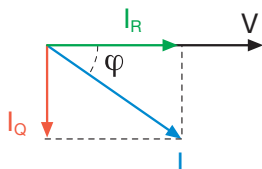
- активная составляющая, I_R , совпадает по фазе с напряжением питания, она непосредственно связана с выходной мощностью (т. е. с той частью энергии, которая преобразуется в иные виды – механическую, световую, тепловую и т. д.);
- реактивная составляющая, I_Q , сдвинута относительно напряжения на 90° , она характеризует интенсивность обмена энергией между источником и нагрузкой, обусловленного колебанием магнитных и электрических полей. Без таких колебаний невозможен, например, перенос мощности между сердечником и обмоткой трансформатора или через воздушный зазор электродвигателя.

Как правило, нагрузки имеют активно-индуктивный характер, полный ток I отстает в них от активной составляющей I_R .

Поэтому в электрических установках требуется генерировать и передавать помимо активной мощности P некоторое количество реактивной мощности Q . Эта мощность необходима для преобразования электроэнергии, но она не потребляется нагрузкой, а передается от сети к приемникам и обратно. Совокупная мощность, генерированная и переданная системой, называется полной мощностью S .

Коэффициент мощности $\cos\varphi$ – это отношение активной составляющей тока I_R к полному току I ; φ представляет собой угол сдвига фаз между напряжением и током. Для определенного фазного напряжения V он равен:

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{P}{S}$$



В таблице 1.1 представлены типичные значения коэффициента мощности для некоторых видов электрооборудования.

Таблица 1.1

Нагрузка	$\cos\varphi$ Коэффициент мощности
Трансформаторы (без нагрузки)	0.1÷0.15
Двигатели	0.7÷0.85
Оборудование для обработки металлов:	
- дуговая сварка	0.35÷0.6
- дуговая сварка с компенсацией реактивной мощности	0.7÷0.8
- контактная сварка	0.4÷0.6
- электродуговая печь	0.75÷0.9
Люминесцентные лампы	
- с компенсацией реактивной мощности	0.9
- без компенсации реактивной мощности	0.4÷0.6
Выпрямители	0.6÷0.95
Приводы постоянного тока	0.4÷0.75
Приводы переменного тока	0.95÷0.97
Активная нагрузка	1

Улучшением коэффициента мощности называют меры, предпринимаемые для повышения коэффициента мощности определенной части электроустановки. Для этого в определенной точке сети генерируется такая реактивная мощность, которая уменьшает ток, а, следовательно, и мощность, возвращаемые в источник питания. Это позволяет использовать линии электропитания, генераторы и трансформаторы, рассчитанные на меньшую полную мощность. Подробнее мы обсудим это в следующей главе.

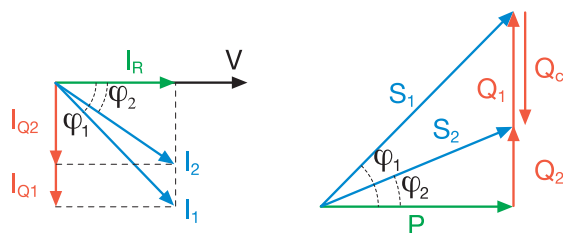
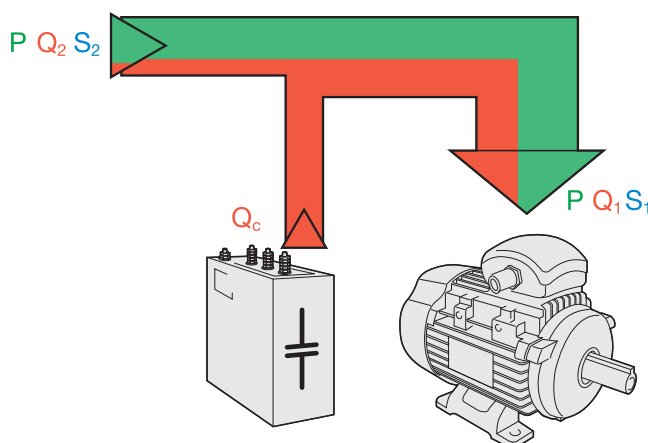
С чисто технической точки зрения электроустановка с правильно подобранными параметрами может хорошо работать и при низком коэффициенте мощности, поэтому не существует стандартов, предписывающих электроустановкам определенный коэффициент мощности. Однако повышение коэффициента мощности дает ряд технических и экономических преимуществ. Фактически, эксплуатация электроустановки с низким $\cos\varphi$ означает повышенные расходы для энергоснабжающей компании, которая, естественно, стремится ввести тарифы, делающие эксплуатацию таких электроустановок невыгодными. Законодательные меры, действующие в большинстве стран, создают такую систему тарифов, при которой за высокое потребление реактивной мощности (пороговый $\cos\varphi$ равен 0,9) приходится платить штрафы. Размер штрафов зависит от уровня напряжения (высокое, среднее, низкое) и коэффициента мощности. Потребители электроэнергии должны решать, что им выгоднее: платить штрафы или вложить средства в коррекцию коэффициента мощности.

2 Технические преимущества коррекции коэффициента мощности

Как уже отмечалось, установив в определенной точке сети нужную реактивную нагрузку, можно скорректировать коэффициент мощности, т. е. уменьшить потребляемый ток и полную потребляемую мощность без снижения мощности нагрузки. Это дает множество преимуществ, в частности, позволяет эффективнее эксплуатировать электрические машины (генераторы и трансформаторы) и линии передачи и распределения электроэнергии.

Для синусоидального напряжения реактивная мощность, необходимая для коррекции коэффициента мощности от $\cos\varphi_1$ до $\cos\varphi_2$, рассчитывается по следующей формуле (как для трехфазной, так и для однофазной системы):

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) \quad [2.1]$$



где:

- P – активная мощность;
- Q_1 и φ_1 – реактивная мощность и угол сдвига фаз до коррекции коэффициента мощности;
- Q_2 и φ_2 – реактивная мощность и угол сдвига фаз после коррекции коэффициента мощности;
- Q_c – реактивная мощность, необходимая для коррекции коэффициента мощности.

Пример

Предположим, мы хотим повысить с 0,8 до 0,93 коэффициент мощности трехфазной установки ($U_n = 400$ В), потребляемая мощность которой, в среднем, составляет 300 кВт. Потребляемый ток равен:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_1} = \frac{300 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.8} = 540 \text{ А}$$

Согласно приведенной выше формуле нам потребуется подключить реактивную нагрузку мощностью:

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) = 300 \cdot (0.75 - 0.39) = 108 \text{ квар}$$

За счет коррекции коэффициента мощности потребляемый ток снизился с 540 А до:

$$I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_2} = \frac{300 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.93} = 465 \text{ А}$$

(т. е. приблизительно на 15 %)

Итак, основными преимуществами коррекции коэффициента мощности являются:

- более эффективное использование электрических генераторов,
- более эффективное использование электрических линий,
- снижение потерь,
- снижение падения напряжения.

2.1 Повышение эффективности использования электрических машин

Номинальные характеристики генераторов и трансформаторов определяются их полной мощностью S . При одинаковой активной мощности P полная мощность тем меньше, чем меньше реактивная мощность Q . Таким образом, повысив $\cos\varphi$ электроустановки, можно вырабатывать ту же активную мощность с помощью генераторов, рассчитанных на меньшую полную мощность.

Например, в таблице 2.1 показано, как зависит мощность трехфазных трансформаторов СН/НН от $\cos\varphi$ нагрузки.

Таблица 2.1

Мощность трансформатора [кВА]	Мощность трансформатора [кВт]					
	$\cos\varphi$					
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
63	32	38	44	50	57	63
100	50	60	70	80	90	100
125	63	75	88	100	113	125
160	80	96	112	128	144	160
200	100	120	140	160	180	200
250	125	150	175	200	225	250
315	158	189	221	252	284	315
400	200	240	280	320	360	400
630	315	378	441	504	567	630
800	400	480	560	640	720	800
1000	500	600	700	800	900	1000
1250	625	750	875	1000	1125	1250

Из таблицы видно, что для питания нагрузки, имеющей общую мощность 170 кВт и $\cos\varphi = 0,7$, требуется трансформатор с номинальной мощностью 250 кВА. Если же нагрузка потребляет ту же мощность с коэффициентом $\cos\varphi = 0,9$, а не 0,7, то достаточно использовать трансформатор мощностью 200 кВА.

То же самое относится к генераторам.

2.2 Повышение эффективности использования электрических линий

Коррекция коэффициента мощности позволяет использовать провода меньшего сечения. Как уже было отмечено, увеличение коэффициента мощности при сохранении той же выходной мощности означает снижение тока. Это снижение может дать возможность применить проводники меньшего сечения.

Поясним это на примере. Пусть мощность нагрузки $P_n = 170$ кВт, $\cos\varphi = 0,7$, а напряжение $U_n = 400$ В. Тогда потребляемый ток $I_{0,7}$ равен:

$$I_{0,7} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_1} = \frac{170}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,7} = 350,5 \text{ A}$$

Если питание подается по одножильным медным кабелям с этиленпропиленовой изоляцией, проложенным в перфорированном лотке, то при стандартных условиях кабель должен иметь сечение 120 мм² (см. таблицу 2.2).

В случае индивидуальной коррекции коэффициента мощности до значения $\cos\varphi = 0,9$, ток будет равен:

$$I_{0,9} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_2} = \frac{170}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,9} = 272,6 \text{ A}$$

При таком токе кабель может иметь сечение 70 мм².

Таблица 2.2. Длительно пропускаемый ток I_0 одножильных медных кабелей, проложенных на перфорированном лотке

S [мм ²]	Cu	
	СПЭ/ЭП	ПВХ
	I_0 [A]	
25	141	114
35	176	143
50	216	174
70	279	225
95	342	275
120	400	321
150	464	372
185	533	427
240	634	507
300	736	587
400	868	689
500	998	789
630	1151	905

2.3 Снижение потерь

Потери мощности в электрическом проводнике пропорциональна сопротивлению проводника и квадрату протекающего тока. Поскольку при одинаковой передаваемой активной мощности ток тем ниже, чем выше $\cos\varphi$, увеличение коэффициента мощности означает снижение потерь в проводнике между источником питания и точкой компенсации реактивной мощности. В трехфазной системе потери выражаются следующей формулой:

$$p = 3 \cdot R \cdot I^2 = R \cdot \frac{(P^2 + Q^2)}{U_n^2} \quad [2.2]$$

поскольку

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{\sqrt{(P^2 + Q^2)}}{\sqrt{3} \cdot U_n} \rightarrow 3 \cdot I^2 = \frac{(P^2 + Q^2)}{U_n^2}$$

где:

- I – ток, протекающий через проводник;
- R – сопротивление проводника;
- S – полная мощность, потребляемая нагрузкой;
- P – активная мощность, потребляемая нагрузкой;
- Q – реактивная мощность, потребляемая нагрузкой;
- U_n – номинальное напряжение питания.

Снижение потерь Δp после коррекции коэффициента мощности выражается формулой¹:

$$\Delta p = p_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \right) \right] \quad [2.4]$$

где:

- p_1 – потери до коррекции коэффициента мощности;
- $\cos\varphi_1$ – коэффициент мощности до коррекции коэффициента мощности;
- $\cos\varphi_2$ – коэффициент мощности до коррекции коэффициента мощности.

Из формулы [2.4] следует, что если, например, увеличить коэффициент мощности с 0,7 до 0,9, сокращение потерь составит около 39,5 %. В таблице 2.3 показано, насколько сокращаются потери при увеличении коэффициента мощности от начального значения $\cos\varphi_1$ до конечного – 0,9 или 0,95.

Таблица 2.3

Таблица 2.3		cosφ ₁						
		0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95
Δp%	от cosφ ₁ to 0.9	80.2	69.1	55.6	39.5	20.9	-	-
	от cosφ ₁ to 0.95	82.3	72.3	60.1	45.7	29.1	10.2	-

Увеличение коэффициента мощности приводит к снижению потерь во всей цепи от источника питания до точки коррекции коэффициента мощности.

$$p_1 = R \cdot \frac{(P^2 + Q^2)}{U_n^2} = \frac{R}{U_n^2} \cdot S^2 = \frac{R}{U_n^2} \cdot \frac{P^2}{(\cos\varphi_1)^2} \quad p_2 = \frac{R}{U_n^2} \cdot \frac{P^2}{(\cos\varphi_2)^2}$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{R}{U_n^2} \cdot \frac{P^2}{\cos\varphi_1} - \frac{R}{U_n^2} \cdot \frac{P^2}{\cos\varphi_2} = p_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \right) \right]$$

2.4 Снижение падения напряжения

Падение линейного напряжения в трехфазной сети можно представить следующим образом:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cos\varphi + X \sin\varphi) = \frac{P}{U_n} \cdot (R + X \operatorname{tg}\varphi) \quad [2.5]$$

где:

- R и X – соответственно активное и реактивное сопротивление линии;
- P – передаваемая активная мощность;
- I – ток;
- U_n – номинальное напряжение.

При одинаковой передаваемой активной мощности падение напряжения тем меньше, чем больше коэффициент мощности². Как видно на следующих диаграммах, чем меньше φ , т. е. угол сдвига фаз между напряжением и током (при той же активной составляющей тока нагрузки и соответственно той же активной мощности), тем меньше падение фазного напряжения ΔV , причем падение напряжения достигает минимума, когда реактивная мощность не потребляется (ток синфазен напряжению)³.

Рисунок 2.1. Векторная диаграмма падения напряжения в линии без компенсации реактивной мощности

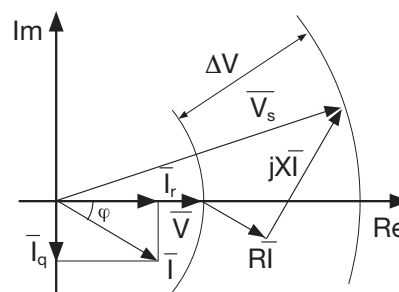
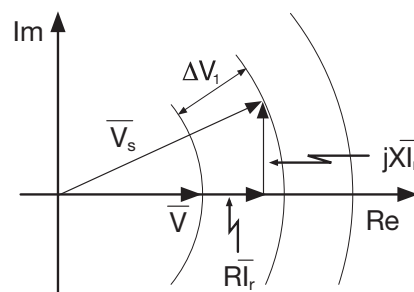


Рисунок 2.2. Векторная диаграмма падения напряжения в линии при полной коррекции коэффициента мощности, т. е. для чисто активной нагрузки



² В линиях сверхвысокого напряжения, которые проектируются так, чтобы передаваемая мощность равнялась активной мощности, изменение напряжения сведено к минимуму (к нулю, если считать, что в линии нет потерь), а потребляемая реактивная мощность, возникающая из-за прохождения тока через последовательную индуктивность, в точности равна реактивной мощности, генерируемой емкостями.

³ Падение напряжения – это, по определению, разность модулей напряжений в начале и в конце линии (как видно из векторных диаграмм). При расчете ΔV по формуле [2.5] дополнительный член приблизительно равен 1/200 от значения напряжения, так что им можно пренебречь.

3 Экономические преимущества коррекции коэффициента мощности

Электроснабжающие организации устанавливают такие системы тарифов на электроэнергию, которые предусматривают штрафы за потребление энергии со среднемесячным коэффициентом мощности ниже 0,9. Условия контрактов меняются от страны к стране и могут зависеть от типа потребителя, поэтому следующие выкладки имеют исключительно иллюстративный характер и демонстрируют принципиальную возможность экономии за счет компенсации реактивной мощности. Вообще говоря, статьи договора на поставку электроэнергии требуют платы за потребленную реактивную энергию, если коэффициент мощности лежит в диапазоне от 0,7 до 0,9, если же он выше 0,9, плата за реактивную энергию не взимается. Если $\cos\varphi < 0,7$ электроснабжающая организация может потребовать от потребителя выполнить компенсацию реактивной мощности. Нужно отметить, что среднемесячный коэффициент мощности не ниже 0,9 означает, что потребляемая реактивная энергия не превышает 50 % активной энергии. Необходимо отметить, что в данной главе рассматриваются экономические преимущества с учетом тарифной политики энергокомпаний ряда Европейских стран и не могут быть применены в условиях Российской экономики.

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P} \leq 0.5 \rightarrow \cos\varphi \geq 0.89 \quad [3.1]$$

То есть, если потребление реактивной энергии не превышает 50 % активной энергии, штрафы не налагаются. Ежегодные расходы на оплату реактивной энергии, которые приходится нести, если коэффициент мощности ниже 0,9, выражаются следующей формулой:

$$C_{EQ} = (E_Q - 0.5 \cdot E_P) \cdot c \quad [3.2]$$

где:

- C_{EQ} – годовая стоимость реактивной энергии в €;
- E_Q – годовое потребление реактивной энергии в кварч;
- E_P – годовое потребление активной энергии в кВтч;
- $E_Q - 0.5 \cdot E_P$ – количество реактивной энергии, которую требуется оплатить;
- c – цена реактивной энергии, €/кварч.

Если потребитель хочет избежать штрафов за потребление реактивной энергии и корректирует коэффициент мощности до 0,9, стоимость эксплуатации конденсаторной батареи составит:

$$C_{Qc} = C_Q \cdot c_c \quad [3.3]$$

где:

- C_{Qc} – ежегодная стоимость коррекции коэффициента мощности до 0,9, €;
- Q_c – мощность конденсаторной батареи, необходимая для коррекции $\cos\varphi$ до 0,9, квар;
- c_c – удельная стоимость установки конденсаторной батареи (из расчета на один год эксплуатации) €/квар.

Экономия составит:

$$C_{EQ} - C_{Qc} = (E_Q - 0.5 \cdot E_P) \cdot c - Q_c \cdot c_c \quad [3.4]$$

Нужно заметить, что «стоимость установки конденсаторной батареи» следует правильно распределить по годам срока службы электроустановки, используя адекватные экономические коэффициенты; на практике компенсация реактивной мощности позволяет

окупить расходы на конденсаторную батарею за первые несколько лет. Разумеется, точный анализ капиталовложений предполагает использование конкретных экономических параметров, что не входит в задачи данной статьи о техническом применении.

Пример

Компания потребляет активную и реактивную мощность согласно таблице 3.1:

Таблица 3.1

Месяц	Активная энергия, [кВтч]	Реактивная энергия, [кварч]	Среднемесячный коэф. мощности
Январь	7221	6119	0.76
Февраль	8664	5802	0.83
Март	5306	3858	0.81
Апрель	8312	6375	0.79
Май	5000	3948	0.78
Июнь	9896	8966	0.74
Июль	10800	10001	0.73
Август	9170	8910	0.72
Сентябрь	5339	4558	0.76
Октябрь	7560	6119	0.78
Ноябрь	9700	8870	0.74
Декабрь	6778	5879	0.76
Итого	93746	79405	-

Если принять цену реактивной энергии равной 0,0421 €/кварч, общие затраты за год составят:

$$C_{EQ} = (E_Q - 0.5 \cdot E_P) \cdot c = (79405 - 0.5 \cdot 93746) \cdot 0.0421 = 1370 \text{ €}$$

В таблице 3.2 представлена реактивная мощность, необходимая для повышения коэффициента мощности до 0,9.

Таблица 3.2

Месяц	Активная энергия, [кВтч]	Средне-месячный коэф. мощности	Часы работы	Активная мощность P, [кВт]	$Q_c = P \cdot (\tan\varphi - 0.484^1)$
Январь	7221	0.76	160	45.1	16.4
Февраль	8664	0.83	160	54.2	10.0
Март	5306	0.81	160	33.2	8.1
Апрель	8312	0.79	160	52.0	14.7
Май	5000	0.78	160	31.3	9.5
Июнь	9896	0.74	160	61.9	26.1
Июль	10800	0.73	160	67.5	29.8
Август	9170	0.72	160	57.3	27.9
Сентябрь	5339	0.76	160	33.4	12.3
Октябрь	7560	0.78	160	47.3	15.4
Ноябрь	9700	0.74	160	60.6	26.1
Декабрь	6778	0.76	160	42.4	16.2

¹ 0,484 – тангенс, соответствующий $\cos\varphi$, равному 0.9

Если для коррекции коэффициента мощности используется автоматическая конденсаторная батарея с $Q_c = 30$ квар, а удельная годовая стоимость установки батареи $c_c = 25$ €/квар, то полная годовая стоимость составит 750 €. Без учета окупаемости и финансовых издержек потребитель экономит:

$$C_{EQ} - C_{Qc} = 1370 - 750 = 620 \text{ €}$$

4 Основные устройства компенсации реактивной мощности

К основным устройствам компенсации реактивной мощности относятся:

- синхронные генераторы,
- синхронные компенсаторы (СК),
- статические компенсаторы реактивной мощности (СТК)
- конденсаторные батареи.

4.1 Синхронные генераторы

Синхронные генераторы вырабатывают основную часть электроэнергии, которая поступает к потребителям через системы передачи и распределения. Не вдаваясь в технические подробности, отметим, что, воздействуя на возбуждение генераторов, можно изменять генерируемое напряжение и таким образом регулировать передачу реактивной мощности в сеть, что позволяет улучшать профили напряжений системы и снижать потери в линиях передачи.

4.2 Синхронные компенсаторы

Синхронные компенсаторы – это синхронные двигатели, которые работают без нагрузки, вращаясь синхронно с напряжением в сети, и выполняют единственную функцию: потребляют избыточную реактивную мощность (в режиме недовозбуждения) или генерируют недостающую (в режиме перевозбуждения).

Рисунок 4.1. Синхронный компенсатор в режиме недовозбуждения

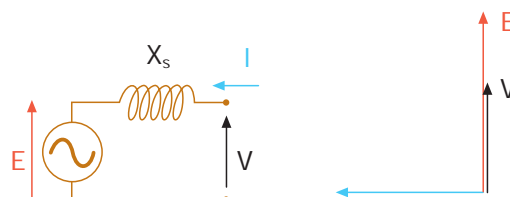
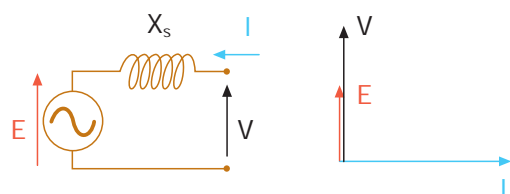


Рисунок 4.2. Синхронный компенсатор в режиме перевозбуждения



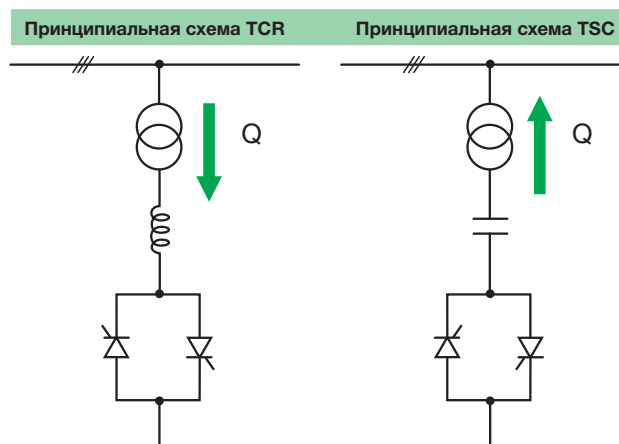
E : ЭДС, генерируемая в обмотках статора
 V : фазное напряжение, приложенное к контактам генератора
 I : ток статора
 X_s : реактивное сопротивление статора

Эти устройства подключаются в определенных узлах системообразующих и питающих сетей. Использование синхронных компенсаторов в распределительных сетях экономически нецелесообразно из-за высокой начальной стоимости и затрат на техническое обслуживание.

