Сетевые дроссели. Сглаживающие дроссели.

И. Морозов, ООО «ОПТИМА», Республика Беларусь moroz@optima.by

Ключевые слова: сетевой дроссель ED3N, сглаживающий дроссель ED1W, опции преобразователей частоты, Elhand, Элхэнд, Optima, Оптима, электромагнитная совместимость, ЭМС, преобразователь частоты, инвертор.

Рост цен на энергоносители, которые объективно приближаются к мировому уровню, требует принятия реальных эффективных и безотлагательных мер по снижению энергопотребления во всех отраслях народного хозяйства.

Начиная с середины 90-х годов на предприятиях промышленности, ЖКХ и иных отраслей экономики широкое распространение получили энергосберегающие преобразователи частоты (ЭПЧ), используемые в качестве регуляторов производительности механизмов с "вентиляторной" характеристикой (центробежных насосов, вентиляторов, дымососов). Именно на эту категорию оборудования приходится значительная доля электропотребления и потенциала энергосбережения, поскольку установленная мощность его, как правило, или была выбрана с большим запасом ещё в бытность СССР, или превышает снизившуюся из-за падения объёмов производства нагрузку.

Применение ЭПЧ позволяет экономить до 30% (на некоторых объектах и до 50%) электроэнергии. Это огромный резерв, и, с учётом наличия опыта применения, широкого предложения на рынке, сервиса и относительно невысокой стоимости, — наиболее доступный для быстрой реализации.

Максимальный энергосберегающий эффект от ЭПЧ достигается когда они оснащены сетевыми дросселями (ED3N) и (или) сглаживающими дросселями (ED1W). Это даёт возможность получить дополнительную экономию электроэнергии на электроприводе с ЭПЧ, но без дросселей.

Статья посвящена обоснованию применения и методам выбора дросселей с учетом мощности ЭПЧ и электрических параметров сети электроснабжения.

На рис. 1. изображена типовая схема подключения асинхронного электродвигателя с ЭПЧ и сетевым, сглаживающим и моторным дросселями.

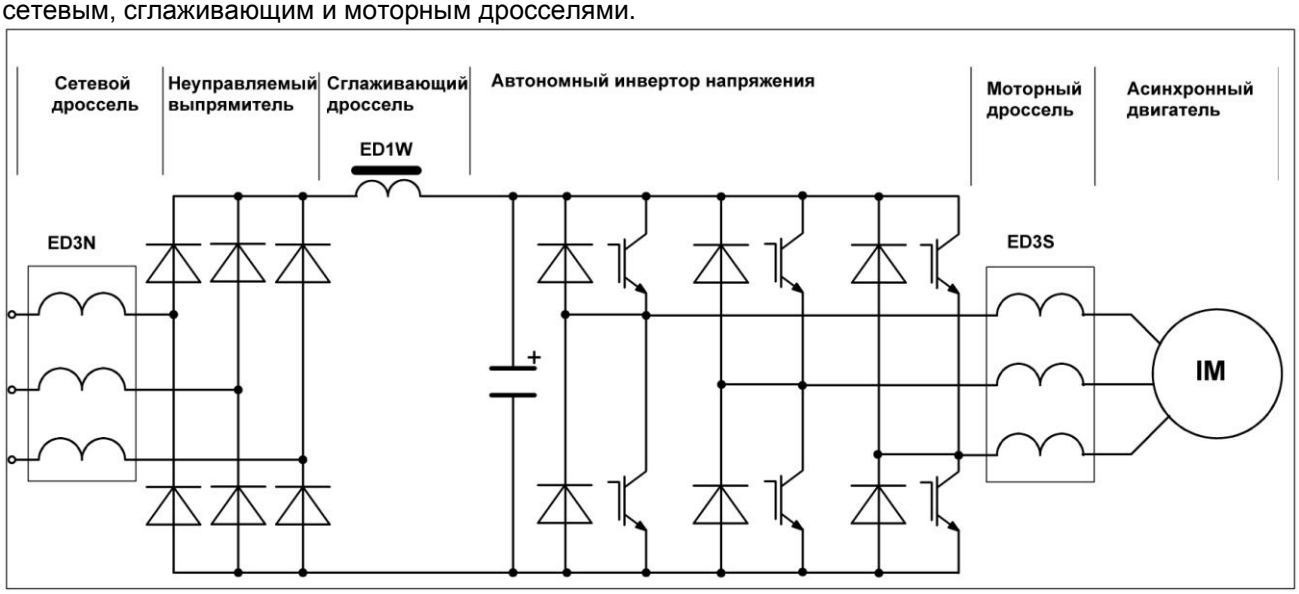


Рис.1. Типовая схема подключения энергосберегающего преобразователя частоты

СЕТЕВЫЕ ДРОССЕЛИ

Сетевой дроссель **ED3N** подключается к входу ЭПЧ и является двухсторонним буфером между ним и питающей сетью.

Назначение сетевых дросселей:

1. Повышение энергосберегающего эффекта от внедрения ЭПЧ путём увеличения коэффициента мощности системы ЭПЧ-асинхронный двигатель (ЭПЧ-АД).
2. Подавление высших гармоник входного тока, генерируемых неуправляемым выпрямителем ЭПЧ.
3. Выравнивание линейных напряжений на входе ЭПЧ при перекосах питающего напряжения.
4. Подавление быстрых изменений напряжения на входе ЭПЧ.
5. Снижение скорости нарастания тока короткого замыкания на выходе ЭПЧ.
6. Увеличение срока службы электролитических конденсаторов в контуре постоянного напряжения ЭПЧ.