4.3 Статические компенсаторы реактивной мощности

Успехи силовой электроники дали возможность перейти от синхронных компенсаторов к статическим системам компенсации реактивной мощности, таким как TSC (конденсаторная батарея с тиристорной коммутацией) и TCR (реактор с тиристорным управлением). Это электронные варианты электромеханических компенсаторов, в которых, однако, для коммутации конденсаторов применяются не контакторы, а пары тириستоров, включенные встречно-параллельно.

Рисунок 4.3.



TSC позволяет ступенчато регулировать реактивную мощность, которую отдают в сеть конденсаторы, а TCR – плавно регулировать реактивную мощность, которую потребляют индуктивности.

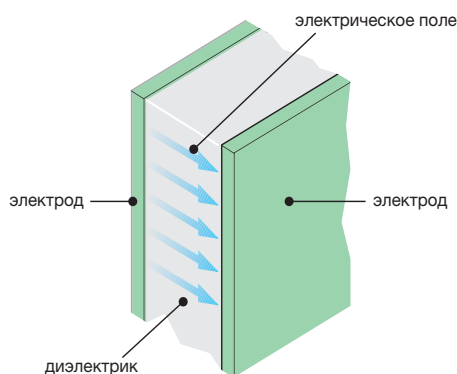
Соединив TSC и TCR, можно плавно регулировать генерируемую и потребляемую реактивную мощность.

Такие устройства применяются, в первую очередь, в сетях высокого и сверхвысокого напряжения.

4.4 Конденсаторные батареи

Конденсатор представляет собой пассивный двух-полюсник, состоящий из двух проводящих поверхностей, называемых электродами, изолированных друг от друга диэлектриком.

Рисунок 4.4.



Такая система пропитывается конденсаторным маслом для защиты от влаги и газовых карманов, которые могут стать причиной пробоя.

Последнее поколение конденсаторов не содержит пропиточной жидкости и проходит специальную обработку, которая улучшает их электрические свойства. Сухие конденсаторы не создают опасности загрязнения окружающей среды из-за утечки пропиточной жидкости.

В зависимости от геометрии металлических электродов конденсаторы делятся на:

- плоские,
- цилиндрические,
- сферические.

Рисунок 4.5.



Основными параметрами конденсатора являются:

- **номинальная ёмкость** C_n : величина, рассчитываемая по номинальным значениям мощности, напряжения и частоты конденсатора;
- **номинальная мощность** Q_n : реактивная мощность, на которую рассчитан конденсатор;
- **номинальное напряжение** U_n : действующее значение переменного напряжения, на которое рассчитан конденсатор;
- **номинальная частота** f_n : частота, на которую рассчитан конденсатор.

Когда к электродам конденсатора прикладывается переменное напряжение, конденсатор циклически заряжается и разряжается. В процессе зарядки конденсатор запасает реактивную энергию, а в процессе разрядки отдает ее в цепь, к которой он подключен.

Количество этой энергии выражается следующим соотношением:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

где:

- C – ёмкость,
- U – напряжение, приложенное к выводам конденсатора.

Поскольку конденсаторы способны запасать и отдавать энергию, они служат основным элементом конденсаторных установок компенсации реактивной мощности (для напряжений всех уровней) и статических устройств регулирования реактивной мощности¹.

В частности, для компенсации реактивной мощности в низковольтных установках применяются однофазные конденсаторы с металлизированной полипропиленовой пленкой, в том числе самовосстанавливающиеся. В таких конденсаторах диэлектрик способен восстанавливаться после пробоя: поврежденная часть пленки испаряется в результате теплового воздействия разряда, так что диэлектрические свойства слоя сохраняются.

¹ Фактически, конденсаторы потребляют минимальную активную мощность в силу ненулевой проводимости диэлектрического слоя и гистерезисных потерь.

5 Виды коррекции коэффициента мощности

В предыдущих главах мы обсуждали технические и экономические преимущества коррекции коэффициента мощности. Теперь важно понять, в каких точках сети нужно подключать конденсаторы, чтобы наилучшим образом использовать указанные преимущества.

Не существует общих правил, применимых ко всем типам электроустановок. Теоретически, конденсаторы можно подключать в любой точке, если это целесообразно с практической и экономической точки зрения. По месту подключения конденсаторов можно выделить следующие основные виды коррекции коэффициента мощности:

- индивидуальная коррекция коэффициента мощности;
- групповая коррекция коэффициента мощности;
- централизованная коррекция коэффициента мощности;
- комбинированная коррекция коэффициента мощности;
- автоматическая коррекция коэффициента мощности.

5.1 Индивидуальная коррекция коэффициента мощности

Индивидуальная коррекция достигается подключением точно рассчитанной конденсаторной батареи к выводам нагрузки, реактивную мощность которой нужно компенсировать.

Монтаж не требует больших расходов, конденсаторы и нагрузка коммутируются одновременно и для

них можно использовать общие устройства защиты от перегрузки.

Этот вид коррекции коэффициента мощности рекомендуется применять для оборудования сосредоточенного на определенной территории, характеризующегося постоянной мощностью, например, такого, как электродвигатели и люминесцентные лампы.

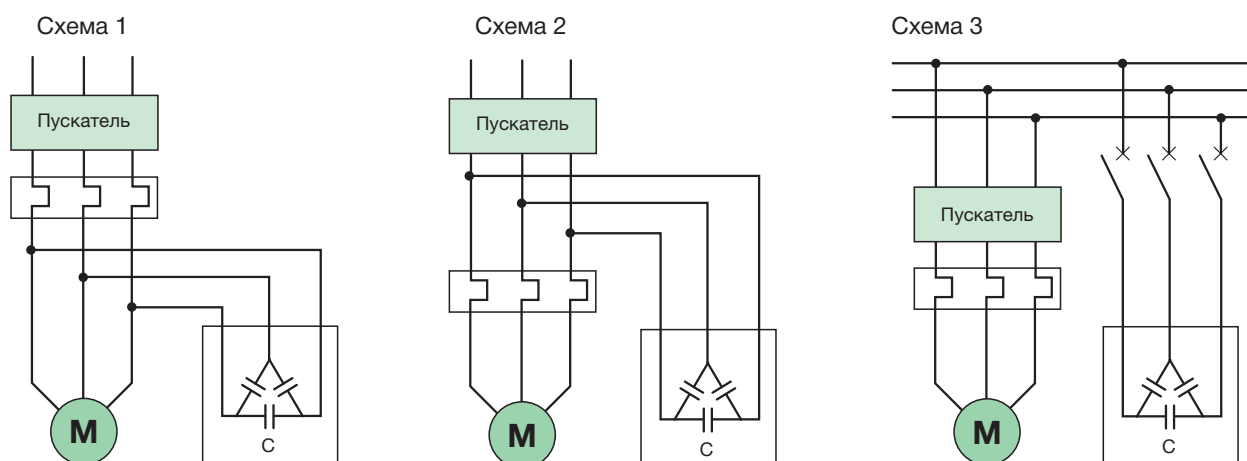
На рисунке 5.1 представлены распространенные схемы компенсации реактивной мощности для электродвигателей.

В случае прямого подключения (схемы 1 и 2) возникает следующая опасность: после отключения питания двигатель продолжает вращаться (за счет остаточной кинетической энергии) и самовозбуждается током от конденсаторной батареи, превращаясь в асинхронный генератор. При этом на стороне нагрузки сохраняется напряжение питающей сети. Это означает, что напряжение на контактах коммутационных аппаратов и устройств защиты может увеличиться (до двух раз) относительно номинального значения.

На схеме 3, компенсирующая батарея подключается только после пуска двигателя и отключается раньше, чем питание электродвигателя.

Этот способ подключения обеспечивает высокий коэффициент мощности на стороне питания нагрузки, но требует дополнительных затрат.

Рисунок 5.1.

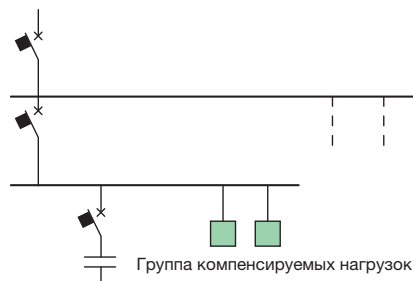


5.2 Групповая коррекция коэффициента мощности

Данный вид коррекции предназначен для повышения коэффициента мощности группы нагрузок с близкими функциональными характеристиками путем подключения общей батареи конденсаторов.

Такое решение – компромисс между экономичностью и эффективностью, поскольку преимущества от корректировки коэффициента мощности проявляются только со стороны источника питания, т. е. выше точки подключения батареи конденсаторов.

Рисунок 5.2.

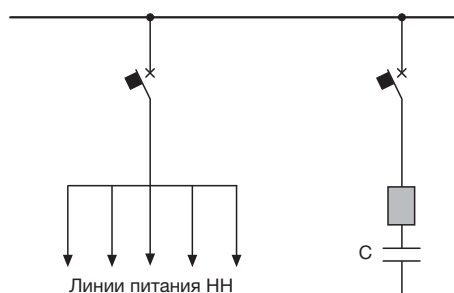


5.3 Централизованная коррекция коэффициента мощности

Выбор оптимального типа коррекции коэффициента мощности в большой мере зависит от суточного профиля нагрузки.

В установках с большим числом нагрузок, которые работают не одновременно или включаются только на несколько часов в день, применение индивидуальной компенсации реактивной мощности экономически невыгодно, так как значительная часть установленных конденсаторов будет подолгу бездействовать. В таких случаях используют единую систему компенсации, которая подключается в точке присоединения электроустановки к сети и позволяет обойтись существенно меньшим числом конденсаторов.

Рисунок 5.3.



Для централизованной компенсации реактивной мощности обычно используют автоматические устройства (см. ниже раздел «Автоматическая коррекция коэффициента мощности»), которые состоят из нескольких конденсаторных батарей, являющихся отдельными ступенями компенсации, и устанавливаются непо-

средственно в главном распределительном щите. Постоянно подключенные конденсаторные батареи применимы только в тех случаях, когда компенсируемая реактивная мощность остается постоянной на протяжении всего дня. Централизованная коррекция позволяет оптимизировать расходы на конденсаторные батареи, но распределительную сеть приходится проектировать с учетом максимальной реактивной мощности, потребляемой нагрузками.

5.4 Комбинированная коррекция коэффициента мощности

Данное решение представляет собой компромисс между индивидуальной и централизованной коррекцией коэффициента мощности и использует преимущества обоих вариантов. Для мощного электрического оборудования применяется индивидуальная коррекция, а для остального – централизованная. Комбинированная коррекция коэффициента мощности предпочтительна в электроустановках, где только мощное оборудование работает в продолжительном режиме.

5.5 Автоматическая коррекция коэффициента мощности

В большинстве электроустановок потребление реактивной мощности не является постоянным из-за того, например, что в рабочих циклах последовательно используются машины с разными электрическими характеристиками.

В таких электроустановках применяются системы автоматической коррекции, которые измеряют текущее потребление реактивной мощности и включают соответствующие конденсаторные батареи, поддерживая тем самым постоянный коэффициент мощности установки.

Автоматические системы компенсации реактивной мощности включают в себя:

- датчики тока и напряжения;
- интеллектуальное устройство, которое сравнивает измеренный коэффициент мощности с заданным и соответствующим образом управляет коммутацией конденсаторных батарей. Такое устройство называют регулятором коэффициента мощности;
- электрощит с устройствами коммутации и защиты;
- конденсаторные батареи.

Регулятор поддерживает коэффициент мощности как можно ближе к заданному значению, ступенчато изменяя подключаемую ёмкость. Точность регулирования тем выше, чем больше ступеней регулирования и чем меньше шаг между ними.

6 Расчет коэффициента мощности

Для подбора компенсирующей конденсаторной батареи необходимо рассчитать коэффициент мощности электроустановки в соответствии с профилем ее нагрузки, чтобы избежать избыточного потребления реактивной энергии и штрафов со стороны энергоснабжающей организации.

Для индивидуальной или групповой коррекции коэффициента мощности нужно определить $\cos\varphi$ отдельной нагрузки или группы нагрузок, что можно сделать двумя способами:

- непосредственно, по показаниям измерителя коэффициента мощности;
- косвенно, по показаниям измерителей активной и реактивной мощности.

Измеритель коэффициента мощности показывает $\cos\varphi$ нагрузки согласно потребляемой энергии. Измерения нужно выполнить в разные моменты рабочего цикла, чтобы получить среднее значение коэффициента мощности.

Если известно, какую активную и реактивную мощ-

ности потребляет нагрузка или группа нагрузок на протяжении рабочего цикла, то средний коэффициент мощности рассчитывается следующим образом:

$$\cos\varphi = \cos \left(\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{E_{Qf} - E_{Qi}}{E_{Pf} - E_{Pi}} \right) \right)$$

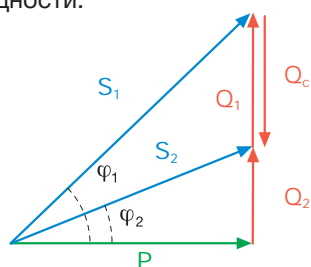
где:

- E_{Pi} и E_{Qi} – значения активной и реактивной энергии, измеренные в начале рабочего цикла;
- E_{Pf} и E_{Qf} – значения активной и реактивной энергии, измеренные в конце рабочего цикла.

Чтобы выполнить централизованную коррекцию коэффициента мощности, нужно определить среднемесячные коэффициенты мощности или изучить счета энергоснабжающей компании.

7 Расчет требуемой реактивной мощности

Определив фактический ($\cos\varphi_1$) и требуемый ($\cos\varphi_2$) коэффициенты мощности электроустановки, можно рассчитать реактивную мощность конденсаторной батареи, необходимую для коррекции коэффициента мощности.



Если

- P – установленная активная мощность,
- φ_1 – угол сдвига фаз до коррекции коэффициента мощности,
- φ_2 – угол сдвига фаз, который требуется получить в результате коррекции, то требуемая мощность конденсаторной батареи Q_c равна:

$$Q_c = (\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2) \cdot P = K \cdot P \quad [7.1]$$

После определения начального $\cos\varphi$ требуемую мощность конденсаторной батареи (в квар на кВт установленной мощности) можно определить с помощью таблицы 7.1. В трехфазной системе конденсаторная батарея состоит из трех конденсаторов одинаковой ёмкости, которые можно соединить треугольником или звездой. Выбирая схему соединения нужно учитывать, что при соединении треугольником на каждый конденсатор подается линейное напряжение, но ёмкость конденсатора составляет только 1/3 от той, которая требуется в случае соединения звездой (при том же уровне генерируемой реактивной мощности)¹.

$$Q_{cY} = Q_{c\Delta} \rightarrow C_Y = 3 \cdot C_{\Delta} \quad [7.2]$$

В низковольтных установках, где проблемы изоляции не имеют большого значения, предпочтительнее соединять конденсаторы звездой, так как это позволяет обойтись меньшей ёмкостью в каждой фазе.

$$Q_{cY} = 3 \cdot \omega \cdot C_Y \cdot \left(\frac{U_n}{\sqrt{3}} \right)^2 = \omega \cdot C_Y \cdot U_n^2 = Q_{c\Delta} = 3 \cdot \omega \cdot C_{\Delta} \cdot U_n^2 \rightarrow C_Y = 3 \cdot C_{\Delta}$$

Таблица 7.1

Коэффициент К (квар/кВт)

Начальный $\cos\varphi$	Конечный $\cos\varphi$												
	0.80	0.85	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1
0.60	0.583	0.714	0.849	0.878	0.907	0.938	0.970	1.005	1.042	1.083	1.130	1.191	1.333
0.61	0.549	0.679	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.096	1.157	1.299
0.62	0.515	0.646	0.781	0.810	0.839	0.870	0.903	0.937	0.974	1.015	1.062	1.123	1.265
0.63	0.483	0.613	0.748	0.777	0.807	0.837	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.451	0.581	0.716	0.745	0.775	0.805	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.058	1.201
0.65	0.419	0.549	0.685	0.714	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.919	0.966	1.027	1.169
0.66	0.388	0.519	0.654	0.683	0.712	0.743	0.775	0.810	0.847	0.888	0.935	0.996	1.138
0.67	0.358	0.488	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68	0.328	0.459	0.594	0.623	0.652	0.683	0.715	0.750	0.787	0.828	0.875	0.936	1.078
0.69	0.299	0.429	0.565	0.593	0.623	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.907	1.049
0.70	0.270	0.400	0.536	0.565	0.594	0.625	0.657	0.692	0.729	0.770	0.817	0.878	1.020
0.71	0.242	0.372	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.214	0.344	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.186	0.316	0.452	0.481	0.510	0.541	0.573	0.608	0.645	0.686	0.733	0.794	0.936
0.74	0.159	0.289	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.132	0.262	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.105	0.235	0.371	0.400	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.605	0.652	0.713	0.855
0.77	0.079	0.209	0.344	0.373	0.403	0.433	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829
0.78	0.052	0.183	0.318	0.347	0.376	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552	0.599	0.660	0.802
0.79	0.026	0.156	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.634	0.776
0.80		0.130	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.608	0.750
0.81		0.104	0.240	0.268	0.298	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.82		0.078	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.556	0.698
0.83		0.052	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.530	0.672
0.84		0.026	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.85			0.135	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.86			0.109	0.138	0.167	0.198	0.230	0.265	0.302	0.343	0.390	0.451	0.593
0.87			0.082	0.111	0.141	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.88			0.055	0.084	0.114	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540
0.89			0.028	0.057	0.086	0.117	0.149	0.184	0.221	0.262	0.309	0.370	0.512
0.90				0.029	0.058	0.089	0.121	0.156	0.193	0.234	0.281	0.342	0.484

Пример

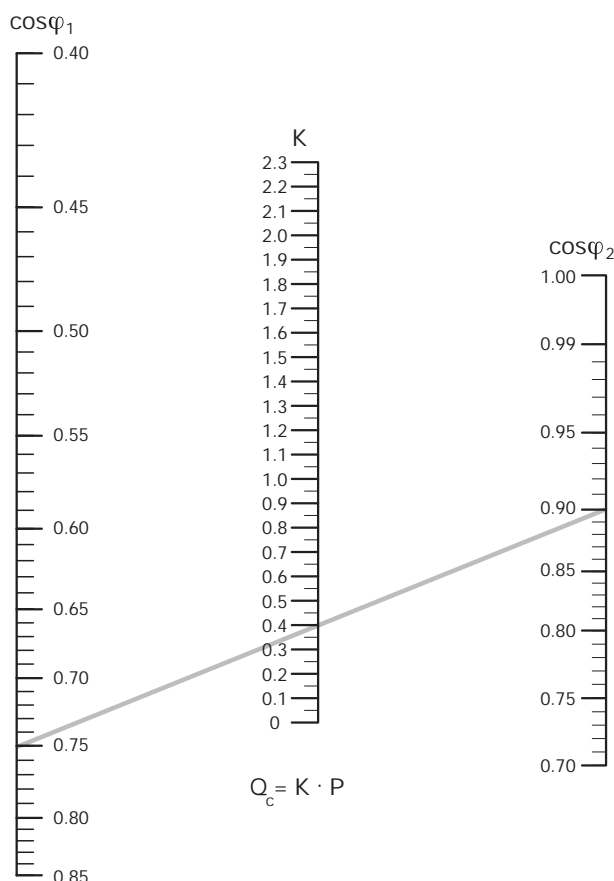
Потребляемая активная мощность электроустановки – 300 кВт, напряжение 400 В, $\cos\varphi = 0,75$, требуется увеличить коэффициент мощности до 0,90. В таблице 7.1 на пересечении строки «начальный $\cos\varphi$ » 0,75 и столбца «конечный $\cos\varphi$ » 0,9 находим значение коэффициента $K = 0,398$.

Следовательно, нам понадобится конденсаторная батарея с мощностью Q_c , равной:

$$Q_c = K \cdot P = 0,398 \cdot 300 = 119,4 \text{ квар}$$

Коэффициент K можно также определить по следующей номограмме².

Рисунок 7.1. Номограмма для расчета компенсирующей мощности



² Как видно из рисунка, коэффициент K определяется по точке, в которой прямая, соединяющая начальный и конечный $\cos\varphi$, пересекает среднюю шкалу. Умножив этот коэффициент на активную мощность нагрузки P , находим требуемую реактивную мощность Q_c .

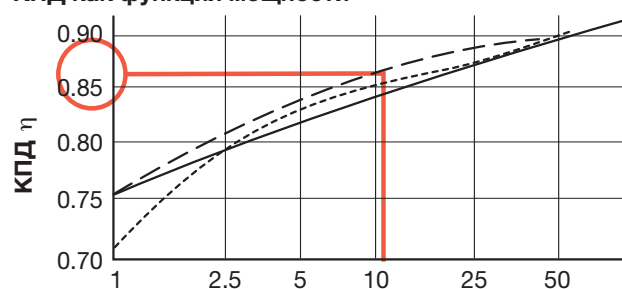
7.1 Коррекция коэффициента мощности трехфазных электродвигателей

Коэффициент мощности асинхронных электродвигателей невозможно скорректировать с большой точностью, поскольку он существенно зависит от режима нагрузки. Рассмотрим, например, шестипольный электродвигатель мощностью 11 кВт. Из приведенной ниже таблицы и диаграммы видно, что при нормальных условиях он работает с коэффициентом мощности $\cos\varphi_n = 0,77$, тогда как номинальный КПД $\eta_n = 0,86$.

Таблица 7.2

Номинальная мощность		Число полюсов			
кВт	л.с.	2	4	6	8
1.1	1.5	0.85	0.79	0.75	0.75
1.5	2	0.85	0.79	0.75	0.75
2.2	3	0.85	0.79	0.75	0.75
3	4	0.86	0.80	0.75	0.75
4	5.5	0.86	0.82	0.76	0.76
5.5	7.5	0.87	0.85	0.76	0.76
7.5	10	0.88	0.85	0.76	0.76
11	15	0.88	0.85	0.77	0.80
15	20	0.88	0.85	0.80	0.80
18.5	25	0.88	0.85	0.82	0.81
22	30	0.88	0.85	0.83	0.82
30	40	0.88	0.86	0.84	0.83
45	60	0.89	0.87	0.86	0.84
55	75	0.89	0.88	0.87	0.85
75	100	0.89	0.88	0.88	0.86
90	125	0.89	0.88	0.88	0.86
		$\cos\varphi_n$			

КПД как функция мощности



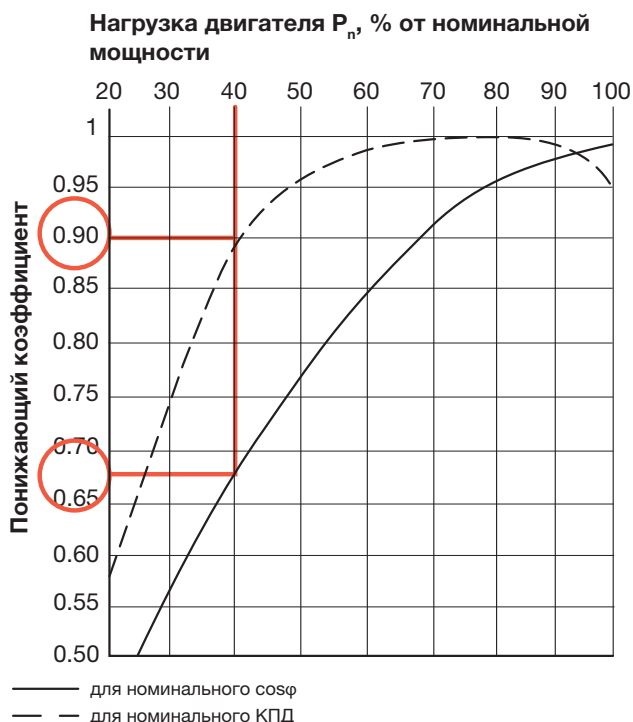
Номинальная мощность двигателя

2 полюса —————
4-6 полюсов — — — — —
8 полюсов - - - - -

Если этот двигатель работает с нагрузкой 40 % от номинальной, то его коэффициент мощности и КПД согласно приведенной ниже диаграмме составят:

$$\cos\varphi = \cos\varphi_n \cdot 0,67 = 0,52$$

$$\eta = \eta_n \cdot 0,9 = 0,77$$



Следовательно, потребленная из сети активная мощность P_a равна:

$$P_a = \frac{P_n}{\eta} = \frac{0.4 \cdot P_n}{\eta} = \frac{0.4 \cdot 11}{0.77} = 5.68 \text{ кВт}$$

Таблица 7.3. Компенсирующая реактивная мощность для двигателей АББ

P _н	Q _с	До коррекции		После коррекции	
[кВт]	[квар]	cosφ _г	I _н [А]	cosφ ₂	I ₂ [А]
400 В, 50 Гц, 2 полюса, 3000 мин ⁻¹					
7.5	2.5	0.89	13.9	0.98	12.7
11	2.5	0.88	20	0.95	18.6
15	5	0.9	26.5	0.98	24.2
18.5	5	0.91	32	0.98	29.7
22	5	0.89	38.5	0.96	35.8
30	10	0.88	53	0.97	47.9
37	10	0.89	64	0.97	58.8
45	12.5	0.88	79	0.96	72.2
55	15	0.89	95	0.97	87.3
75	15	0.88	131	0.94	122.2
90	15	0.9	152	0.95	143.9
110	20	0.86	194	0.92	181.0
132	30	0.88	228	0.95	210.9
160	30	0.89	269	0.95	252.2
200	30	0.9	334	0.95	317.5
250	40	0.92	410	0.96	391.0
315	50	0.92	510	0.96	486.3

По приведенной выше номограмме определяем, что при коррекции коэффициента мощности до значения $\cos\varphi = 0,9$ коэффициент K равен 1,15, следовательно, требуемая реактивная мощность Q_c равна:

$$Q_c = K \cdot P = 1.15 \cdot 5.68 = 6.53 \text{ квар}$$

Общее правило коррекции коэффициента мощности с учетом режима нагрузки состоит в том, что для двигателя мощностью P_n компенсирующая реактивная мощность Q_c должна обеспечивать коэффициент мощности не ниже заданного, но не превышать 90% от реактивной мощности Q_0 , потребляемой двигателем при номинальном напряжении U_n в холостом режиме. Помимо прочего, компенсация реактивной мощности позволяет избежать перенапряжения при отключении двигателя. Продолжая возвращаться, двигатель может действовать как самовозбуждающийся генератор и вырабатывать напряжение значительно выше сетевого [МЭК 60831-1]. Учитывая, что потребляемый без нагрузки ток I_0 является чисто реактивным ($\sin\varphi = 1$), требуется компенсирующая реактивная мощность:

$$Q_c = 0.9 \cdot Q_0 = 0.9 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_0}{1000} \text{ [квар]}$$

Ток I_0 обычно указан в документации двигателя.

В таблице 7.3 приведены значения реактивной мощности, необходимой для коррекции $\cos\varphi$ некоторых типов двигателей АББ в зависимости от их номинальной мощности и числа полюсов.

P _n	Q _c	До коррекции		После коррекции	
[кВт]	[квар]	cosφ _r	I _n [А]	cosφ ₂	I ₂ [А]
400 В, 50 Гц, 4 полюса, 1500 мин ⁻¹					
7.5	2.5	0.86	14.2	0.96	12.7
11	5	0.81	21.5	0.96	18.2
15	5	0.84	28.5	0.95	25.3
18.5	7.5	0.84	35	0.96	30.5
22	10	0.83	41	0.97	35.1
30	15	0.83	56	0.98	47.5
37	15	0.84	68	0.97	59.1
45	20	0.83	83	0.97	71.1
55	20	0.86	98	0.97	86.9
75	20	0.86	135	0.95	122.8
90	20	0.87	158	0.94	145.9
110	30	0.87	192	0.96	174.8
132	40	0.87	232	0.96	209.6
160	40	0.86	282	0.94	257.4
200	50	0.86	351	0.94	320.2
250	50	0.87	430	0.94	399.4
315	60	0.87	545	0.93	507.9
400 В, 50 Гц, 6 полюсов, 1000 мин ⁻¹					
7.5	5	0.79	15.4	0.98	12.4
11	5	0.78	23	0.93	19.3
15	7.5	0.78	31	0.94	25.7
18.5	7.5	0.81	36	0.94	30.9
22	10	0.81	43	0.96	36.5
30	10	0.83	56	0.94	49.4
37	12.5	0.83	69	0.94	60.8
45	15	0.84	82	0.95	72.6
55	20	0.84	101	0.96	88.7
75	25	0.82	141	0.93	123.9
90	30	0.84	163	0.95	144.2
110	35	0.83	202	0.94	178.8
132	45	0.83	240	0.95	210.8
160	50	0.85	280	0.95	249.6
200	60	0.85	355	0.95	318.0
250	70	0.84	450	0.94	404.2
315	75	0.84	565	0.92	514.4
400 В, 50 Гц, 8 полюсов, 750 мин ⁻¹					
7.5	5	0.7	18.1	0.91	13.9
11	7.5	0.76	23.5	0.97	18.4
15	7.5	0.82	29	0.97	24.5
18.5	7.5	0.79	37	0.93	31.5
22	10	0.77	45	0.92	37.5
30	12.5	0.79	59	0.93	50.0
37	15	0.78	74	0.92	62.8
45	20	0.78	90	0.93	75.4
55	20	0.81	104	0.93	90.2
75	30	0.82	140	0.95	120.6
90	30	0.82	167	0.93	146.6
110	35	0.83	202	0.94	178.8
132	50	0.8	250	0.93	214.6

Пример

Для трехфазного асинхронного 4-полюсного двигателя мощностью 110 кВт (400 В, 50 Гц) рекомендуется использовать компенсирующую реактивную мощность 30 квар.

7.2 Коррекция коэффициента мощности трехфазных трансформаторов

Коррекция коэффициента мощности трансформаторов имеет первостепенное значение, поскольку они очень часто эксплуатируются в длительном режиме. В частности, на установках, где имеется множество различных трансформаторных подстанций, рекомендуется так компенсировать реактивную мощность трансформаторов, чтобы гарантировать средний коэффициент мощности 0,9 на стороне среднего напряжения.

Вообще говоря, компенсирующая мощность Q_c для трансформатора с номинальной полной мощностью S_r не должна превышать мощность, потребляемую в режиме минимальной нагрузки.

Используя паспортные характеристики трансформатора – ток холостого хода I_0 %, напряжение короткого замыкания u_k %, потери в стали сердечника P_{fe} и потери в обмотках P_{cu} (кВт), можно рассчитать требуемую компенсирующую мощность:

$$Q_c = \sqrt{\left(\frac{I_0 \%}{100} \cdot S_r\right)^2 - P_{fe}^2} + K_L^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{u_k \%}{100} \cdot S_r\right)^2 - P_{cu}^2} \approx \dots$$

$$\dots \rightarrow \left(\frac{I_0 \%}{100} \cdot S_r\right) + K_L^2 \cdot \left(\frac{u_k \%}{100} \cdot S_r\right) \text{ [квар]}$$

где K_L – это коэффициент нагрузки, равный отношению мощности в режиме минимальной нагрузки к номинальной мощности трансформатора.

Пример

Предположим, требуется скорректировать коэффициент мощности масляного распределительного трансформатора мощностью 630 кВА, который питает нагрузку, равную 60% от номинального значения.

Паспортные характеристики трансформатора:

$$i_0 \% = 1.8 \%$$

$$u_k \% = 4 \%$$

$$P_{cu} = 8.9 \text{ кВт}$$

$$P_{fe} = 1.2 \text{ кВт}$$

Следовательно, к трансформатору требуется подключить конденсаторную батарею мощностью:

$$Q_c = \sqrt{\left(\frac{I_0 \%}{100} \cdot S_r\right)^2 - P_{fe}^2} + K_L^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{u_k \%}{100} \cdot S_r\right)^2 - P_{cu}^2} = \dots$$

$$\dots \rightarrow \sqrt{\left(\frac{1.8 \%}{100} \cdot 630\right)^2 - 1.2^2} + 0.6^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{4 \%}{100} \cdot 630\right)^2 - 8.9^2} = 19.8 \text{ квар}$$

а по упрощенной формуле:

$$Q_c = \left(\frac{I_0 \%}{100} \cdot S_r\right) + K_L^2 \cdot \left(\frac{u_k \%}{100} \cdot S_r\right) = \left(\frac{1.8 \%}{100} \cdot 630\right) + \dots$$

$$\dots \rightarrow 0.6^2 \cdot \left(\frac{4 \%}{100} \cdot 630\right) = 20.4 \text{ квар}$$

В таблице 7.4 указаны мощности конденсаторных батарей Q_c (квар), которые рекомендуется подключать к вторичным обмоткам трансформаторов АББ при

различных прогнозируемых уровнях нагрузки. Компенсирующая реактивная мощность связана с коэффициентом нагрузки квадратичной зависимостью.

Таблица 7.4. Компенсирующая реактивная мощность для трансформаторов АББ

Трансформатор					Q_c [квар]				
S_r	$u_k\%$	$i_0\%$	P_{fe}	P_{cu}	Коэффициент нагрузки K_L				
[кВА]	[%]	[%]	[кВт]	[кВт]	0	0.25	0.5	0.75	1
Распределительный масляный трансформатор СН-НН									
50	4	2.9	0.25	1.35	1.4	1.5	1.8	2.3	2.9
100	4	2.5	0.35	2.30	2.5	2.7	3.3	4.3	5.7
160	4	2.3	0.48	3.20	3.6	4	5	6.8	9.2
200	4	2.2	0.55	3.80	4.4	4.8	6.1	8.3	11
250	4	2.1	0.61	4.50	5.2	5.8	7.4	10	14
315	4	2	0.72	5.40	6.3	7	9.1	13	18
400	4	1.9	0.85	6.50	7.6	8.5	11	16	22
500	4	1.9	1.00	7.40	9.4	11	14	20	28
630	4	1.8	1.20	8.90	11	13	17	25	35
800	6	1.7	1.45	10.60	14	16	25	40	60
1000	6	1.6	1.75	13.00	16	20	31	49	74
1250	6	1.6	2.10	16.00	20	24	38	61	93
1600	6	1.5	2.80	18.00	24	30	47	77	118
2000	6	1.2	3.20	21.50	24	31	53	90	142
2500	6	1.1	3.70	24.00	27	37	64	111	175
3150	7	1.1	4.00	33.00	34	48	89	157	252
4000	7	1.4	4.80	38.00	56	73	125	212	333
Распределительный трансформатор с литой изоляцией СН-НН									
100	6	2.3	0.50	1.70	2.2	2.6	3.7	5.5	8
160	6	2	0.65	2.40	3.1	3.7	5.5	8.4	12
200	6	1.9	0.85	2.90	3.7	4.4	6.6	10	15
250	6	1.8	0.95	3.30	4.4	5.3	8.1	13	19
315	6	1.7	1.05	4.20	5.3	6.4	9.9	16	24
400	6	1.5	1.20	4.80	5.9	7.3	12	19	29
500	6	1.4	1.45	5.80	6.8	8.7	14	23	36
630	6	1.3	1.60	7.00	8	10	17	29	45
800	6	1.1	1.94	8.20	8.6	12	20	35	56
1000	6	1	2.25	9.80	9.7	13	25	43	69
1250	6	0.9	3.30	13.00	11	15	29	52	85
1600	6	0.9	4.00	14.50	14	20	38	67	109
2000	6	0.8	4.60	15.50	15	23	45	82	134
2500	6	0.7	5.20	17.50	17	26	54	101	166
3150	8	0.6	6.00	19.00	18	34	81	159	269

Пример

Для распределительного масляного трансформатора АББ мощностью 630 кВА с коэффициентом нагрузки 0,5 потребуется компенсирующая мощность 17 квар. При настройке регулятора $\cos\varphi$ для стороны низкого напряжения нужно будет учесть эту мощность в дополнение к той, которая необходима для компенсации реактивной мощности нагрузки.

Соответственно, чтобы получить коэффициент мощности 0,9 для стороны среднего напряжения, регулятор нужно будет установить на значение, превышающее 0,9. Согласно предположению трансформатор работает с коэффициентом нагрузки 50%, значит, полная мощность, потребляемая из сети, равна:

$$S = 0.5 \cdot S_r = 0.5 \cdot 630 = 315 \text{ кВА}$$

Если, например, нагрузка работает с коэффициентом мощности 0,8, то потребляемая двигателем активная мощность P составит:

$$P = S \cdot \cos\varphi = 315 \cdot 0.8 = 252 \text{ кВт}$$

Для коррекции этого коэффициента мощности до значения 0,9 требуется реактивная мощность:

$$Q_r = P \cdot (\operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.8)) - \operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.9))) = \dots \rightarrow 252 \cdot (0.75 - 0.48) = 68 \text{ квар}$$

С учетом необходимой коррекции коэффициента мощности трансформатора общая компенсирующая мощность должна составить:

$$Q_c = Q_r + Q_t = 68 + 17 = 85 \text{ квар}$$

Соответственно, регулятор коэффициента мощности нужно настроить на:

$$\begin{aligned} \cos\varphi' &= \cos\left(\operatorname{tg}^{-1}\left(\operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.8)) - \frac{Q_c}{P}\right)\right) = \dots \rightarrow \cos\left(\operatorname{tg}^{-1}\left(\operatorname{tg}(36.87^\circ) - \frac{85}{252}\right)\right) = \cos\left(\operatorname{tg}^{-1}(0.75 - 0.34)\right) = 0.925 \end{aligned}$$

8 Гармонические искажения в электросетях

8.1 Гармоники

В современной промышленности и в быту широко распространены электронные устройства, которые в силу принципа своей работы потребляют несинусоидальный ток (т. е. являются нелинейной нагрузкой). Такой ток приводит к несинусоидальному падению напряжения в питающей сети, и в результате на другие нагрузки также подается искаженное напряжение. Гармоники – это искажения, накладывающиеся на стандартную синусоидальную форму колебаний; любой несинусоидальный сигнал можно разложить на синусоидальные компоненты (гармоники).

Согласно теореме Фурье любая периодическая кусочно-непрерывная ограниченная функция с периодом T^1 может быть представлена бесконечным тригонометрическим рядом, состоящим из суммы синусоид с частотами, кратными частоте этой функции.

Гармоника, частота которой соответствует периоду исходного колебания, называется основной, а гармоника, частота которой в n раз выше основной, называется n -ой гармоникой.

Согласно теореме Фурье, синусоидальное колебание не содержит других гармоник, кроме основной. Следовательно, наличие гармоник в электрической системе указывает на искажение формы напряжения или тока и означает, что текущее состояние системы распределения электроэнергии может нарушить работу оборудования.

¹ Периодической кусочно-непрерывной ограниченной функцией называется функция, принимающая одинаковые значения с периодом T ($f(x+T) = f(x)$) и имеющая конечное число точек разрыва первого рода и точек устранимого разрыва (то есть, имеющая верхний и нижний пределы).

Рисунок 8.1.



Основными аппаратами, генерирующими гармоники, являются:

- персональные компьютеры,
- люминесцентные и газоразрядные лампы,
- статические преобразователи,
- системы бесперебойного питания,
- приводы с регулируемой частотой вращения,
- сварочные аппараты,
- дуговые и индукционные печи.

Как правило, искажение формы напряжения вызвано наличием в аппарате нелинейного или изменяющегося во времени сопротивления² либо мостового выпрямителя, полупроводниковые приборы которого проводят ток только на протяжении части периода, т. е. создают прерывающиеся кривые тока, которые содержат несколько гармоник.

Как будет показано в следующих разделах, наличие гармоник в электросети может привести к повреждению конденсаторной батареи.

8.2 Требования стандартов

Технические стандарты устанавливают определенные требования по ограничению влияния гармоник на конденсаторы. Стандарт МЭК 61642 «Сети переменного тока промышленные, находящиеся под воздействием гармоник. Применение фильтров и шунтирующих конденсаторов» (стандарты гармонизированные данному в РФ не вводились) определяет проблемы и дает рекомендации по применению конденсаторов и фильтров гармоник в сетях переменного тока, где присутствуют гармоники напряжения и тока. В частности, этот стандарт описывает проблему последовательного и параллельного резонанса и иллюстрирует ее примерами.

8.3 Действие гармоник

8.3.1 Перегрузки

Наличие гармоник в электросети может нарушить работу оборудования, например, создать перегрузку в нулевом рабочем проводнике, увеличить потери трансформатора или изменить момент вращения электродвигателя.

В частности, гармоники очень неблагоприятно сказываются на работе конденсаторов компенсации реактивной мощности.

Как известно, ёмкостное сопротивление обратно пропорционально частоте, следовательно, сопротивление гармоникам напряжения снижается с увеличением порядка гармоник. Это значит, что при подаче несинусоидального напряжения ток возрастает настолько, что может повредить конденсаторы.

Рисунок 8.2

$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$	$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$
ёмкостное сопротивление	индуктивное сопротивление

Предположим, что конденсаторы батареи соединены треугольником, тогда линейный ток, соответствующий n-ой гармонике равен:

$$I_n = \sqrt{3} \cdot n \cdot \omega \cdot C \cdot U_n \quad [8.1]$$

где:

- I_n - ток, соответствующий n-ой гармонике;
- n - порядковый номер гармоники;
- ω - частота основной гармоники;
- C - ёмкость;
- U_n - линейное напряжение, соответствующее n-ой гармонике.

Полный линейный ток, потребляемый конденсаторной батареей, составит³:

$$I_C = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C \cdot \sqrt{U_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} (n \cdot U_n)^2} \quad [8.2]$$

Это соотношение наглядно показывает, что наличие гармоник напряжения увеличивает потребляемый ток. По этой причине стандарты МЭК 60831-1 и МЭК 60931-1 предписывают рассчитывать конденсаторы на непрерывную работу при силе тока, превосходящей номинальный ток данной конденсаторной батареи (подробнее об этом в следующей главе).

² Изменяющиеся во времени нагрузки, например, устройства частотного и фазового регулирования, создают не только гармонические колебания, частота которых кратна основной, но и интергармоники.

³ Алгебраическая сумма применима и для действующих значений, поскольку все гармоники тока находятся в фазе с основной гармоникой.

8.3.2 Резонанс

Еще важнее то, что в случае высокого уровня линейных искажений создается опасность резонанса между системой коррекции коэффициента мощности (эквивалентной ёмкостью конденсаторов) и эквивалентной индуктивностью. Резонанс возникает, когда индуктивное и ёмкостное сопротивления равны. Если индуктивность и ёмкость соединены последовательно, говорят о последовательном резонансе, если параллельно – о параллельном. Последовательный и параллельный резонансы могут присутствовать в одной сети. Резонанс происходит при определенной частоте, которая называется резонансной частотой f_r .⁴

$$X_L = X_C \rightarrow f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad [8.3]$$

При последовательном резонансе полное сопротивление теоретически стремится к нулю⁵:

$$\bar{Z}_{tot} = j(X_L - X_C) = 0 \quad [8.4]$$

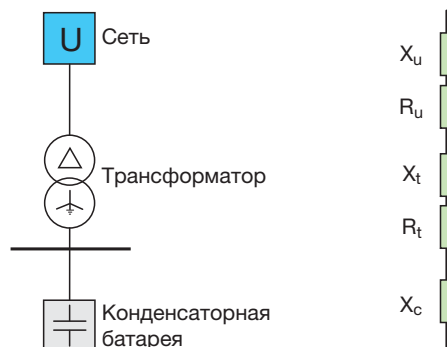
Аналогично, при параллельном резонансе полное сопротивление стремится к бесконечности:

$$\bar{Z}_{tot} = \frac{X_L \cdot X_C}{j(X_L - X_C)} \rightarrow \infty \quad [8.5]$$

Если на последовательный резонансный контур подается переменное напряжение с частотой, близкой к резонансной, повышение потребляемого тока может вызвать помехи, сверхтоки и повреждения компонентов сети.

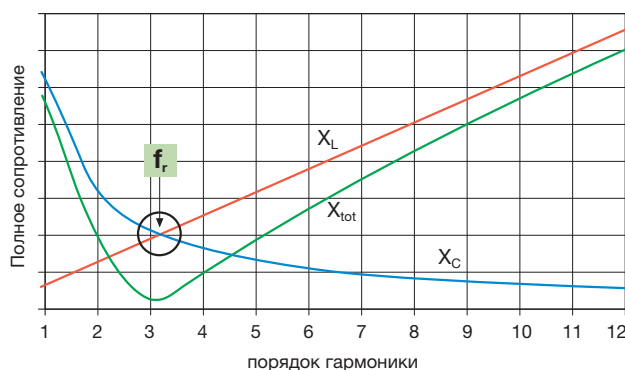
И наоборот, если через параллельный резонансный контур проходят гармоники тока нелинейной нагрузки, резонансная гармоника может вызвать перенапряжение.

Рисунок 8.3. Пример последовательного резонансного контура



На следующей диаграмме представлены кривые, соответствующие ёмкостному сопротивлению (уменьшается с порядком гармоники), индуктивному сопротивлению (возрастает с порядком гармоники) и полному реактивному сопротивлению сети; полное реактивное сопротивление последовательного контура становится минимальным при резонансной частоте (в данном примере – при частоте втрое выше основной).

Рисунок 8.4.



Резонансную частоту f_r можно рассчитать по следующей формуле:

$$f_r = f_1 \cdot \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} \quad [8.6]$$

где:

- f_1 – основная частота;
- X_{C1} – ёмкостное сопротивление конденсатора на основной частоте;
- X_{L1} – индуктивное сопротивление сети (на основной частоте) на стороне источника питания.

⁴ Фактически, полное сопротивление резко снижается и определяется только активным сопротивлением соединительных кабелей.

Если гармоники отсутствуют или резонансная частота существенно отличается от основной частоты энергосистемы, то в линиях нет свёрхоков.

При наличии гармоники, частота которой близка к резонансной, ток возрастает. Более подробный анализ можно найти в стандарте МЭК 61642, где приводятся многочисленные примеры последовательных резонансных контуров, из которых видно, что при частоте, близкой к резонансной частоте контура, сравнительно низкое напряжение на питающих шинах может вызвать высокое значение тока.

Во избежание резонанса и, соответственно, сокращения срока службы конденсатора, резонансная частота сети должна как можно сильнее отличаться от частот присутствующих гармоник.

Самое распространенное решение, представленное в стандарте МЭК 61642, состоит в том, чтобы соединить последовательно с конденсатором индуктивное сопротивление (антирезонансный реактор); его значение подбирается так, чтобы резонансная частота оказалась ниже частоты самой низкой из присутствующих в сети гармоник напряжения.

Пример

Предположим, что в последовательном резонансном контуре, представленном на рис. 8.3, низшая гармоника с существенной амплитудой – пятая. В таком случае:

$$f_1 \cdot \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} < f_5 \rightarrow \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} < \frac{f_5}{f_1} = 5 \rightarrow X_{L1} > 4\% X_{C1} \quad [8.7]$$

где:

- X_{C1} – ёмкостное сопротивление конденсатора при основной частоте;
- X_{L1} – индуктивное сопротивление сети при основной частоте.

Если низшая гармоника с существенной амплитудой – третья, то:

$$X_{L1} > 11.1\% X_{C1} \quad [8.7]$$

После подключения такого реактора исчезают условия для резонанса (при существующих в сети гармониках напряжения и тока) поскольку и сеть, и цепь реактор-конденсатор имеют индуктивный характер.

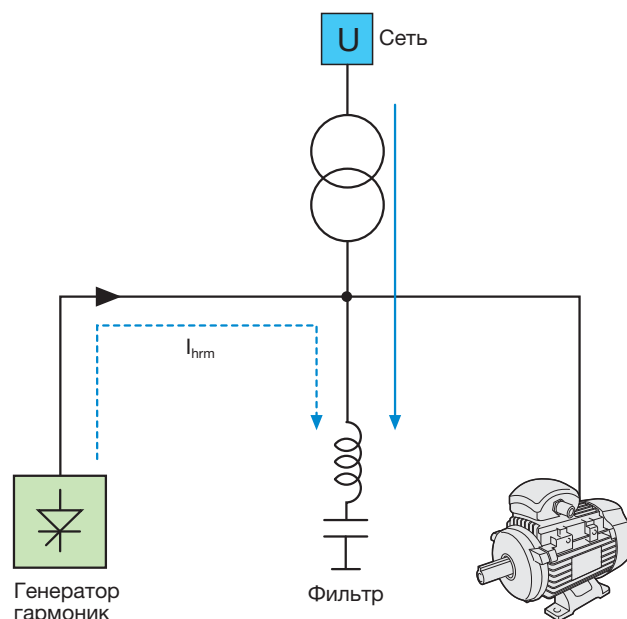
8.4 Фильтры гармоник

Для ограничения воздействия гармоник в сети конденсаторные батареи можно включать последовательно с реактором. Такая комбинация конденсатор-реактор и является фильтром гармоник.

Как уже было показано, для борьбы с резонансами необходимо включать реактор последовательно с конденсатором. Аналогичные рассуждения приводят к мысли подключить к сети комбинацию реактора и конденсатора с такой резонансной частотой, которая позволит устранить в сети гармонику тока.

Если цепь, состоящая из реактора и конденсатора будет иметь очень низкое реактивное сопротивление на частоте определенной гармоники, это позволит подавить данную гармонику, не оказывая влияния на всю сеть.

Рисунок 8.5.

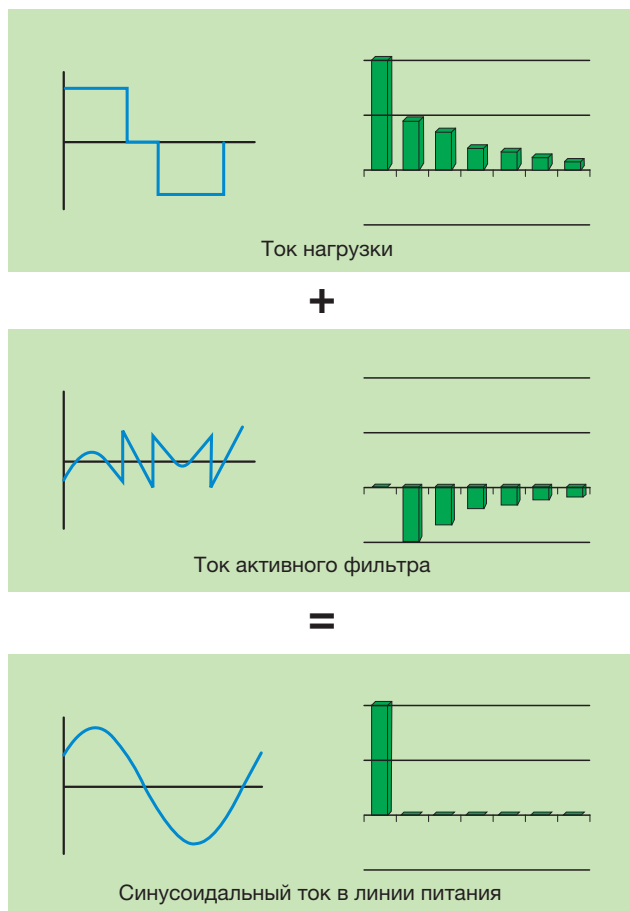


Поэтому такой фильтр, называемый *пассивным фильтром*, состоит из последовательно соединенных конденсатора и реактора, подобранных таким образом, что резонансная частота совпадает с частотой удаляемой гармоники.

Пассивные фильтры подбираются для каждого конкретного случая в соответствии с гармоникой, которую требуется отфильтровать. Они экономичны, их легко монтировать и вводить в эксплуатацию.

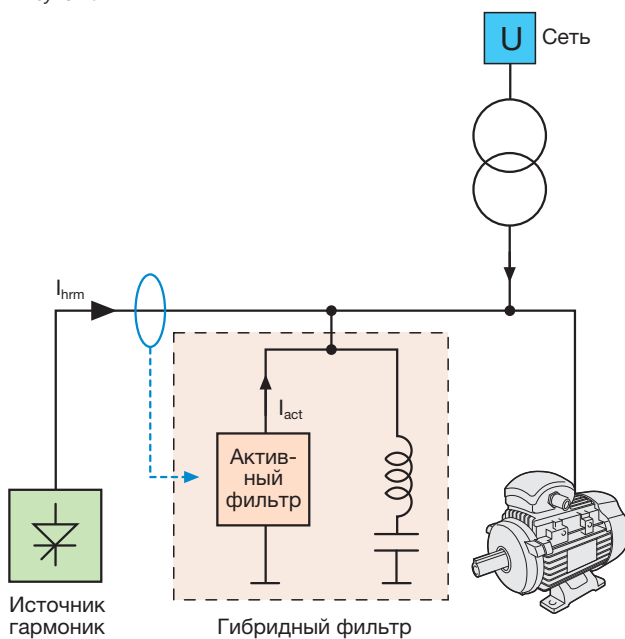
Применяются также *активные фильтры*, которые могут автоматически устранять имеющиеся в сети гармоники тока в широком диапазоне частот. Используя технологии силовой электроники, они создают гармоники, которые взаимоуничтожаются с присутствующими в сети.

Рисунок 8.6.



Преимущество активного фильтра состоит в том, что он одновременно фильтрует множество гармоник и не требует расходов на проектирование.

Рисунок 8.7.



9 Коммутация и защита конденсаторных батарей

9.1 Электрические явления при коммутации

Включение конденсаторной батареи вызывает переходный процесс, обусловленный зарядом батареи. На высоких частотах возникает сверхток (в первые мгновения равный току короткого замыкания), амплитуда которого является функцией от параметров сети на стороне источника и характеристик батареи. Кроме того, коммутация вызывает перенапряжение, распространяющееся по сети. Характер этого перенапряжения зависит от реактивной мощности конденсаторной батареи и от того, к какой точке сети батарея подключена. Особого внимания заслуживают две ситуации:

- батарея подключена на стороне нагрузки трансформатора с полной мощностью S_r и напряжением короткого замыкания $U_{cc}\%$ (считаем, что питание поступает от сети бесконечно большой мощности). В этом случае возникает перенапряжение, которое можно рассчитать по следующей формуле¹:

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{Q_c}{S_r} \quad [9.1]$$

- батарея подключена к сети в точке, где мощность короткого замыкания равна S_{cc} . В этом случае перенапряжение можно рассчитать по формуле²:

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{Q_c}{S_{cc}} \quad [9.2]$$

Сверхтоки, возникающие в момент включения, существенно зависят от индуктивности сети на стороне источника и от числа подключенных конденсаторных

¹ Изменение напряжения определяется выражением:

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U_n^2}$$

Сопротивление обмоток трансформатора пренебрежимо мало по сравнению с реактивным сопротивлением утечки, откуда:

$$X_{cc} \approx Z_{cc}$$

Кроме того, поскольку:

$$U_{cc}\% \approx Z_{cc}\% = \frac{Z_{cc}}{Z} \cdot 100 = \frac{Z_{cc}}{U_n^2} \cdot 100$$

изменение напряжения можно выразить как:

$$\frac{\Delta U}{U_n} = \frac{X_{cc} \cdot Q}{U_n^2} \approx \frac{Z_{cc} \cdot Q}{U_n^2} = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \frac{Q}{U_n^2} = \frac{U_{cc}\%}{100} \cdot \frac{Q}{S_n}$$

откуда, заменив Q реактивной мощностью конденсаторной батареи при включении, Q_c , можно вывести выражение [9.1] для перенапряжения, вызванного зарядкой батареи.

² Соотношение действительно при условии, что сеть на стороне источника питания является преимущественно индуктивной. Поскольку

$$S_{cc} = \frac{U_n^2}{X}$$

из этого следует:

$$\frac{\Delta U}{U_n} \approx \frac{X \cdot Q}{U_n^2} = \frac{U_n^2}{S_{cc}} \cdot \frac{Q}{U_n^2} = \frac{Q}{S_{cc}}$$

батарей. В случае отдельной батареи пик тока включения существенно зависит от тока короткого замыкания сети на стороне источника питания, I_{cc} , который определяется типовым значением индуктивности сети L_0 согласно формуле:

$$L_0 = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot I_{cc}} \quad [9.3]$$

Стандарты МЭК 62271-100 и МЭК 60831-1 содержат формулы для расчета пикового пускового тока. В данном случае:

$$i_p = U_n \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{C}{L_0 + L}} \approx U_n \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{C}{L_0}} \approx I_{cn} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot S_{cc}}{Q_c}} \quad [9.4]$$

поскольку индуктивность конденсаторной батареи много ниже индуктивности сети на стороне источника питания, $L \ll L_0$.

Как правило, пиковый ток в установке не превосходит максимума, предусмотренного для конденсаторных батарей (100-кратное превышение номинального тока батареи); если пиковый ток оказывается выше этого максимума или его требуется ограничить, чтобы гарантировать надлежащую работу коммутационных аппаратов, к батарее нужно последовательно подключить ограничивающий дроссель³. Если конденсаторная батарея включается, когда другая батарея или несколько батарей уже запитаны, понадобятся ограничивающие реакторы, включенные последовательно с каждой из них, поскольку переток энергии из уже задействованных батарей во вновь включаемую приводит к значительному броску тока. В указанных выше стандартах приводятся такие формулы расчета пиковых токов для этих случаев:

- подключение при наличии одной включенной батареи:

$$i_p = U_n \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{C_1 \cdot C}{C_1 + C} \cdot \frac{1}{L_1 + L}} \quad [9.5]$$

Если $L_1 = L$ и $C_1 = C$ то:

$$i_p = U_n \cdot \sqrt{\frac{C}{6 \cdot L}} \quad [9.6]$$

- подключение при наличии n включенных батарей:

$$L' = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}} \quad [9.7]$$

Если $L_1 = L_2 = \dots = L$ и $C_1 = C_2 = \dots = C_n = C$ то:

$$i_p = U_n \cdot \frac{n}{n+1} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{C}{L}} \quad [9.8]$$

Ограничивающие реакторы обычно не имеют магнитного сердечника. Как правило, применяются индуктивности 50, 100 или 150 мкГн.

³ С другой стороны, если конденсаторная батарея включается вместе с нагрузкой, реактивную мощность которой она компенсирует, например, вместе с двигателем, такая проблема не возникает, поскольку ток конденсатора компенсируется индуктивной составляющей тока, потребляемого двигателем.

9.2 Коммутация и защита

Установки для коррекции коэффициента мощности включают в себя следующие основные компоненты:

- защитное устройство,
- коммутационный аппарат (контактор),
- один или несколько соответствующим образом соединенных конденсаторов,
- резисторы для разрядки конденсатора.

Автоматические установки дополнительно оснащены регулятором, который управляет коммутацией конденсаторов.

9.2.1 Выбор защитного устройства

Устройство защиты конденсаторной батареи должно удовлетворять следующим требованиям:

1. выдерживать переходные токи при включении-отключении конденсаторных батарей. В частности, термоманитные и электронные расцепители не должны срабатывать от пускового тока.
2. выдерживать периодические или постоянные сверхтоки, вызванные гармониками напряжения и допустимыми отклонениями от номинальной ёмкости конденсаторов.
3. координироваться с любыми внешними коммутационными аппаратами (контакторами).

Кроме того, включающая и отключающая способность автоматического выключателя должна соответствовать параметрам короткого замыкания электроустановки.

Согласно стандартам МЭК 60831-1 и МЭК 60931-1:

- конденсаторы должны быть рассчитаны на долговременную работу при действующем токе, на 30 % превышающем номинальный ток I_{cn} (из-за возможного наличия гармоник напряжения в сети);
- для батарей мощностью до 100 квар установлен допуск ёмкости +10 %, а для батарей мощностью свыше 100 квар – допуск 5 % (поправка 1 к указанным стандартам).

Таким образом, конденсаторная батарея может потреблять следующий максимальный ток I_{cmax} :

$$Q_c \leq 100 \text{ квар} \longrightarrow I_{cmax} = 1.3 \cdot 1.1 \cdot \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 1.43 \cdot I_{cn} \quad [9.9]$$

$$Q_c > 100 \text{ квар} \longrightarrow I_{cmax} = 1.3 \cdot 1.05 \cdot \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U_n} = 1.365 \cdot I_{cn}$$

где:

- Q_c – реактивная мощность;
- U_n – номинальное линейное напряжение;
- I_{cn} – номинальный ток.

Итак, чтобы гарантировать надлежащую защиту конденсаторной батареи от перегрузки:

- номинальный ток автоматического выключателя должен превышать указанное выше значение,
- уставка защиты от перегрузки должна быть равна указанному выше значению.

Подключение конденсаторной батареи создает условия, аналогичные состоянию короткого замыкания: на короткое время (1...3 мс) на высоких частотах (1...15 кГц) возникают переходные токи с высоким пиковым значением ($25...200 \times I_{cn}$).

Система защиты конденсаторной батареи должна удовлетворять следующим требованиям:

- автоматический выключатель должен иметь соответствующую включающую способность,
- настройка быстродействующего устройства защиты от короткого замыкания должна исключать ложные срабатывания.

Для соблюдения второго условия:

- термоманитные расцепители обычно настраивают на ток I_3 не ниже $10 \times I_{cmax}$,

$$I_3 \geq 10 \cdot I_{cmax} \quad [9.10]$$

- в электронных расцепителях отключают функцию защиты от короткого замыкания ($I_3 = \text{OFF}$).

9.2.2 Выбор коммутационного аппарата (контактора)

Конденсаторы и конденсаторные батареи обычно коммутируются контакторами, которые должны отвечать следующим требованиям:

- выдерживать ток равный току I_{cmax} конденсаторной батареи,
- выдерживать без повреждения пусковой ток конденсаторов.

Кроме того, контактор должен быть защищен от короткого замыкания соответствующим устройством.

9.2.3 Выбор конденсатора

Конденсатор вырабатывает реактивную мощность, необходимую для увеличения коэффициента мощности до требуемого уровня. На паспортной табличке конденсатора приводятся следующие характеристики:

- номинальное напряжение U_n ;
- номинальная частота f ;
- реактивная мощность Q_c , квар.

Нужно отметить, что реактивная мощность при рабочем напряжении отличается от номинальной мощности, указанной на паспортной табличке и относящейся к номинальному напряжению; следующая формула позволяет рассчитать эффективную мощность конденсатора или конденсаторной батареи:

$$Q_{\text{supplied}} = Q_c \cdot \left(\frac{U_e}{U_n} \right)^2 \quad [9.11]$$

где:

- Q_c – реактивная мощность при номинальном напряжении U_n ;
- Q_{supplied} эффективная мощность при рабочем напряжении U_e .

Например, конденсатор с номиналом 100 квар, 500 В при напряжении 400 В будет генерировать реактивную мощность 64 квар.

По паспортным данным конденсатора можно рассчитать его характеристики:

Однофазная цепь

Таблица 9.1

Номинальный ток	$I_{cn} = \frac{Q_c}{V_n}$
Реактивное сопротивление	$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C}$
Ёмкость	$C = \frac{1}{\omega \cdot X_c} = \frac{Q_c}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_n^2}$

Трёхфазная цепь

В трёхфазных цепях конденсаторы соединяются звездой или треугольником; ниже приводятся формулы расчета мощности и номинального тока для обеих схем соединения.

Таблица 9.2

	Номинальный ток (линейный)	Ток через конденсаторную батарею	Мощность
	$I_{cn} = \omega \cdot C \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}}$	$I_c = I_{cn}$	$Q_c = \sqrt{3} \cdot I_{cn} \cdot U_n = \omega \cdot C \cdot U_n^2$
	$I_{cn} = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot C \cdot U_n$	$I_c = \omega \cdot C \cdot U_n$	$Q_c = \sqrt{3} \cdot I_{cn} \cdot U_n = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_n^2$

9.2.4 Разрядка конденсаторов

Конденсаторы необходимо монтировать так, чтобы обеспечить их разрядку при отключении, иначе на выводах будет сохраняться опасное для жизни напряжение.

Согласно стандарту МЭК 60252-2 установки коррекции коэффициента мощности двигателей могут эксплуатироваться без разрядных устройств, особенно если конденсаторы постоянно подключены к обмоткам двигателя, так как обмотки выполняют роль разрядного сопротивления. (В РФ действует гармонизированный стандарт ГОСТ Р МЭК 60252-2-2008 Конденсаторы для двигателей переменного тока. Часть 2. Пусковые конденсаторы). Разрядное устройство должно в течение 1 минуты с момента отключения конденсатора снизить напряжение на его выводах от номинального до значения не выше 50 В. Иногда разрядные устройства устанавливаются не из соображений безопасности, а для защиты конденсатора от перенапряжения: оно может возникнуть, если отключенный и все еще заряженный конденсатор подключается к другому конденсатору противоположной полярности⁴.

Стандарт МЭК 60364-5-55, (действующий в России стандарт по электроустановкам зданий) пункт 559.8, предписывает оснащать разрядными сопротивлениями компенсирующие конденсаторы с полной ёмкостью более 0,5 мкФ (при 400 В это соответствует 75 / 25 квар при соединении звездой / треугольником).

Резисторы должны быстро разрядить конденсатор, как только он будет отсоединен от сети. Рекомендуется оснащать разрядными сопротивлениями все конденсаторы мощностью выше 0,5 квар, независимо от напряжения питания.

Согласно стандарту МЭК 60831-1, пункт 22, все конденсаторы или конденсаторные батареи должны оснащаться устройствами, способными за 3 минуты разрядить каждый прибор от начального пикового значения, которое в $\sqrt{2}$ раз превосходит номинальное напряжение U_n , до напряжения не выше 75 В. В некоторых странах действуют более жесткие требования в отношении времени и остаточного напряжения.

Разрядное сопротивление для однофазного или многофазного конденсатора определяется соотношением:

$$R \leq \frac{t}{k \cdot C \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{2} \cdot U_n}{U_r} \right)} \quad [9.12]$$

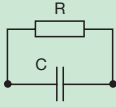
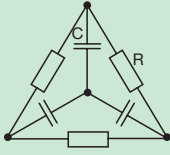
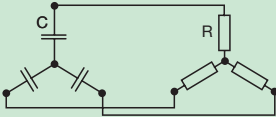
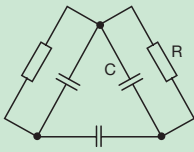
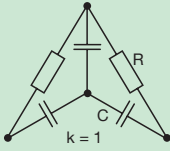
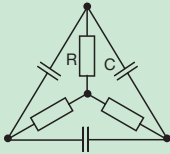
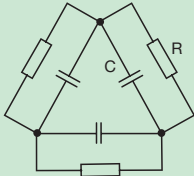
где:

- R – разрядное сопротивление, [Ом];
- t – время разряда от $\sqrt{2} U_n$ до U_r , [с];
- U_n – номинальное напряжение, [В];
- U_r – допустимое остаточное напряжение⁴, [В];
- k – коэффициент, который зависит от способа соединения резисторов с конденсаторами, см. табл. 9.3;
- C – ёмкость конденсаторной батареи, [Ф].

Чтобы выполнить требования стандарта МЭК 60831-1, в вышеприведенную формулу нужно подставить значения $t = 180$ с и $U_r = 75$ В.

⁴ В момент подачи питания остаточное напряжение не должно превышать 10 % от номинального.

Таблица 9.3

Соединение	k
	1
	$\frac{1}{3}$
	1
	3
 k = 1	1
	3
	1

10 Аппаратура АББ

10.1 Автоматические выключатели

АББ предлагает следующие серии автоматических выключателей в литом корпусе и воздушных автоматических выключателей, предназначенные для защиты и отключения конденсаторных батарей.

10.1.1 Автоматические выключатели в литом корпусе

Трехфазные автоматические выключатели серии Tmax отвечают требованиям стандарта IEC 60947-2 (ГОСТ Р 50030.2-99), оснащаются термомагнитными или электронными расцепителями, рассчитаны на токи от 1,6 А до 1600 А и обладают отключающими способностями от 16 кА до 200 кА при напряжении 400 В.

Доступны следующие типоразмеры автоматических выключателей:

- автоматические выключатели Tmax T1, T2, T3, T4 оснащенные термомагнитными расцепителями защиты типа TMD с регулируемой тепловой уставкой ($I = 0,7 \dots 1 I_n$) и фиксированной магнитной уставкой ($I = 10 I_n$) расцепителей;
- автоматические выключатели Tmax T4, T5, T6 оснащенные термомагнитными расцепителями типа TMA с регулируемой тепловой устав-

кой ($I = 0,7 \dots 1 I_n$) и электромагнитной уставкой ($I = 5 \dots 10 I_n$) расцепителей;

- автоматические выключатели Tmax T2, T4, T5, T6 оснащенные электронными расцепителями типа PR221DS;
- автоматические выключатели Tmax T4, T5, T6 оснащенные электронными расцепителями типа PR222DS/P, PR222DS/PD и PR223DS;
- автоматические выключатели Tmax T7 оснащенные электронными расцепителями типа PR231/P, PR232/P, PR331/P и PR332/P.



Характеристики автоматических выключателей Tmax, предназначенных для защиты конденсаторных батарей

		T1								T3	
Номинальный длительный ток, I_n	[А]	160								250	
Номинальное рабочее напряжение, U_e	[В]	690								690	
Номинальное импульсное выдерживаемое напряжение U_{imp}	[кВ]	8								8	
Номинальное напряжение изоляции U_i	[В]	800								800	
Испытательное напряжение при промышленной частоте, 1 мин.	[В]	3000								3000	
Номинальная предельная отключающая способность I_{cu}		B	C	N	N	S	H	L	N	S	
220-230 В, 50-60 Гц	[кА]	25	40	50	65	85	100	120	50	85	
380-400-415 В, 50-60 Гц	[кА]	16	25	36	36	50	70	85	36	50	
440 В, 50-60 Гц	[кА]	10	15	22	30	45	55	75	25	40	
500 В, 50-60 Гц	[кА]	8	10	15	25	30	36	50	20	30	
690 В, 50-60 Гц	[кА]	3	4	6	6	7	8	10	5	8	
Категория применения (МЭК 60947-2)		A				A				A	
Пригодность к разъединению		n				n				n	
Расцепитель: термомагнитный											
T регулируемый, M фиксированный	TMD	n				n				n	
T регулируемый, M регулируемый ($5 \dots 10 \times I_n$)	TMA	-				-				-	
электронный											
PR221DS		-				n				-	
PR222DS		-				-				-	
PR223DS		-				-				-	
PR231/P		-				-				-	
PR232/P		-				-				-	
PR331/P		-				-				-	
PR332/P		-				-				-	
Взаимозаменяемость		-				-				-	
Исполнение		F				F-P				F-P	

(1) $I_{cw} = 5$ кА - (2) $I_{cw} = 7,6$ кА (630 А) - 10 кА (800 А) - (3) Только для T7 800/1000/1250 А - (4) $I_{cw} = 20$ кА (типы S, H, L) - 15 кА (тип V)

Номинальные токи автоматических выключателей с двумя типами термомангнитных расцепителей

	T1 160	T2 160	T3 250	T4 250-320		T5 400-630	T6 630-800
In [A]	TMD	TMD	TMD	TMD	TMA	TMA	TMA
1,6		n					
2		n					
2,5		n					
3,2		n					
4		n					
5		n					
6,3		n					
8		n					
10		n					
12,5		n					
16	n	n					
20	n	n		n			
25	n	n					
32	n	n		n			
40	n	n					
50	n	n		n			
63	n	n	n				
80	n	n	n		n		
100	n	n	n		n		
125	n	n	n		n		
160	n	n	n		n		
200			n		n		
250			n		n		
320						n	
400						n	
500						n	
630							n
800							n

Термомангнитный расцепитель TMD – с регулируемой тепловой уставкой и нерегулируемой электромагнитной уставкой расцепителя.
Термомангнитный расцепитель TMA – с регулируемой тепловой и магнитной уставками расцепителя.

T4					T5					T6				T7			
250/320					400/630					630/800/1000				800/1000/1250/1600			
690					690					690				690			
8					8					8				8			
1000					1000					1000				1000			
3500					3500					3500				3500			
N	S	H	L	V	N	S	H	L	V	N	S	H	L	S	H	L	V ⁽³⁾
70	85	100	200	200	70	85	100	200	200	70	85	100	200	85	100	200	200
36	50	70	120	200	36	50	70	120	200	36	50	70	100	50	70	120	150
30	40	65	100	180	30	40	65	100	180	30	45	50	80	50	65	100	130
25	30	50	85	150	25	30	50	85	150	25	35	50	65	50	50	85	100
20	25	40	70	80	20	25	40	70	80	20	22	25	30	30	42	50	60
A					B (400A) ⁽¹⁾ - A (630A)					B (630A-800A) ⁽²⁾ - A (1000A)				B ⁽⁴⁾			
n					n					n				n			
n (до 50A)					-					-				-			
n (до 250A)					n (до 500A)					n (до 800A)				-			
n					n					n				-			
n					n					n				-			
n					n					n				-			
-					-					-				n			
-					-					-				n			
-					-					-				n			
n					n					n				n			
F-P-W					F-P-W					F-W				F-W			

10.1.2 Воздушные автоматические выключатели

Воздушные автоматические выключатели серии Emax E1...E6 отвечают требованиям стандарта IEC 60947-2 (ГОСТ Р 50030.2-99), рассчитаны на токи от 400 А до 6300 А, обладают отключающими способностями от 42 кА до 150 кА при напряжении 400 В и оснащаются электронными расцепителями PR121/P, PR122/P и PR123/P.

Автоматические выключатели Emax X1 рассчитаны на токи от 400 А до 1600 А, обладают отключающими способностями от 42 кА до 65 кА при напряжении 400 В и оснащаются электронными расцепителями PR331/P, PR332/P и PR333/P.



Характеристики воздушных автоматических выключателей Emax, предназначенных для защиты конденсаторных батарей

		E1		E2			E3				E4			E6		X1	
Номинальное рабочее напряжение Ue [В]		690		690			690				690			690		690	
Номинальное импульсное выдерживаемое напряжение Uimp [кВ]		12		12			12				12			12		12	
Номинальное напряжение изоляции Ui [В]		1000		1000			1000				1000			1000		1000	
Номинальный длительный ток, Iu		B	N	B	N	S	N	S	H	V	S	H	V	H	V	B	N
	[А]	800	800	1600	1000	800	2500	1000	800	800	4000	3200	3200	4000	3200	630	630
	[А]	1000	1000	2000	1250	1000	3200	1250	1000	1250		4000	4000	5000	4000	800	800
	[А]	1250	1250		1600	1250		1600	1250	1600				6300	5000	1000	1000
	[А]	1600	1600		2000	1600		2000	1600	2000					6300	1250	1250
	[А]					2000		2500	2000	2500						1600	1600
	[А]							3200	2500	3200							
	[А]								3200								
Номинальная предельная отключающая способность Icu																	
220-230-380-400-415 В, 50-60 Гц	[кА]	42	50	42	65	85	65	75	100	130	75	100	150	100	150	42	65
440 В, 50-60 Гц	[кА]	42	50	42	65	85	65	75	100	130	75	100	150	100	150	42	65
500 В, 50-60 Гц	[кА]	42	50	42	65	65	65	75	100	100	75	100	130	100	130	42	55
690 В, 50-60 Гц	[кА]	42	50	42	65	65	65	75	85	100	75	85	100	100	100	42	55
Номинальный кратковременно выдерживаемый ток (1с) Icw	[кА]	42	50	42	55	65	65	75	75	85	75	100	100	100	100	42	42
Категория применения (МЭК 60947-2)		B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Пригодность к разъединению		n		n			n				n			n		n	
Исполнение		F-W		F-W			F-W				F-W			F-W		F-W	

Номинальные токи автоматических выключателей с различными типами электронных расцепителей

	In [А]	10	25	63	100	160	250	320	400	630	800	1000	1250	1600
PR221DS	T2	n	n	n	n	n								
	T4				n	n	n	n						
	T5							n	n	n				
	T6									n	n	n		
PR222DS/P	T4				n	n	n	n						
PR222DS/PD	T5							n	n	n				
PR223DS	T6									n	n	n		
PR231/P PR232/P PR331/P PR332/P	T7								n	n	n	n	n	n

	In [А]	400	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000	5000	6300
PR121/P PR122/P PR123/P	E1	n	n	n	n	n	n						
	E2	n	n	n	n	n	n	n					
	E3	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n		
	E4			n	n	n	n	n	n	n	n		
	E6			n	n	n	n	n	n	n	n	n	n
PR331/P PR332/P PR333/P	X1	n	n	n	n	n	n						
		n	n	n	n	n	n						
		n	n	n	n	n	n						

10.2 Контактторы

АББ предлагает три типа контакторов, рассчитанных на различные пиковые токи включения и мощности конденсаторных батарей:

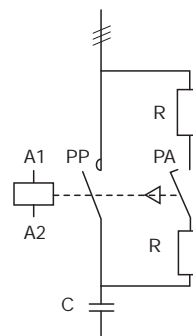
- *UA..RA* – 3-полюсные контакторы с неограниченным пиковым током;
- *UA* – 3-полюсные контакторы с пиковым током не более 100-кратного номинального тока;
- *A* и *AF* – стандартные 3-полюсные контакторы для включения отдельной конденсаторной батареи с пиковым током не более 30-кратного номинального тока.

10.2.1 Контактторы UA..RA

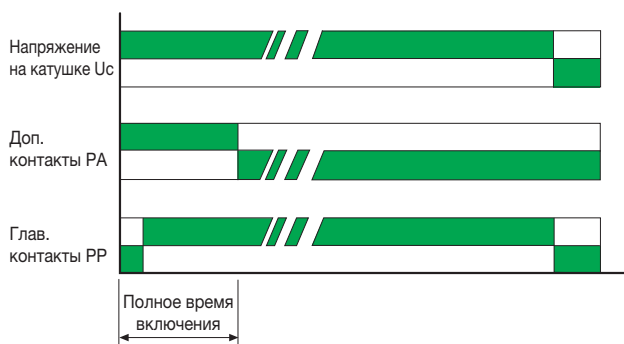
Контакторы UA..RA применяются в установках, где пиковые токи значительно превосходят 100-кратное значение номинального тока. Они оснащены токоограничивающими резисторами, поэтому их можно применять без дополнительных реакторов. Конденсаторы должны быть разряжены перед повторным включением (максимальное остаточное напряжение на выводах менее 50 В). Электрическая износостойкость контакторов составляет 250 000 циклов для $U_e \leq 440$ В и 100 000 циклов для $500 \text{ В} \leq U_e \leq 690$ В. На фронтальной части UA..RA расположен специальный блок с дополнительными контактами опережающего включения и тремя токоограничивающими резисторами. Эти резисторы снижают первый бросок тока в момент включения конденсаторной батареи. Пиковый ток при замыкании главных контактов снижается за счет того, что конденсаторы уже частично зарядились.

Когда на катушку контактора подается питание, замыкаются дополнительные контакты опережающего включения PA, и конденсатор соединяется с сетью через резисторы (см. схему внизу).

Рисунок 10.1.



После замыкания главных контактов PP дополнительные контакты автоматически размыкаются, и отключают резисторы (см. следующую диаграмму).



Контакторы UA..RA для коммутации конденсаторов (UA16RA...UA110RA)

Подключение токоограничивающих резисторов защищает контактор и конденсатор от высокого зарядного тока.



10.2.2 Контакторы UA

Контакторы UA применяются для коммутации конденсаторных батарей, пиковый ток которых не превосходит 100-кратного номинального тока. Конденсаторы требуется разряжать, при этом условии износостойкость контакторов составляет до 100 000 циклов для $U_e \leq 690$ В.

10.2.3 Контакторы A и AF

Контакторы A и AF применяются для коммутации конденсаторных батарей, пусковой ток которых ниже 30-кратного номинального тока. Конденсаторы требуется разряжать перед повторным включением, при этом условии износостойкость контакторов составляет до 100 000 циклов.

Контакторы UA для коммутации конденсаторов (UA16...UA110)

Допустимый максимальный пиковый ток I не более 100-кратного номинального тока конденсатора.



Стандартные контакторы A и AF (A12...A300 и AF50...AF750)

Допустимый максимальный пиковый ток I ниже 30-кратного номинального тока конденсатора



10.3 Автоматические установки компенсации реактивной мощности

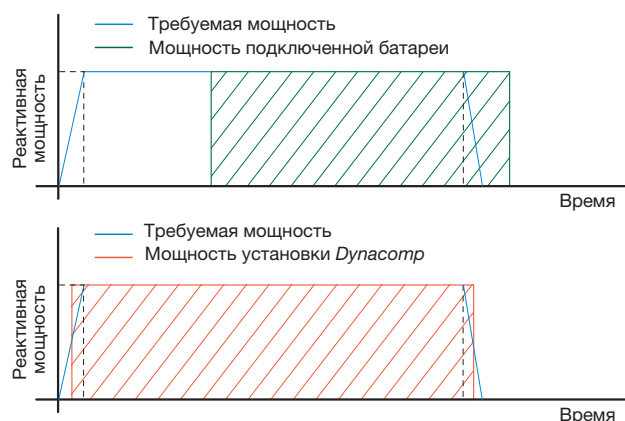
АББ предлагает следующие автоматические установки компенсации реактивной мощности:

- **серия APC**, статические компенсаторы с контакторами для коммутации конденсаторных батарей. Данные установки могут оснащаться антирезонансными реакторами и идеально подходят для коррекции коэффициента мощности медленно меняющихся переменных нагрузок. Они способны генерировать реактивную мощность от 25 до 800 квар с регулированием уставки от опережающего $\cos\varphi = 0,7$ до отстающего $\cos\varphi = 0,7$ и имеют номинальное напряжение до 690 В.
- **серия Dynacomp**, статические компенсаторы, оборудованные ёмкостными и индуктивными компонентами, которые подключаются к сети с помощью бесконтактных выключателей. Установки *Dynacomp* обеспечивают адекватную компенсацию реактивной мощности в сетях с резкопеременной нагрузкой, способны генерировать реактивную мощность до 400 квар и имеют номинальное напряжение до 690 В.

Высокое быстродействие встречно-параллельных тиристоров позволяет избежать больших токов при переходных процессах. При этом управление осуществляется так, что установка не генерирует нежелательных гармоник. Традиционные конденсаторные батареи оборудованы разрядными резистора-

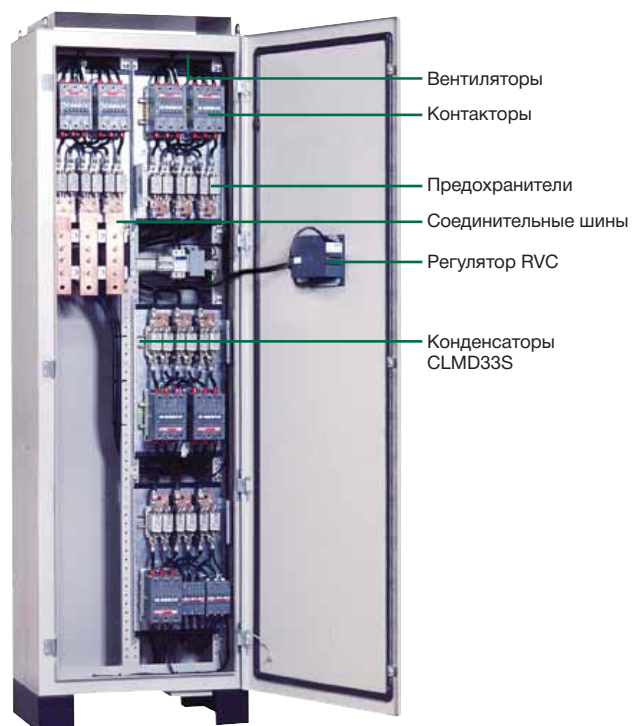
ми, которые ограничивают остаточное напряжение при отключении.

Такое срабатывание требует нескольких секунд, т. е. компенсация реактивной мощности может запаздывать, особенно в установках с часто меняющимся потреблением реактивной мощности. Компенсаторы *Dynacomp*, благодаря применению тиристоров, гораздо быстрее реагируют на потребности сети в реактивной мощности. Эти различия иллюстрируются двумя следующими графиками.

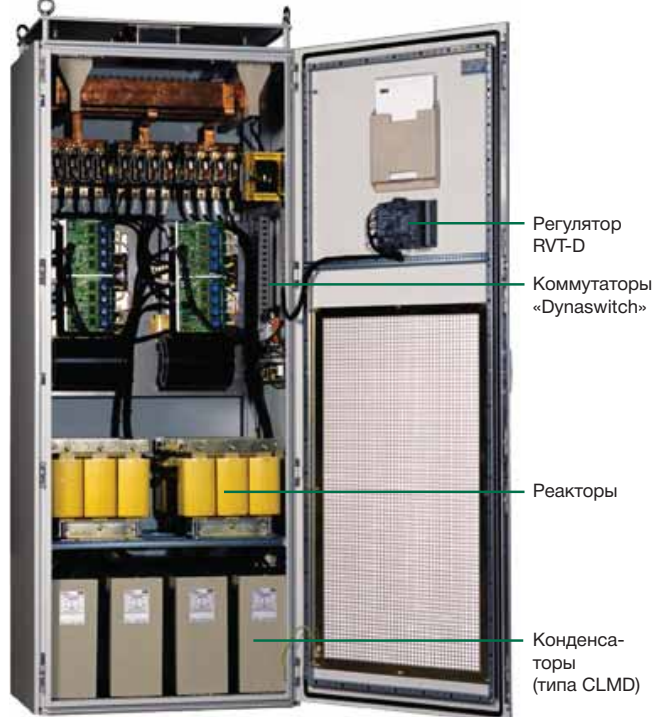


Dynacomp состоит из конденсаторов, реакторов, коммутаторов «Dynaswitch» и электронной системы управления (см. рисунок). Эти компоненты установлены в шкафу вместе со вспомогательными аппаратами. Перед отгрузкой заказчику комплектная система проходит заводские испытания.

APC



Dynacomp

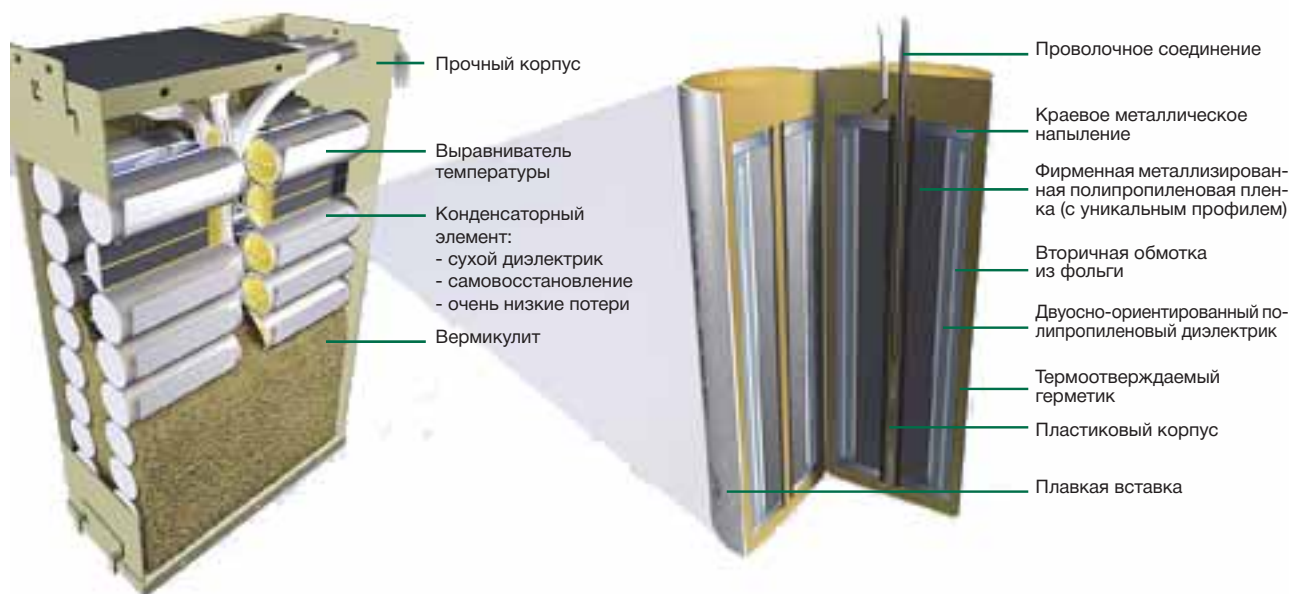


Широкий диапазон сетевых напряжений, гибкое регулирование мощности, модульная конструкция, наличие антирезонансных реакторов и другие особенности делают «Dynasotr» идеальным решением для всех установок, где требуется быстро и без бросков тока менять реактивную мощность.

Конденсаторы CLMD состоят из большого числа рулонных элементов, выполненных из металлизированной полипропиленовой пленки. Они оснащены собственными разрядными резисторами, которые менее чем за минуту снижают остаточное напряжение до 50 В. Данные конденсаторы обладают рядом преимуществ. Отсутствие пропиточной жидкости исключает опасность протечки и загрязнения окружающей среды. Металлизированная полипропиленовая пленка обеспечивает высокую стойкость к перенапряжению и пиковому току, способность к самовосстановлению, низкие потери и высокую стабильность ёмкости.

Для улучшения электрических характеристик элементы конденсатора заключены в герметичный пластиковый корпус и вакуумированы. Каждый элемент снабжен системой защиты, которая гарантирует безопасное избирательное отключение от цепи после выработки ресурса.

И наконец, эти элементы заключены в корпус из листовой стали, заполненный инертным огнестойким материалом, и подключены таким способом, который обеспечивает генерирование требуемой мощности (однофазной или трехфазной) без отклонений по напряжению или частоте.



10.4 Фильтры PQF

Фильтры PQF (*Power Quality Filters*) производства АББ выполняют тройную функцию – фильтруют гармоники, компенсируют реактивную мощность и симметрируют напряжения.

Фильтры PQF нечувствительны к значительным изменениям полного сопротивления сети, их измерительные устройства в реальном времени контролируют линейный ток и подают сигналы на цифровую систему управления, которая вырабатывает ШИМ-сигналы, управляющие силовыми IGBT-модулями. Постоянная составляющая тока этих модулей подается конденсаторами, и в сеть поступают гармоники тока, противоположные тем, которые требуется отфильтровать.

PQF фильтры могут оснащаться средствами связи, соответствующими коммуникационной сети заказчика, от дискретных входов-выходов до терминалов Modbus.

Принцип действия фильтров представлен на двух следующих иллюстрациях.

Функция симметрирования напряжений выравнивает ток во всех трех фазах, уменьшая ток в нулевом рабочем проводнике.

Режим компенсации реактивной мощности позволяет поддерживать требуемое значение коэффициента мощности для индуктивных или ёмкостных нагрузок. Замкнутая система управления обеспечивает точную и надежную работу аппарата без применения внешних измерительных устройств.

Основные технические преимущества PQF фильтров:

- одновременная фильтрация до 20 гармоник;
- фильтрация гармоник до 50-го порядка;
- коэффициент подавления гармоник выше 97 %;
- высокая точность, обеспеченная замкнутой системой управления;
- автоматическая адаптация к изменениям полного сопротивления сети;
- фильтрация без генерирования реактивной мощности;
- генерирование реактивной мощности и коррекция коэффициента мощности;
- равномерное распределение нагрузки по фазам.

Рисунок 10.2.

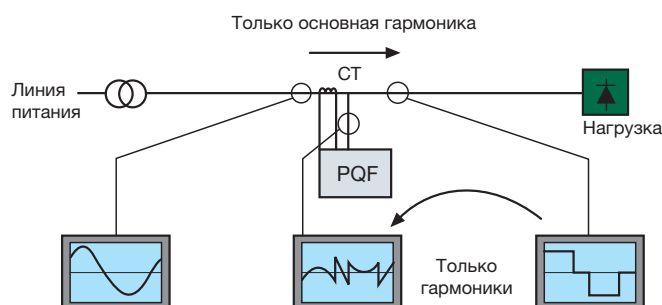


Рисунок 10.3.



PQF фильтры делятся на следующие группы:

- **Фильтры PQFI** – активные фильтры для мощных промышленных нагрузок. Активные фильтры для трехпроводных и четырехпроводных трехфазных сетей, выполняющие фильтрацию гармоник и компенсацию реактивной мощности, включая симметрирование напряжений. На рисунке представлен PQFI и перечислены его основные технические особенности.

Эти фильтры обладают следующими техническими характеристиками:

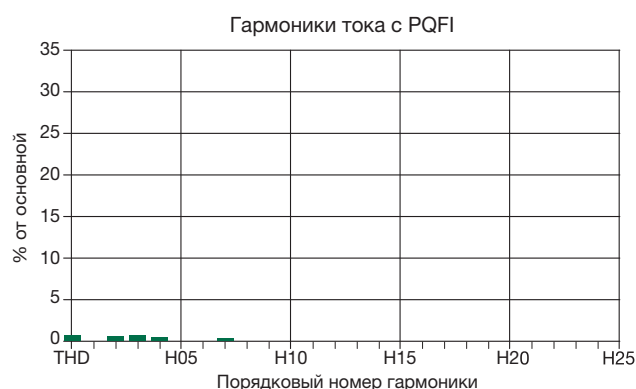
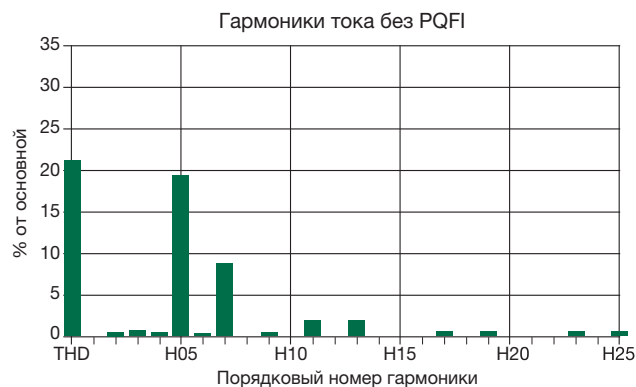
- Номинальный ток:

$208\text{ В} \leq U \leq 480\text{ В}$	$480\text{ В} \leq U \leq 690\text{ В}$
250 А	180 А*
450 А	320 А*

* Если напряжение системы выше 600 В, то при определенных режимах нагрузки и при температуре окружающей среды выше 30 °С ток аппаратов PQFI может автоматически снижаться относительно номинального значения.

- Фильтруемые гармоники: 20 гармоник от 2-го до 50-го порядка.
- Реактивная мощность: уставка от опережающего $\cos\phi = 0,6$ до отстающего $\cos\phi = 0,6$.

Типичные результаты применения PQFI



- Фильтры PQFM – активные фильтры для промышленных нагрузок меньшей мощности. Активные фильтры для трехпроводных и четырехпроводных трехфазных сетей, выполняющие фильтрацию гармоник и компенсацию реактивной мощности, включая симметрирование напряжений.

Эти фильтры обладают следующими техническими характеристиками:

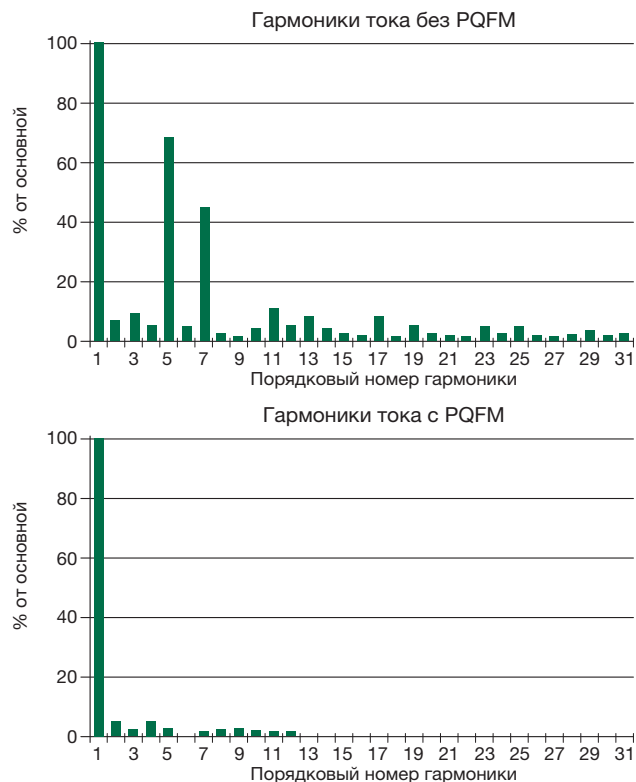
- Номинальный ток:

$208\text{ В} \leq U \leq 480\text{ В}$	$480\text{ В} \leq U \leq 690\text{ В}$
70 А	100 А*
100 А	-
130 А	-
150 А	-

* Если напряжение системы выше 600 В, то при определенных режимах нагрузки и при температуре окружающей среды выше 30 °С ток аппаратов PQFM может автоматически снижаться относительно номинального значения.

- Фильтруемые гармоники: 20 гармоник от 2-го до 50-го порядка.
- Реактивная мощность: уставка от опережающего $\cos\varphi = 0,6$ до отстающего $\cos\varphi = 0,6$.

Типичные результаты применения PQFM



- Фильтры PQFK – Активные фильтры для сетей коммерческих объектов. Активные фильтры для четырехпроводных трехфазных сетей, выполняющие фильтрацию гармоник, компенсацию реактивной мощности и симметрирование фазных и линейных напряжений.

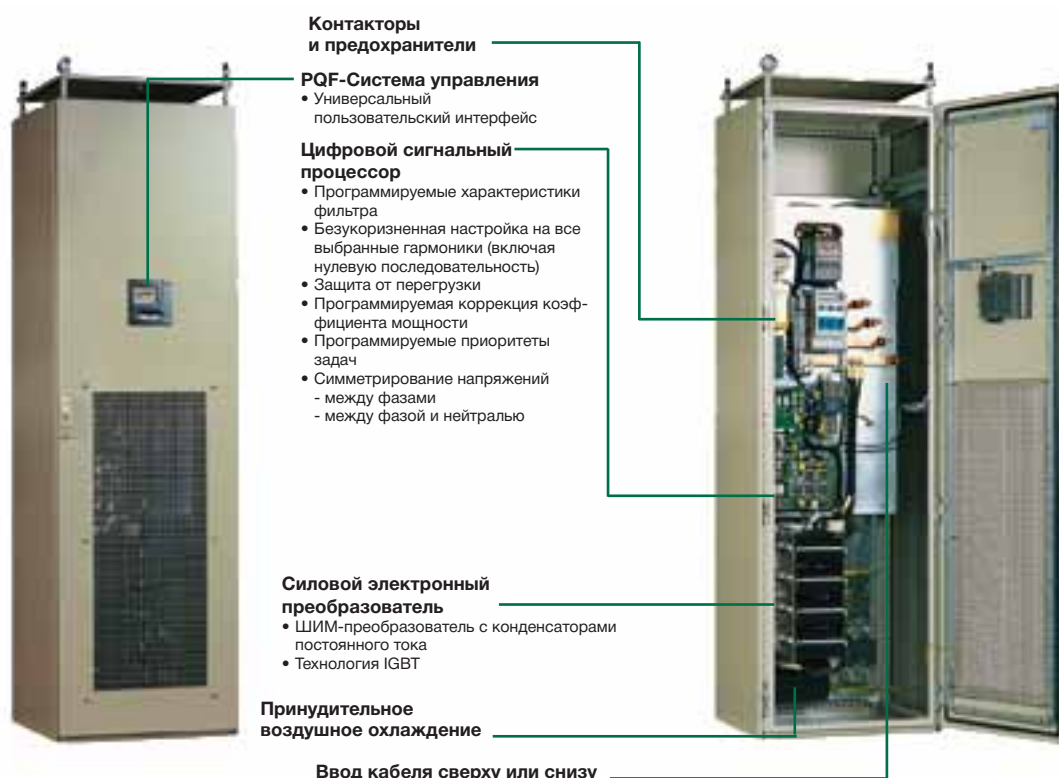
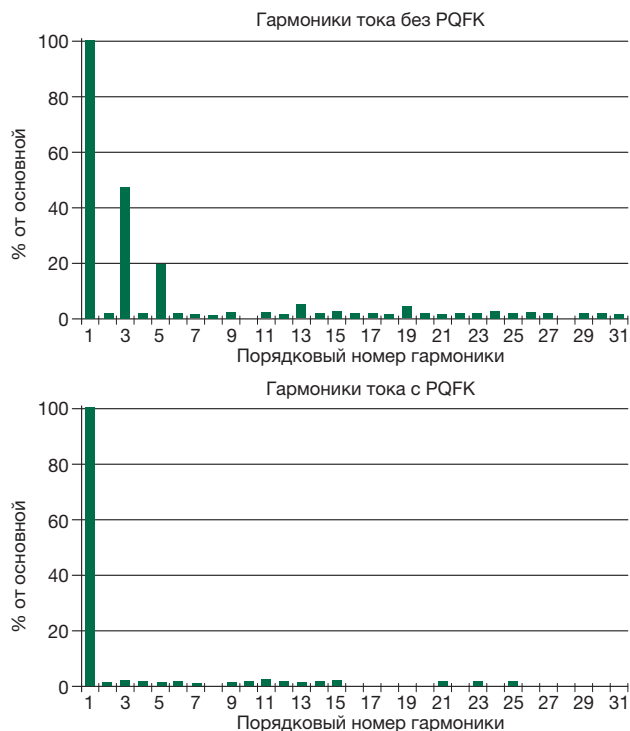
Эти фильтры обладают следующими техническими характеристиками:

- Номинальный ток:

208 В ≤ U ≤ 415 В
70 А
100 А

- Фильтруемые гармоники: 15 гармоник от 2-го до 50-го порядка.
- Реактивная мощность: уставка от опережающего $\cos\varphi = 0,6$ до отстающего $\cos\varphi = 0,6$.

Типичные результаты применения PQFK



- **Фильтры PQFS** – Активные фильтры для трехпроводных и четырехпроводных сетей коммерческих, жилых и маломощных промышленных объектов. Активные фильтры для четырехпроводных трехфазных сетей, выполняющие фильтрацию гармоник, компенсацию реактивной мощности и симметрирование фазных и линейных напряжений.

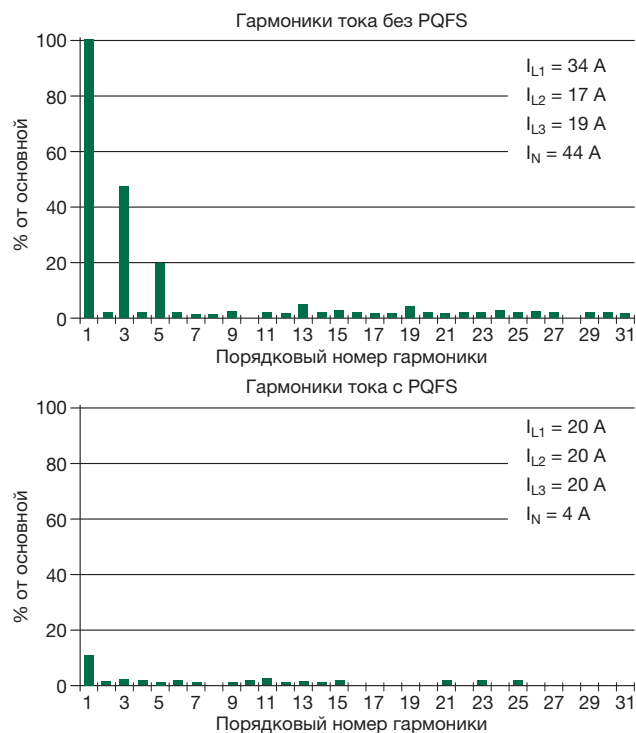
Эти фильтры обладают следующими техническими характеристиками:

- Номинальный ток:

$208 \text{ В} \leq U \leq 240 \text{ В}$	$380 \text{ В} \leq U \leq 415 \text{ В}$
30 А	30 А
45 А	45 А
60 А	60 А
70 А	70 А
80 А	80 А
90 А	90 А
100 А	100 А

- Фильтруемые гармоники:
 - 3-проводная сеть: 20 гармоник от 2-го до 50-го порядка;
 - 4-проводная сеть: 15 гармоник от 2-го до 50-го порядка.
- Реактивная мощность: установка от опережающего $\cos\varphi = 0,6$ до отстающего $\cos\varphi = 0,6$.

Типичные результаты применения PQFS



Компактное устройство настенного крепления для 3- и 4-проводных сетей

PQF-Система управления

- Универсальный пользовательский интерфейс

Цифровой сигнальный процессор

- Программируемые характеристики фильтра
- Безукоризненная настройка на все выбранные гармоники
- Защита от перегрузки
- Программируемая коррекция коэффициента мощности
- Симметрирование напряжений
- Возможность фильтрации реактивной мощности нулевой последовательности
- Программируемые приоритеты задач

Силовой электронный преобразователь

- ШИМ-преобразователь с конденсаторами постоянного тока
- Технология IGBT

Ввод кабеля снизу

Приложение А

Таблицы подбора автоматических выключателей и контакторов

В следующих таблицах представлена координация между контакторами и автоматическими выключателями Tmax, предлагаемых компанией АББ для коммутации и защиты конденсаторных батарей мощностью до 400 квар. Устройства рассчитаны на ток короткого замыкания 50 кА при напряжениях до 500 В и 10 кА

при напряжениях до 690 В и обеспечивают координацию типа 2. Номинальные токи автоматического выключателя и контактора выбираются в соответствии с максимальным потребляемым током конденсаторной батареи ($I_{сmax}$) согласно требованиям стандарта МЭК 60831-1¹. Для уменьшения пускового тока необходимо установить ограничивающий реактор.

¹ Напомним, что координация типа 2 допускает сваривание контактов при условии, что контакты можно будет легко разделить (например, отверткой) без их деформации

Таблица А.1

Автоматический выключатель и контактор с координацией типа 2 для коммутации конденсаторных батарей 400 В, 50 кА

Q _c [квар]	I _{сн} [А]	I _{сmax} [А]	MCCB Tmax	I _n [А]	Контактор
10	14	21	T2S160 TMD 25	25	A30
15	22	31	T2S160 TMD 40	40	A/AF50
20	29	41	T2S160 TMD 50	50	A/AF50
30	43	62	T2S160 TMD 80	80	A/AF63
40	58	83	T2S160 TMD 100	100	A/AF63
50	72	103	T2S160 TMD 125	125	A/AF95
60	87	124	T2S160 TMD 160	160	A/AF95
70	101	144	T2S160 TMD 160*	160	A/AF110
80	115	165	T3S250 TMD 200	200	A/AF145
90	130	186	T3S250 TMD 200	200	A/AF145
110	159	217	T3S250 TMD 250	250	A/AF185
130	188	256	T4S320 PR221LI In=320	320	A/AF210
150	217	296	T4S320 PR221LI In=320	320	A/AF260
180	260	355	T5S400 PR221LI In=400	400	AF400
200	289	394	T5S400 PR221LI In=400	400	AF400
250	361	493	T6S630 PR221LI In=630	630	AF580
280	404	552	T6S630 PR221LI In=630	630	AF580
300	433	591	T6S630 PR221LI In=630	630	AF750
350	505	690	T6S800 PR221LI In=800	800	AF750
400	577	788	T6S800 PR221LI In=800	800	AF750

* Для втычного исполнения мощность конденсаторной батареи уменьшается на 10 %

Таблица А.2

Автоматический выключатель и контактор с координацией типа 2 для коммутации конденсаторных батарей 440 В, 50 кА

Q _c [квар]	I _{сн} [А]	I _{сmax} [А]	MCCB Tmax	I _n [А]	Контактор
10	13	19	T2H160 TMD 25	25	A/AF50
15	20	28	T2H160 TMD 32	32	A/AF50
20	26	38	T2H160 TMD 40	40	A/AF50
30	39	56	T2H160 TMD 63	63	A/AF50
40	52	75	T2H160 TMD 100	100	A/AF95
50	66	94	T2H160 TMD 125	125	A/AF95
60	79	113	T2H160 TMD 125	125	A/AF95
70	92	131	T2H160 TMD 160	160	A/AF110
80	105	150	T2H160 TMD 160*	160	A/AF145
90	118	169	T4H250 PR221LI In=250	250	A/AF145
110	144	197	T4H250 PR221LI In=250	250	A/AF185
130	171	233	T4H250 PR221LI In=250	250	A/AF210
150	197	269	T4H320 PR221LI In=320	320	A/AF260
180	236	322	T5H400 PR221LI In=400	400	A/AF300
200	262	358	T5H400 PR221LI In=400	400	AF400
250	328	448	T6H630 PR221LI In=630	630	AF460
280	367	502	T6H630 PR221LI In=630	630	AF580
300	394	537	T6H630 PR221LI In=630	630	AF580
350	459	627	T6H800 PR221LI In=800	800	AF750
400	525	716	T6H800 PR221LI In=800	800	AF750

* Для втычного исполнения мощность конденсаторной батареи уменьшается на 10 %

Таблица А.3

Автоматический выключатель и контактор с координацией типа 2 для коммутации конденсаторных батарей 500 В, 50 кА

Q_c [квар]	I_{cn} [А]	I_{cmax} [А]	MCCB Tmax	I_n [А]	Контактор
10	12	17	T2L160 TMD 20	20	A/AF50
15	17	25	T2L160 TMD 32	32	A/AF50
20	23	33	T2L160 TMD 40	40	A/AF50
30	35	50	T2L160 TMD 63	63	A/AF63
40	46	66	T2L160 TMD 80	80	A/AF75
50	58	83	T2L160 TMD 100	100	A/AF95
60	69	99	T2L160 TMD 125	125	A/AF95
70	81	116	T2L160 TMD 125	125	A/AF95
80	92	132	T2L160 TMD 160	160	A/AF110
90	104	149	T2L160 TMD 160*	160	A/AF145
110	127	173	T4H250 PR221LI In=250	250	A/AF145
130	150	205	T4H250 PR221LI In=250	250	A/AF185
150	173	236	T4H250 PR221LI In=250	250	A/AF210
180	208	284	T4H320 PR221LI In=320	320	A/AF260
200	231	315	T5H400 PR221LI In=400	400	A/AF300
250	289	394	T5H400 PR221LI In=400	400	AF400
280	323	441	T6H630 PR221LI In=630	630	AF460
300	346	473	T6H630 PR221LI In=630	630	AF460
350	404	552	T6H630 PR221LI In=630	630	AF580
400	462	630	T6H800 PR221LI In=800	800	AF750

* Для втычного исполнения мощность конденсаторной батареи уменьшается на 10 %

Таблица А.4

Автоматический выключатель и контактор с координацией типа 2 для коммутации конденсаторных батарей 690 В, 10 кА

Q_c [квар]	I_{cn} [А]	I_{cmax} [А]	MCCB Tmax	I_n [А]	Контактор
10	8	12	T2L160 TMD 16	16	A/AF50
15	13	18	T2L160 TMD 20	20	A/AF50
20	17	24	T2L160 TMD 25	25	A/AF50
30	25	36	T2L160 TMD 40	40	A/AF50
40	33	48	T2L160 TMD 50	50	A/AF63
50	42	60	T2L160 TMD 63	63	A/AF63
60	50	72	T2L160 TMD 80	80	A/AF75
70	59	84	T2L160 TMD 100	100	A/AF95
80	67	96	T2L160 TMD 100	100	A/AF95
90	75	108	T2L160 TMD 125	125	A/AF110
110	92	126	T2L160 TMD 160	160	A/AF145
130	109	148	T2L160 TMD 160*	160	A/AF185
150	126	171	T4N250 PR221LI In=250	250	A/AF210
180	151	206	T4N250 PR221LI In=250	250	A/AF260
200	167	228	T4N250 PR221LI In=250	250	A/AF260
250	209	286	T4N320 PR221LI In=320	320	AF400
280	234	320	T5N400 PR221LI In=400	400	AF400
300	251	343	T5N400 PR221LI In=400	400	AF400
350	293	400	T6N630 PR221LI In=630	630	AF460
400	335	457	T6N630 PR221LI In=630	630	AF580

* Для втычного исполнения мощность конденсаторной батареи уменьшается на 10 %

В следующей таблице представлены воздушные автоматические выключатели для коммутации и защиты конденсаторов. Используемые обозначения:

- N_{mech} механическая износостойкость;
- f_{mech} частота коммутаций без нагрузки, [цикл/час]
- N_{el} коммутационная износостойкость при напряжении 440 В;
- f_{el} частота коммутаций под нагрузкой, [цикл/ час]

В данном случае в связи с большой мощностью конденсаторной батареи коммутация посредством контактора не предусматривается; напротив, для комму-

тации предполагается использовать воздушный автоматический выключатель, поскольку число циклов коммутаций будет ограничено.

Кроме того, точное значение ожидаемого тока короткого замыкания не устанавливается, поэтому отключающую способность автоматического выключателя нужно выбирать в соответствии с номинальной мощностью батареи.

В этом случае также может понадобиться установка токоограничивающих реакторов для уменьшения пускового тока.

Таблица А.5

	I_{CBn}	I_{cn}	Q_c [квар]				N_{mech}	f_{mech}	N_{el}	f_{el}
Автоматический выключатель	[А]	[А]	400 В	440 В	500 В	690 В		[цикл/час]		[цикл/час]
X1 B-N	630	421	291	320	364	502	12500	60	6000	30
X1 B-N	800	533	369	406	461	637	12500	60	6000	30
X1 B-N	1000	666	461	507	576	795	12500	60	4000	30
X1 B-N	1250	834	578	636	722	997	12500	60	4000	30
X1 B-N	1600	1067	739	813	924	1275	12500	60	3000	30
E1 B-N	800	533	369	406	461	637	25000	60	10000	30
E1 B-N	1000	666	461	507	576	795	25000	60	10000	30
E1 B-N	1250	834	578	636	722	997	25000	60	10000	30
E1 B-N	1600	1067	739	813	924	1275	25000	60	10000	30
E2 B-N-S	800	533	369	406	461	637	25000	60	15000	30
E2 B-N-S	1000	666	461	507	576	795	25000	60	15000	30
E2 B-N-S	1250	834	578	636	722	997	25000	60	15000	30
E2 B-N-S	1600	1067	739	813	924	1275	25000	60	12000	30
E2 B-N-S	2000	1334	924	1017	1155	1594	25000	60	10000	30
E3 N-S-H-V	800	533	369	406	461	637	20000	60	12000	20
E3 N-S-H-V	1000	666	461	507	576	795	20000	60	12000	20
E3 N-S-H-V	1250	834	578	636	722	997	20000	60	12000	20
E3 N-S-H-V	1600	1067	739	813	924	1275	20000	60	10000	20
E3 N-S-H-V	2000	1334	924	1017	1155	1594	20000	60	9000	20
E3 N-S-H-V	2500	1667	1155	1270	1444	1992	20000	60	8000	20
E3 N-S-H-V	3200	2134	1478	1626	1848	2550	20000	60	6000	20
E4 S-H-V	3200	2134	1478	1626	1848	2550	15000	60	7000	10
E6 H-V	3200	2134	1478	1626	1848	2550	12000	60	5000	10

Приложение В

Реактивная мощность при изменениях напряжения

Реактивная мощность трехфазной батареи конденсаторов, соединенных треугольником или звездой, равна:

$$Q_{c\Delta} = 3 \cdot \frac{U_n^2}{X_c} \quad Q_{cY} = \frac{U_n^2}{X_c} \quad [B.1]$$

Если напряжение фиксировано, то для изменения генерируемой реактивной мощности нужно изменить ёмкостное сопротивление X_c , т. е. ёмкость установленных конденсаторов. И наоборот, если ёмкость конденсаторной батареи фиксирована, реактивная мощность изменяется пропорционально квадрату напряжения. Фактически, если известна реактивная мощность Q_{c1} при напряжении U_{n1} , то реактивная мощность при напряжении U_{n2} рассчитывается по формуле¹:

$$Q_{c2} = Q_{c1} \cdot \left(\frac{U_{n2}}{U_{n1}} \right)^2 \quad [B.2]$$

Эта формула действительна независимо от способа соединения конденсаторов. Чтобы поддерживать постоянную генерируемую реактивную мощность при изменении напряжения, нужно изменять ёмкость конденсаторов согласно следующему соотношению:

$$C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{U_{n1}}{U_{n2}} \right)^2 \quad [B.3]$$

Допустим, питающее напряжение меняется в пределах $\pm 10\%$ от номинального и $\cos\varphi$ необходимо поддерживать равным 0,9 даже при минимальном напряжении. В этом случае ёмкость конденсаторной батареи (при той же реактивной мощности нагрузки) должна составить 124 % от той, что требуется при номинальном напряжении. Из предыдущей формулы следует, что:

$$C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{U_{n1}}{0.9 \cdot U_{n1}} \right)^2 \rightarrow C_2 = C_1 \cdot \left(\frac{1}{0.81} \right) \rightarrow C_2 = 1.24 \cdot C_1 \quad [B.4]$$

Кроме того, нужно убедиться, что генерируемая реактивная мощность² не превысит той, которая потребляется нагрузкой, если при такой ёмкости напряжение увеличится на 10 % относительно номинального.

Для этого примем, что при напряжении 90 % от номинального коэффициент мощности равен 0,9, и выразим потребляемую нагрузкой активную мощность P (которая остается неизменной) как функцию реактивной мощности нагрузки Q и компенсирующей реактивной мощности Q_c ³:

$$Q - Q_{c_{90\%}} = P \cdot \operatorname{tg}\varphi \rightarrow P = \frac{Q - Q_{c_{90\%}}}{0.49} = \frac{Q - Q_c}{0.49} \quad [B.5]$$

Если напряжение повышено на 10 % относительно номинального, а ёмкость – на 24 %, то при соединении треугольником реактивная мощность будет равна:

$$Q_{c_{110\%}} = 3 \cdot \omega \cdot 1.24 \cdot C_1 \cdot (1.1 \cdot V_n)^2 = \dots \rightarrow 1.24 \cdot 1.1^2 \cdot 3 \cdot \omega \cdot C_1 \cdot V_n^2 = 1.5 \cdot Q_c \quad [B.6]$$

Чтобы не отдавать в сеть реактивную мощность, нужно выполнить следующее условие:

$$Q - Q_{c_{110\%}} = P \cdot \operatorname{tg}\varphi' \rightarrow \operatorname{tg}\varphi' = \frac{Q - Q_{c_{110\%}}}{P} > 0 \quad [B.7]$$

Заменяя P выражением [B.5] и вводя [B.6], получаем:

$$\operatorname{tg}\varphi' = \frac{0.49 \cdot (Q - 1.5 \cdot Q_c)}{Q - Q_c} > 0 \quad [B.8]$$

Поскольку знаменатель положителен в силу ранее выполненных условий, соотношение будет положительным, если положителен числитель, то есть:

$$0.49 \cdot (Q - 1.5 \cdot Q_c) > 0 \rightarrow Q_c < 0.66 \cdot Q \quad [B.9]$$

Итак, сначала рассчитываем значение Q_c , которое обеспечит коррекцию коэффициента мощности при номинальном напряжении; затем находим соответствующую ёмкость C_1 и умножаем на 1,24, чтобы получить такую же компенсацию реактивной мощности при предельно допустимом понижении напряжения; наконец, с помощью неравенства [B.9] убеждаемся, что в случае повышения напряжения на 10 % относительно номинального реактивная мощность не будет отдаваться в сеть.

Если компенсация реактивной мощности производится, как обычно, для 100 %, а не для 90 % номинального напряжения, то выражение [B.6] принимает вид:

$$Q_{c_{110\%}} = 3 \cdot \omega \cdot C_1 \cdot (1.1 \cdot V_n)^2 = 1.21 \cdot Q_c \quad [B.10]$$

а условие [B.9], при котором реактивная мощность не будет отдаваться в сеть, соответственно:

$$0.49 \cdot (Q - 1.21 \cdot Q_c) > 0 \rightarrow Q_c < 0.83 \cdot Q \quad [B.11]$$

¹ $Q_{c1} = 3 \cdot \frac{U_{n1}^2}{X_c}$ $Q_{c2} = 3 \cdot \frac{U_{n2}^2}{X_c}$
Ёмкостное сопротивление фиксировано, и приравняв его значения, найденные из обоих приведенных уравнений, получаем [B.2].

² $\cos\varphi = 0.9 \rightarrow \operatorname{tg}\varphi = 0.49$

³ $Q_{c_{90\%}} = 3 \cdot \omega \cdot 1.24 \cdot C_1 \cdot (0.9 \cdot V_n)^2 = Q_c$

Приложение С

Фильтрация и коррекция коэффициента мощности в условиях длительного искажения синусоидальности формы тока и напряжения

С.1 Введение

В современных электроустановках часто присутствуют нелинейные нагрузки, которые генерируют гармоники тока, поэтому коррекцию коэффициента мощности необходимо выполнять в условиях искажения синусоидальности формы кривых. Если загрязнение гармониками достигает неприемлемого уровня и для их подавления приходится устанавливать L-С фильтры, имеет смысл использовать эти фильтры для коррекции коэффициента мощности на основной частоте: правильно рассчитанные фильтры способны генерировать всю требуемую реактивную мощность и устранить необходимость установки специальных конденсаторных батарей. Ниже мы рассмотрим такие рабочие условия и характеристики соответствующих фильтров, но прежде нужно напомнить некоторые формулы и определения, которые понадобятся для этого анализа.

С.2 Количественный анализ длительной несинусоидальности формы напряжения

Периодическая кусочно-непрерывная ограниченная величина может быть преобразована в ряд Фурье по следующей формуле:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos nx + b_n \cdot \sin nx) \quad [C.1]$$

где первый член правой части равенства представляет собой среднее значение функции за период T , то есть:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T f(x) \cdot dx \quad [C.2]$$

а коэффициенты a_n и b_n этого ряда заданы выражениями:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cdot \cos nx \cdot dx \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(x) \cdot \sin nx \cdot dx \quad [C.3]$$

Преобразование функции времени в ряд Фурье можно выполнить так, чтобы он содержал только косинусы:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \cos(k\omega t - \vartheta_k) \quad [C.4]$$

Теперь от общих величин перейдем к рассмотрению электрических величин, таких как напряжение и ток, в сетях переменного тока (где их среднее значение будет нулевым, $\frac{a_0}{2} = 0$). В установившейся

несинусоидальной системе эти величины можно представить как ряд гармоник с частотами, кратными основной, согласно следующей формуле¹:

[C.5]

$$v = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot V_k \cdot \cos(k\omega t - \vartheta_k) \quad i = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_k \cdot \cos(k\omega t - \vartheta_k - \varphi_k)$$

где действующие значения фазных величин по определению представляют собой корень квадратный из суммы квадратов действующих значений отдельных гармоник:

$$V = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_k^2} \quad I = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad [C.6]$$

Чтобы охарактеризовать содержание гармоник в кривой тока или напряжения, используют такой показатель, как коэффициент искажения синусоидальности (THD):

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \quad THD \text{ тока} \quad [C.7]$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} \quad THD \text{ напряжения} \quad [C.8]$$

Если $THD_i < 10\%$ и $THD_v < 5\%$, доля гармоник считается низкой и меры для их подавления не требуются, в противном случае необходимо установить один или несколько фильтров для гармоник с высоким амплитудным значением, чтобы снизить коэффициент искажений до приемлемого уровня.

¹ Угол φ_k – это смещение k -й гармоники тока относительно k -й гармоники напряжения.

С.3 Мощность в установившейся несинусоидальной системе

Для установившихся условий несинусоидальности тока и напряжения требуется ввести более общие определения мощностей. Полная мощность S , от которой зависит тепловая нагрузка электрических компонентов в трехфазной системе, определяется следующим образом:

$$S = 3 \cdot V \cdot I = 3 \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_k^2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad [\text{С.9}]$$

Если в цепи присутствуют другие гармоники тока и напряжения, кроме основной, то определения активной мощности P и реактивной мощности Q принимают вид²:

$$P = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k \quad Q = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k \quad [\text{С.10}]$$

Полная мощность основной гармоники A выражается через эти мощности обычным образом:

$$A = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [\text{С.11}]$$

Полная мощность отличается от полной мощности основной гармоники, определяемой выражением [С.9]; полную мощность можно представить в виде:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad [\text{С.12}]$$

где член D (мощность искажений) учитывает искажения формы напряжения и тока³.

Сумма квадратов реактивной мощности Q и мощности искажений D дает квадрат неактивной мощности N :

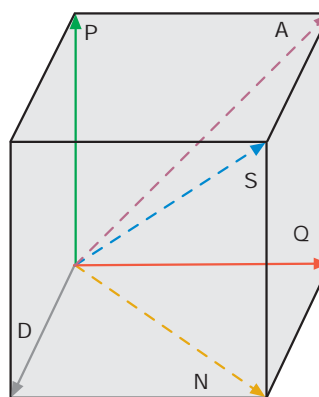
$$N^2 = Q^2 + D^2 \quad [\text{С.13}]$$

которая названа “неактивной”, поскольку выражается разностью между квадратами полной мощности S и активной мощности P :

$$N^2 = S^2 - P^2 \quad [\text{С.14}]$$

Для пояснения данной концепции обратимся к графическому представлению этих величин на рисунке С.1. Это трехмерный вариант треугольника мощности для синусоидальной системы. Векторы P , Q и D образуют ребра параллелепипеда, вектор S – диагональ параллелепипеда, вектор A – диагональ грани, которой принадлежат ребра P и Q , вектор N – диагональ грани, которой принадлежат ребра Q и D .

Рисунок С.1



В несинусоидальной системе ток и напряжение в линии питания нагрузки, которая работает с активной мощностью P , описываются формулой [С.6]; следовательно, полный коэффициент мощности $\cos \varphi$ по определению равен:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad [\text{С.15}]$$

Когда идет речь о коррекции коэффициента мощности, скажем, до значения 0,9, подразумевается именно этот полный коэффициент мощности, такая коррекция позволяет при той же потребляемой активной мощности снизить полную мощность (и, следовательно, ток, протекающий в сети). Полный коэффициент мощности представляет собой расширение понятия коэффициента мощности $\cos \varphi$ на системы с искажением синусоидальности формы кривых в установившемся режиме; $\cos \varphi$ в таких системах равен:

$$\cos \varphi = \frac{P}{A} \quad [\text{С.16}]$$

Если кривые напряжения и тока не искажены, оба вышеприведенных коэффициента совпадают, но при наличии гармоник они не равны и связаны соотношением:

$$\cos \varphi = \cos \varphi \cdot \cos \psi \quad [\text{С.17}]$$

где коэффициент искажений $\cos \psi$ учитывает мощность искажения и по определению равен:

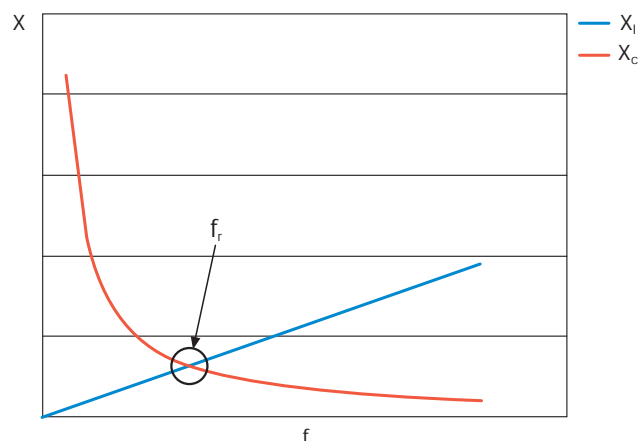
$$\cos \psi = \frac{A}{S} \quad [\text{С.18}]$$

² Согласно подходу, который был предложен Будяну, активная и реактивная мощности, потребляемые нагрузкой в присутствии гармонических искажений, представляют собой суммы мощностей отдельных гармоник, причем перемножаются только значения напряжения и тока гармоник одного порядка.

³ Полная (S) и полная основной гармоники (A) мощности не совпадают, поскольку по определению полная мощность включает в себя произведения напряжения и тока разных гармоник.

С.4 Применение L-C фильтров в качестве конденсаторов

На следующем графике представлена зависимость ёмкостного и индуктивного сопротивлений пассивного последовательного L-C фильтра от частоты.



Как видно из графика, на частотах ниже резонансной частоты⁴ $f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$ ёмкостное сопротивление больше индуктивного, следовательно, генерируемая реактивная мощность больше потребляемой, то есть:

$$Q = Q_L - Q_C = \omega \cdot L \cdot I^2 - \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot I^2 < 0 \quad [C.19]$$

Пассивный фильтр подавляет гармонику, которая совпадает с его резонансной частотой, значит, он корректирует коэффициент мощности на более низких частотах, и этот эффект следует учитывать при выборе конденсаторных батарей и самих фильтров. Иными словами, компоненты L-C фильтров можно выбрать так, что суммарная реактивная мощность, генерируемая на основной частоте всеми установленными фильтрами, будет соответствовать реактивной мощности, необходимой для того, чтобы полный коэффициент сдвига фаз на стороне источника стал равен 0,9.

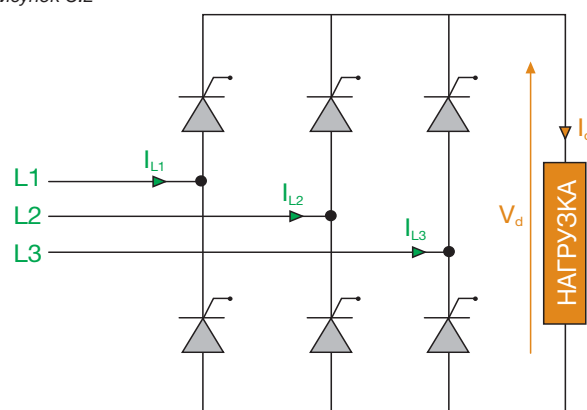
В полосе частот выше резонансной индуктивное сопротивление выше ёмкостного, но амплитуда гармоник тока, как правило, снижается с ростом частоты, следовательно, реактивная мощность, потребляемая фильтром на частотах выше резонансной, уменьшается с увеличением порядка гармоники, кроме того, на высоких частотах компенсационная батарея ве-

дет себя по отношению к сети как индуктивность, что устраняет возможность параллельного резонанса с сетевой индуктивностью.

Пример применения

Предположим, трехфазный полностью управляемый двухполупериодный статический выпрямитель питается от сети 50 Гц, и эта сеть имеет достаточно высокую мощность короткого замыкания, чтобы пренебречь искажением напряжения, вызванным гармониками тока от выпрямителя⁵.

Рисунок С.2



Ток в каждой фазе линии питания имеет прямоугольную форму (при условии, что нагрузка на стороне постоянного тока обладает большой индуктивностью), и основная гармоника тока равна частоте синусоидального напряжения. Преобразование Фурье для такого тока дает только гармоники⁶ порядка $k = 6n \pm 1$ ($n = 0, 1, 2, \dots$), теоретическая амплитуда которых обратно пропорциональна порядку гармоники⁷, то есть:

$$I_k = \frac{I_1}{k} \quad [C.20]$$

где I_1 – амплитуда основной гармоники (в данном примере – 50 Гц). Поскольку, согласно исходному допущению, кривая напряжения не имеет искажений, ее преобразование в ряд дает только основную гармонику, следовательно, активная и реактивная мощно-

⁵ Это означает, что как показано на схеме, все вентили являются тиристорами, которыми можно управлять, изменяя угол управления (задержки включения) α ; это позволяет менять значение выпрямленного напряжения V_d и мощности P согласно следующему соотношению:

$$V_d = V_{d0} \cdot \cos \alpha \quad P = P_{d0} \cdot \cos \alpha$$

где V_{d0} и P_{d0} – соответственно среднее выпрямленное напряжение и мощность на стороне постоянного тока без угла управления тиристоров ($\alpha = 0$).

На стороне переменного тока задержка включения тиристоров α вызывает сдвиг фаз φ между напряжением и током, что приводит к потреблению реактивной мощности Q . В частности, действительно соотношение $\alpha = \varphi$.

⁶ Это зависит от типа мостового выпрямителя (однофазный, трехфазный, шести-фазный и т.д.) и типа управления (неуправляемый, полупроводимый или гибридный, полностью управляемый).

⁷ Фактически, ненулевое время включения и ненулевой угол управления уменьшают амплитуду гармоник по сравнению с теоретической.

⁴ Резонансная частота – это, по определению, частота, при которой индуктивное и ёмкостное сопротивления совпадают (см. главу 8). Таким образом:

$$X_L = X_C \Rightarrow 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \Rightarrow 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot L \cdot C = 1 \Rightarrow f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Если индуктивность и ёмкость соединены последовательно, импеданс стремится к нулю, в результате гармоники тока, частота которых совпадает с резонансной, вызывают короткое замыкание. Аналогично, если индуктивность и ёмкость соединены параллельно, импеданс стремится к бесконечности, в результате между точками подключения фильтра возникает перенапряжение.

сти, потребляемые выпрямителем (без учета потерь), рассчитываются по формуле [С.10] и равны⁸:

$$P = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = P_1 = V_{d0} \cdot I_d \cdot \cos \alpha = P_d \quad [C.21]$$

$$Q = 3 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \alpha = Q_1 \quad [C.22]$$

где:

V_{d0} – напряжение на стороне постоянного тока;

I_d – ток на стороне постоянного тока;

Полная мощность основной гармоники, соответствующая этим мощностям, равна:

$$A = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = A_1 \quad [C.23]$$

Поскольку полная мощность равна:

$$S = 3 \cdot V \cdot I = 3 \cdot \sqrt{V_1^2 \cdot \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad [C.24]$$

мощность искажений, обусловленная несинусоидальностью тока, составит:

$$D = \sqrt{S^2 - A_1^2} \quad [C.25]$$

Предполагая, что номинальная мощность мостового выпрямителя на стороне постоянного тока равна 140 кВт, что напряжение на стороне источника питания – номинальное и синусоидальное, что время включения тиристоров равно нулю, а угол управления α имеет такое значение, что $\cos \varphi = \cos \alpha = 0,8$, получаем следующие значения мощности на стороне переменного тока:

$$P = P_d = P_{d0} \cdot \cos \alpha = 140 \cdot 0,8 = 112 \text{ кВт}$$

откуда находим ток первой гармоники:

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} = \frac{112 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,8} = 202 \text{ А}$$

и, соответственно, реактивную мощность и полную мощность основной гармоники⁹:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_1 \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 202 \cdot 0,6 = 84 \text{ квар}$$

$$A = \sqrt{P^2 + Q^2} = 140 \text{ кВа}$$

Преобразуя несинусоидальный ток на стороне переменного напряжения в ряд Фурье согласно формуле [С.20], получаем следующие амплитуды гармоник (рассматриваются гармоники до 25 порядка):

Таблица С.1

k	I_k [А]	I_k/I_1 %
1	202	100
5	40	20
7	29	14
11	18	9
13	15	8
17	12	6
19	11	5
23	9	4
25	8	4

Следовательно, в отсутствие фильтров гармоник в сети на стороне источника питания будет протекать ток с общим действующим значением, равным корню квадратному из суммы квадратов действующих значений гармоник тока, приведенных в предыдущей таблице:

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^{25} I_k^2} = 210 \text{ А}$$

и полная мощность составит:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 210 = 146 \text{ кВа}$$

а коэффициент искажения по току:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=5}^{25} I_k^2}}{I_1} = 29\%$$

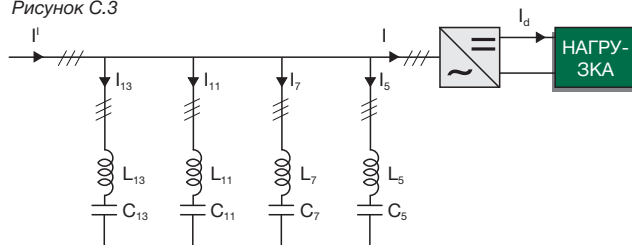
Соответственно, коэффициент мощности основной гармоники $\cos \psi = \frac{A}{S} = 0,96$ и полный коэффициент мощности на стороне источника питания $\cos \varphi = \cos \varphi \cdot \cos \psi = 0,8 \cdot 0,96 = 0,77$. Полный коэффициент мощности требуется скорректировать до значения $\cos \varphi' = 0,9$, для чего следует рас-

⁸ Поскольку в кривой напряжения отсутствуют высшие гармоники, все слагаемые, кроме первого, равны нулю. Кроме того, поскольку угол сдвига фаз φ и угол управления α (в момент включения тиристоров) совпадают, очевидно, что потребляемая реактивная мощность выпрямителя возрастает с увеличением угла управления.

⁹ $\cos \varphi = 0,8 \rightarrow \varphi = 36,9^\circ \rightarrow \sin \varphi = 0,6$

считать и подключить параллельно L-С фильтры для 5, 7, 11 и 13 гармоник, как показано на следующей схеме.

Рисунок С.3



Следовательно, конечное значение $\cos\varphi'$ должно превышать 0.9. Предположим, это значение будет равняться 0,91, в таком случае компенсирующая реактивная мощность равна:

$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi') = 112 \cdot (\operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.8)) - \operatorname{tg}(\cos^{-1}(0.91))) = 33$ квар
откуда находим реактивную мощность после коррекции коэффициента мощности Q' :

$$Q' = Q - Q_c = 84 - 33 = 51 \text{ квар}$$

Подберем индуктивности для фильтров гармоник и рассчитаем ёмкости, которые вызывают последовательный резонанс:

$$C_k = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot L_k}$$

Таблица С.2

k	f [Гц]	L_k [мГн]	C_k [мкФ]
5	250	1	406
7	350	2	103
11	550	1	84
13	650	1	6

Реактивная мощность на частоте питания 50 Гц рассчитывается для L-С фильтра 5-й (к примеру) гармоники следующим образом:

$$I_{1,5} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \left(2\pi 50 \cdot L_5 - \frac{1}{2\pi 50 \cdot C_5} \right)}$$

$$Q_{1,5} = 3 \cdot \left(\frac{1}{2\pi 50 \cdot C_5} - 2\pi 50 \cdot L_5 \right) \cdot I_{1,5}^2$$

Аналогично рассчитываем вклад остальных гармоник. Сумма компенсирующих реактивных мощностей при 50 Гц очень близка к заданной (при значениях индуктивностей и ёмкостей, приведенных в таблице С.2); учитывая, что полная мощность основной гармоники A' (при той же потребляемой активной мощности P) равна:

$$A' = \sqrt{P^2 + Q'^2} = 123 \text{ кВа}$$

действующее значение первой гармоники тока становится равным:

$$I_1' = \frac{A'}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{123 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 177 \text{ А}$$

что приблизительно на 12 % ниже исходного значения I_1 , при этом неотфильтрованные гармоники имеют следующие параметры:

Table C.3

k	I_k [A]	I_k/I_1' %
17	10	6
19	9	5
23	8	4
25	7	4

Как видно из сравнения действующих значений в таблицах С.1 и С.3, коррекция коэффициента мощности на частоте 50 Гц привела к уменьшению действующего тока первой гармоники, что снизило уровень неотфильтрованных гармоник (поскольку $I_k' = \frac{I_1'}{k}$).

Это приводит к еще большему снижению полного тока в сети на стороне источника питания, $I' = 178 \text{ А}$ (на 16 % ниже начального тока I), а полная мощность S' принимает значение:

$$S' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I' = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 178 = 124 \text{ кВа}$$

Коэффициент мощности основной гармоники повышается от 0,96 до:

$$\cos\psi' = \frac{A'}{S'} = \frac{123}{124} = 0.99$$

и полный коэффициент мощности теперь равен:

$$\cos\phi' = \cos\phi \cdot \cos\psi' = 0.91 \cdot 0.99 = 0.906$$

Таким образом, поставленная цель достигнута, в противном случае следовало бы увеличить требуемое значение $\cos\phi$ и повторить всю процедуру. Коэффициент искажения тока снизился до $K_i' = 9,9 \%$ (ниже установленного уровня 10 %).

Из этого примера можно сделать следующее обобщающее заключение. Пассивные фильтры с правильно выбранными индуктивностями и ёмкостями решают, помимо фильтрации гармоник, еще две задачи:

- корректируют коэффициент мощности на частоте 50 Гц (поскольку на основной частоте фильтр представляет собой ёмкостное сопротивление, так что генерируемая реактивная мощность выше потребляемой);
- снижают действующие значения токов неотфильтрованных гармоник (поскольку в результате коррекции коэффициента мощности снизился действующий ток на основной частоте), это еще больше ограничивает полный ток в сети и коэффициент искажения, что означает меньшее искажение кривой тока.

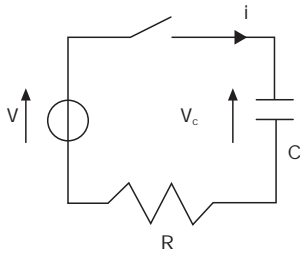
Приложение D

Напряжения и токи при включении и разрядке конденсаторов

D.1 Включение конденсаторных батарей

Для показанной на следующей схеме однофазной эквивалентной цепи, состоящей из конденсатора и резистора:

Рисунок D.1



где:

$$v = \sqrt{2} \cdot V_m \cdot \sin(\omega t + \psi) \quad [D.1]$$

действует следующее соотношение:

$$R \cdot i + \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i dt = \sqrt{2} \cdot V_m \cdot \sin(\omega t + \psi) \quad [D.2]$$

Считая напряжение на конденсаторе V_c неизвестной величиной и учитывая, что $i = i_c = C \cdot dv_c/dt$, получаем:

$$R \cdot C \cdot \frac{dv_c}{dt} + v_c = \sqrt{2} \cdot V_m \cdot \sin(\omega t + \psi) \quad [D.3]$$

Решение этого линейного дифференциального уравнения первого порядка представляет собой сумму двух составляющих: установившейся составляющей v_c' (частное решение) и переходной (свободной) составляющей, которая представляет собой затухающую экспоненту v_c'' (общее решение), то есть:

$$v_c = v_c' + v_c'' \quad [D.4]$$

откуда:

$$R \cdot C \cdot \frac{dv_c'}{dt} + v_c' = \sqrt{2} \cdot V_m \cdot \sin(\omega t + \psi) \quad R \cdot C \cdot \frac{dv_c''}{dt} + v_c'' = 0 \quad [D.5]$$

Поскольку в установившемся состоянии ток в цепи равен¹:

$$i' = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t + \psi + \varphi) \quad [D.6]$$

$$I = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

из первого уравнения [D.5] находим напряжение на конденсаторе в установившемся состоянии:

$$v_c' = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i' dt = -\frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \cos(\omega t + \psi + \varphi) \quad [D.7]$$

Для напряжения v_c'' получаем²:

$$v_c'' = V_c'' \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [D.8]$$

Считая, что в начальном состоянии, при $t = 0$, напряжение на конденсаторе нулевое:

$$v_{c0} = v_{c0}' + v_{c0}'' = -\frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) + V_c'' = 0 \quad [D.9]$$

находим:

$$V_c'' = \frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) \quad [D.10]$$

следовательно:

$$v_c = \frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \left[\cos(\psi + \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} - \cos(\omega t + \psi + \varphi) \right] \quad [D.11]$$

Решая уравнение для тока, также получаем сумму установившейся и переходной составляющих:

$$i = i' + i'' \quad [D.12]$$

Установившаяся составляющая определяется уравнением [D.6], а переходную составляющую можно найти дифференцированием [D.8] по времени:

$$i'' = C \cdot \frac{dv_c''}{dt} = C \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \left(-\frac{1}{R \cdot C} \right) = \dots \rightarrow -\frac{\sqrt{2} \cdot I}{\omega \cdot R \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [D.13]$$

откуда:

$$i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \left[-\frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} \cdot \cos(\psi + \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \sin(\omega t + \psi + \varphi) \right] \quad [D.14]$$

Однополярная составляющая становится равной нулю, когда:

$$\cos(\psi + \varphi) = 0 \rightarrow \psi = 90^\circ - \varphi$$

то есть, когда угол включения относительно нуля напряжения является дополнительным к углу сдвига фаз между напряжением и током в установившемся режиме. В этом случае не возникает пиков тока и коммутационного перенапряжения. С другой стороны, если:

$$\cos(\psi + \varphi) = 1 \rightarrow \psi = -\varphi$$

возникает максимальная однополярная составляющая с максимальным пиковым током и самым большим перенапряжением.

² Отсюда следует, что τ , постоянная времени рассматриваемой системы, равна RC

Пример

Предположим, требуется включить трехфазную батарею соединенных звездой конденсаторов мощностью 50 квар, которая питается по 10 м трехжильному ПВХ кабелю от сети напряжением 400 В, 50 Гц, имеющей бесконечно большую мощность. Ёмкость в каждой фазе равна:

$$Q_c = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot \left(\frac{U_n}{\sqrt{3}} \right)^2 \rightarrow C = \frac{Q_c}{\omega \cdot U_n^2} = \frac{50 \cdot 10^3}{314 \cdot 400^2} = 1 \text{ мФ}$$

Действующее значение номинального тока, потребляемого в установившемся режиме:

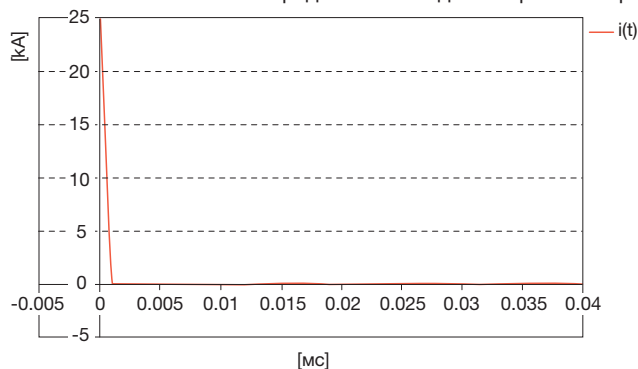
$$I_n = \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 72 \text{ А}$$

При таком номинальном токе применяется проложенный в лотке 16 мм² кабель с полным сопротивлением 15 Ом в каждой фазе. Следовательно, постоянная времени τ для RC цепи составит 15 мкс, а угол сдвига фаз между током и напряжением:

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} \right) = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{1}{314 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}} \right) = 89.73^\circ \text{ (опережающий)}$$

Подставляя в уравнение [D.13] значения сопротивления, ёмкости и тока (погрешностью от замены I на I_n можно пренебречь), получаем, что максимальный пусковой ток (предполагая, что $\psi = -\varphi$) составит около 22 кА, что в 300 раз превосходит номинальный ток батареи (см. следующий график). На практике этот пиковый ток будет ограничиваться импедансом питающей сети. Однако если ток оказывается слишком большим для установленного электрооборудования, потребуется использовать ограничивающие реакторы (см. главу 9).

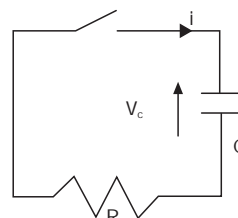
Максимальный пиковый зарядный ток конденсаторной батареи



D.2 Разрядка конденсаторов

Рассмотрим заряженную конденсаторную батарею с начальным напряжением V_{c0} , которая подключена к разрядному сопротивлению R , как показано на следующей схеме:

Рисунок D.2



Без приложенного внешнего напряжения функцию напряжения на конденсаторе можно записать в виде:

$$R \cdot C \cdot \frac{dv_c}{dt} + v_c = 0 \quad [D.15]$$

Решение этого уравнения дает:

$$v_c = V_{c0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [D.16]$$

то есть, в худшем случае, напряжение равно:

$$v_c = \sqrt{2} \cdot V_n \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [D.17]$$

Зная, что $i = i_c = C \frac{dv_c}{dt}$, определяем ток:

$$i = -\frac{V_{c0}}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [D.18]$$

Подставив в [D.17] значения $t = 180$ с и $v_c = 75$ В, как требует стандарт МЭК 60831-1, и решив это уравнение относительно R , определяем максимальное разрядное сопротивление по формуле [9.12] из главы 9.

Пример

Предположим, требуется рассчитать разрядные сопротивления для конденсаторной батареи, о которой шла речь в предыдущем примере. Воспользовавшись формулой [D.17] и подставив соответствующие значения, получаем (при коэффициенте $k = 1$):

$$75 \geq \sqrt{2} \cdot 230 \cdot e^{-\frac{3 \cdot 60}{R \cdot 10^{-3}}} \rightarrow R \leq \frac{180}{10^{-3} \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{2} \cdot 230}{75} \right)} = 123 \text{ кОм}$$

Если выбрать резистор с таким сопротивлением и учесть, что за 3 минуты резистор преобразует в тепло электрическую энергию, запасенную в каждом конденсаторе, максимальная рассеиваемая мощность составит:

$$P = \frac{V_{c0}^2}{R} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 230)^2}{123 \cdot 10^3} = 0.86 \text{ Вт}$$

Таким образом, несмотря на то, что сопротивление имеет порядок сотен кОм, максимальная рассеиваемая мощность не превышает 1 Вт, поскольку максимальный ток разряда составляет около: Следовательно, нагрев будет незначителен, и можно

$$I = \frac{V_{c0}}{R} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230}{123 \cdot 10^3} = 2.6 \text{ мА}$$

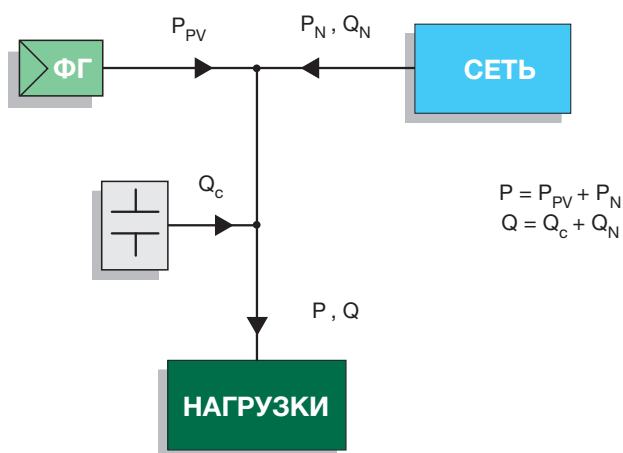
использовать соединительные кабели малого сечения.

Приложение Е

Коррекция коэффициента мощности на установках с фотоэлектрическим генератором

Фотоэлектрические станции (солнечные батареи) обычно являются источником только активной мощности, однако приемники электроэнергии потребляют из сети не только активную, но и реактивную мощность. Если фотоэлектрическая станция подключается к уже существующей электроустановке, потребление реактивной мощности остается прежним, а потребление активной мощности сокращается на величину мощности фотоэлектрического генератора, как показано на следующей схеме:

Рисунок Е.1



Чтобы не подвергаться штрафам, электроустановка в целом (приемники тока и фотогальванический генератор) должна иметь средний коэффициент мощности 0,9, откуда следует:

$$\cos \varphi_N \geq 0.9 \rightarrow \operatorname{tg} \varphi_N \leq 0.5 \rightarrow \frac{Q_N}{P_N} \leq 0.5 \quad [E.1]$$

Учитывая данные, приведенные на схеме, предыдущую формулу можно переписать следующим образом:

$$\frac{Q - Q_C}{P - P_{PV}} = 0.5 \quad [E.2]$$

откуда:

$$Q_C \geq Q - 0.5 \cdot (P - P_{PV}) = P \cdot \left(\operatorname{tg} \varphi_1 - 0.5 \cdot \left(1 - \frac{P_{PV}}{P} \right) \right) = \dots \quad [E.3]$$

$$\dots \rightarrow P \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

где:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{P_{PV}}{P} \right)$$

Если фотоэлектрическая станция отсутствует ($P_{PV} = 0$):

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{0}{P} \right) = 0.5 \rightarrow \cos \varphi_2 = 0.9 \quad [E.5]$$

поэтому регулятор коэффициента мощности устанавливается, как обычно, на 0,9.

При наличии фотоэлектрической станции установка генерирует активную мощность, и регулятор коэффициента мощности следует установить на значение выше 0,9. Например, если генерируемая мощность составляет половину мощности, потребляемой нагрузками ($P_{PV} = 0.5 \cdot P$), то:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{0.5 \cdot P}{P} \right) = 0.25 \rightarrow \cos \varphi_2 = 0.97 \quad [E.6]$$

В предельном случае, когда фотоэлектрическая станция поставляет всю активную мощность, требуемую нагрузками ($P_{PV} = P$), регулятор коэффициента мощности следует установить на значение:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{P}{P} \right) = 0 \rightarrow \cos \varphi_2 = 1 \quad [E.7]$$

и конденсаторная батарея будет производить всю реактивную мощность, потребляемую нагрузками.

Приложение F

Гармоники в четырехпроводной трехфазной системе

F.1 Введение

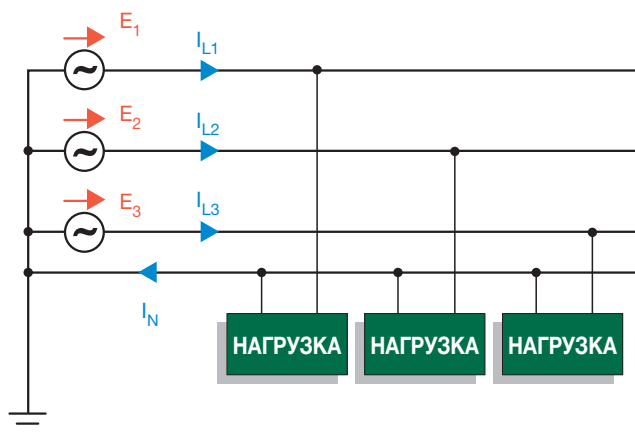
Электроустановки, питающиеся от четырехпроводной трехфазной сети, могут создавать в нулевом рабочем проводнике ток, превосходящий по действующему значению фазные токи.

Поэтому нулевой рабочий проводник должен иметь большее сечение, чем фазные, а уставки тока для фазных и нейтрального полюсов четырехполюсных автоматических выключателей должны различаться.

Применение фильтров гармоник и средств коррекции коэффициента мощности уменьшает ток в нулевом рабочем проводнике. Рассмотрим, как влияют нелинейные нагрузки на соотношение токов в нулевом и фазных проводниках.

F.2 Симметричная трехфазная система питания и три равные, но нелинейные однофазные нагрузки

Рисунок F.1



Будем учитывать, помимо основной, только 3-ю гармонику тока и воспользуемся значением, установленным в стандарте МЭК 60947-2 (ГОСТ Р 50030.2-99), приложение F, вариант b):

$$I_3 = 0.6 \cdot I_1$$

В таком случае действующее значение фазного тока зависит от 1-й гармоники следующим образом:

$$I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} = I_L = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{I_1^2 \cdot (1 + 0.6^2)} = 1.17 \cdot I_1 \quad [F.1]$$

В нулевом рабочем проводнике протекает ток, равный алгебраической сумме действующих значений 3-их гармоник фазных токов:

$$I_N = 3 \cdot I_3 = 3 \cdot 0.6 \cdot I_1 = 1.8 \cdot I_1 \quad [F.2]$$

Отсюда, выразив ток в нулевом проводнике через фазный ток, находим:

$$I_N = 1.8 \cdot I_1 = 1.8 \cdot \frac{I_L}{1.17} = 1.54 \cdot I_L \approx 160\% I_L \quad [F.3]$$

Если же принять, что 3-я гармоника соответствует значению, установленному в стандарте МЭК 60947-2, приложение F, вариант а):

$$I_3 = 0.88 \cdot I_1$$

то предыдущие соотношения принимают вид:

$$I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} = I_L = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{I_1^2 \cdot (1 + 0.88^2)} = 1.33 \cdot I_1 \quad [F.4]$$

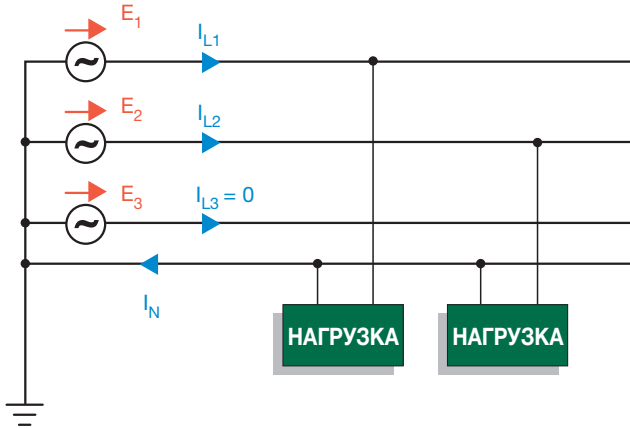
$$I_N = 3 \cdot I_3 = 3 \cdot 0.88 \cdot I_1 = 2.64 \cdot I_1 \quad [F.5]$$

$$I_N = 2.64 \cdot I_1 = 2.64 \cdot \frac{I_L}{1.33} = 1.98 \cdot I_L \approx 200\% I_L \quad [F.6]$$

Как видно из этого примера, ток в нулевом проводнике может более чем вдвое превышать фазный ток, что требует соответствующей коррекции сечения проводника и уставки расцепителя. Соотношение между токами в нулевом и фазном проводниках возрастет еще больше, если в системе присутствуют гармоники, кратные третьей. Предположение, что в системе отсутствуют гармоники, не кратные третьей, напротив, завышает соотношение токов в нулевом и фазных проводниках: в их присутствии соотношение будет меньше, так как в симметричной системе такие гармоники не протекают через нулевой проводник.

F.3 Симметричная трехфазная система питания и две равные, но нелинейные однофазные нагрузки

Рисунок F.2



Сначала будем учитывать, помимо основной, только 3-ю гармонику. В отличие от предыдущего примера, теперь ток в нулевом проводнике равен квадратному корню из суммы квадрата основной гармоники и квадрата суммы двух 3-их гармоник, то есть:

$$I_N = \sqrt{I_1^2 + (2 \cdot I_3)^2} \quad [F.7]$$

В данном случае основная гармоника тока в нулевом проводнике представляет собой векторную сумму основных гармоник фазных токов; поскольку последние равны по модулю и сдвинуты по фазе на 120° , при суммировании получаем действующее значение, как и для основной гармоники фазного тока.

Принимая гипотезу, что $I_3 = 0,88 \cdot I_1$ (которую можно проверить на однофазных выпрямителях), получаем:

$$I_N = \sqrt{I_1^2 + (2 \cdot 0,88 \cdot I_1)^2} = I_1 \cdot \sqrt{1 + (2 \cdot 0,88)^2} = 2,02 \cdot I_1 \quad [F.8]$$

$$I_{L1} = I_{L2} = I_L = \sqrt{I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{I_1^2 \cdot (1 + 0,88^2)} = 1,33 \cdot I_1 \quad [F.9]$$

$$I_N = \frac{2,02}{1,33} \cdot I_L = 1,52 \cdot I_L \quad [F.10]$$

Если 5-я и 7-я гармоники также присутствуют, то при значениях, установленных стандартом МЭК 60947-2, приложение f:

- $I_5 = 0,55 \cdot I_1$
- $I_7 = 0,07 \cdot I_1$

соотношение между токами в нейтральном и фазном проводниках принимает вид:

$$I_N = I_1 \cdot \sqrt{1 + (2 \cdot 0,88)^2 + 0,55^2 + 0,07^2} = 2,1 \cdot I_1 \quad [F.11]$$

$$I_{L1} = I_{L2} = I_L = I_1 \cdot \sqrt{1 + 0,88^2 + 0,55^2 + 0,07^2} = 1,44 \cdot I_1 \quad [F.12]$$

$$I_N = \frac{2,1}{1,44} \cdot I_L = 1,46 \cdot I_L \quad [F.13]$$

Из сравнения формул [F.13] и [F.10] видно, что и в данном случае наличие гармоник, не кратных 3-й, снижает соотношение токов в нейтральном и фазном проводниках.

Глоссарий

I	действующее значение полного тока
I_r	составляющая тока, синфазная с напряжением
I_q	составляющая тока, смещенная на 90° относительно напряжения
I_1	действующее значение первой гармоники тока
I_k	действующее значение k -й гармоники тока
U	действующее значение линейного напряжения
V	действующее значение полного фазного напряжения
V_1	действующее значение первой гармоники напряжения
V_k	действующее значение k -й гармоники напряжения
P	активная мощность, потребляемая нагрузкой
Q	реактивная мощность, потребляемая нагрузкой
Q_1	суммарная реактивная мощность до коррекции коэффициента мощности
Q_2	суммарная реактивная мощность после коррекции коэффициента мощности
A	полная мощность основной гармоники, потребляемая нагрузкой
D	мощность искажений
N	неактивная мощность
S	полная мощность
S_1	полная мощность до коррекции коэффициента мощности
S_2	полная мощность после коррекции коэффициента мощности
Q_c	реактивная мощность конденсаторной батареи
I_{cn}	номинальный ток конденсатора
I_{cmax}	максимальный потребляемый ток конденсатора
$\cos\varphi$	коэффициент мощности
$\cos\psi$	коэффициент мощности по основной гармонике
$\cos\phi$	Полный коэффициент мощности
$\cos\phi_1$	коэффициент мощности до компенсации реактивной мощности
$\cos\phi_2$	коэффициент мощности после компенсации реактивной мощност
THD	коэффициент искажения
f_r	резонансная частота
P_{PV}	активная мощность, подаваемая фотоэлектрическим генератором
P_N	активная мощность, вырабатываемая сетью
Q_N	реактивная мощность, вырабатываемая сетью

Наши координаты

117997, Москва,
ул. Обручева, 30/1, стр. 2
Тел.: +7 495 960 2200
Факс: +7 495 960 2220

193029, Санкт-Петербург,
Б. Смоленский пр., 6
Тел.: +7 812 326 9915
Факс: +7 812 326 9916

400005, Волгоград
пр. Ленина, 86
Тел.: +7 8442 24 3700
Факс: +7 8442 24 3700

394006, Воронеж,
ул. Свободы, 73
Тел.: +7 473 239 3160
Факс: +7 473 239 3170

620066, Екатеринбург,
ул. Бархотская, 1
Тел.: +7 343 369 0069
Факс: +7 343 369 0000

664033, Иркутск,
ул. Лермонтова, 257
Тел.: +7 3952 56 2200
Факс: +7 3952 56 2202

420061, Казань,
ул. Н. Ершова, 1 а
Тел.: +7 843 279 3330
Факс: +7 843 279 3331

350049, Краснодар,
ул. Красных Партизан, 495
Тел.: +7 861 221 1673
Факс: +7 861 221 1610

660135, Красноярск,
ул. Взлетная, д. 5, стр. 1, оф. 4-05
Тел.: +7 913 578 6833

603140, Нижний Новгород,
Мотальный пер., 8
Тел.: +7 831 461 9102
Факс: +7 831 461 9164

630073, Новосибирск,
пр. Карла Маркса, 47/2
Тел.: +7 383 346 5719
Факс: +7 383 315 4052

614077, Пермь,
ул. Аркадия Гайдара, 86
Тел.: +7 342 263 4334
Факс: +7 342 263 4335

344065, Ростов-на-Дону,
ул. 50-летия Ростсельмаша, 1/52
Тел.: +7 863 203 7177
Факс: +7 863 203 7177

443010, Самара,
ул. Красноармейская, 1
Тел.: +7 846 269 8047
Факс: +7 846 269 8046

450071, Уфа,
ул. Рязанская, 10
Тел.: +7 347 232 3484
Факс: +7 347 232 3484

680000, Хабаровск,
ул. Муравьева-Амурского, 44
Тел.: +7 4212 30 2335
Факс: +7 4212 30 2327

693000, Южно -Сахалинск,
ул. Курильская, 38,
Тел.: +7 4242 49 7155
Факс: +7 4242 49 7155

По вопросам заказа оборудования обращайтесь к нашим официальным дистрибьюторам: <http://www.abb.ru/lowvoltage>