1. Повышение энергосберегающего эффекта от внедрения ЭПЧ

При питании АД от промышленной сети его коэффициент мощности (PF) равен cosφ АД. При питании АД от ЭПЧ ситуация существенно ухудшается. PF системы ЭПЧ-АД становится меньше cosφ, а это

значит, что увеличивается реактивная составляющая мощности (Q,) и, как следствие, полная мощность (S), потребляемая из сети. Причиной такого явления являются высшие гармоники тока, а именно: 5-я, 7-я,11-я,13-я, 17-я,19-я, генерируемые неуправляемым выпрямителем ЭПЧ. То есть, в сети кроме токов основной частоты 50 Гц будут циркулировать токи с частотами 250, 350, 550, 650, 850, 950 Гц. Формулы 1 и 2 иллюстрируют негативное влияние описанного явления на систему электроснабжения.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot Cos\varphi_1}{U_1 \cdot I_s} = \frac{I_1}{I_s} \cdot Cos\varphi_1 \qquad (1)$$

$$I_s = \sqrt{\sum_{n=1}^{N} I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + \ldots} \qquad (2)$$

Где

PF—коэффициент мощности системы ЭПЧ—АД;

P—активная мощность потребляемая из сети системой ЭПЧ—АД;

S—полная мощность потребляемая из сети системой ЭПЧ—АД;

U_1—действующее значение первой гармоники напряжения;

I_1—действующее значение первой гармоники тока;

Cosφ--коэффициент мощности при питании АД от промышленной сети;

I_S—действующее значение суммарного тока;

I_n—действующее значение n—гармоники тока.

Чем больше действующие значения высших гармоник, тем хуже коэффициент мощности.

Существенно подавляет высшие гармоники реактивное сопротивление питающей сети, основной составляющей которого является индуктивное сопротивление силового трансформатора от которого питается система ПЧ—АД.

На рис.2 изображена обобщенная зависимость величины гармонических составляющих и суммарного входного тока системы ЭПЧ—АД от индуктивного сопротивления питающей сети приведенного к мощности ЭПЧ.

Очевидно, что при индуктивном сопротивлении 3% и более высшие гармоники подавлены в значительной степени, а действующее значение суммарного тока стремиться к величине тока основной гармоники.

При подключении ЭПЧ—АД без сетевого дросселя приведенная индуктивность питающей сети равна (3).

$$X'_{тр}\% = u_k\% \cdot \frac{S_{ПЧ}}{S_{тр}} \qquad (3)$$

где

$X'_{тр}\%$ – *приведенное реактивное сопротивление трансформатора* (%);

$u_к\%$ – *напряжение короткого замыкания трансформатора* (%);

$S_{ПЧ}$ – *Полная мощность преобразователя частоты*, (*кВА*);

$S_{тр}$ – *полная мощность трансформатора*, (*кВА*).

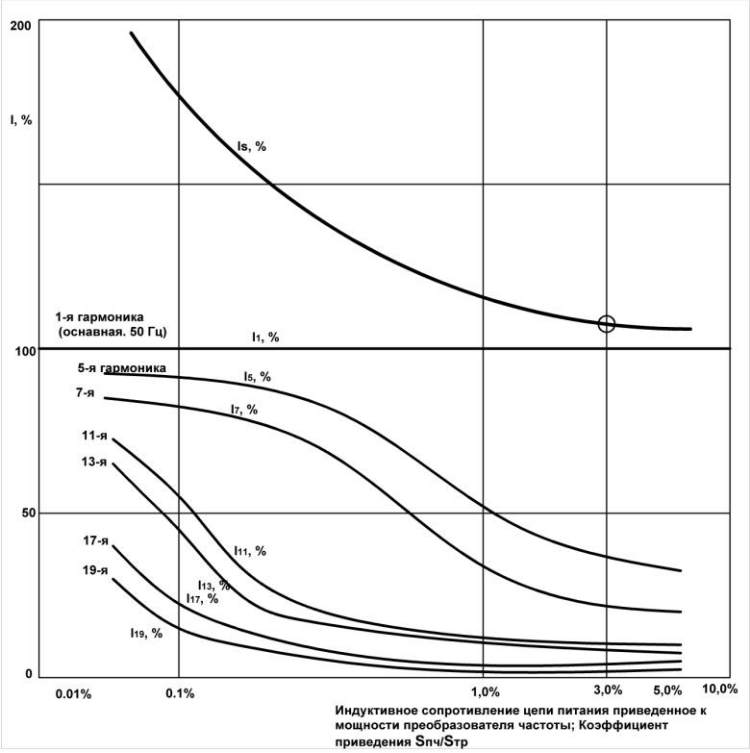


Рис.2. Зависимость суммарного тока ЭПЧ и его гармонических составляющих от индуктивного сопротивления питающей сети

Из формулы 3 следует, что чем больше мощность питающего трансформатора в сравнении с мощностью ЭПЧ, тем ниже приведённое индуктивное сопротивление (реактанс) ЭПЧ и, следовательно, тем выше амплитуды высших гармоник.

Питание ЭПЧ-АД, как правило, осуществляется от цеховых ТП с трансформаторами мощностью 1000 или 1600 кВА. Величины их приведённых реактансов по формуле 3, с учётом того, что $U_к$ равно 5,05% и 5,09% соответственно, а мощность ЭПЧ равна, например, 45 кВт (69 кВА):

$X'_{тр}$ = 0,348% — для трансформатора 1000 кВА,

$X'_{тр}$ = 0,22% — для трансформатора 1 600 кВА.

На рис. 2 видно, что при таких реактансах величины высших гармоник имеют существенные значения, и можно сделать вывод о том, что при несоизмеримо большой, по сравнению с ЭПЧ-АД, мощности источника питания реактивное сопротивление трансформатора слабо подавляет высшие гармоники, поэтому в таких схемах использование сетевых дросселей обязательно. Суммарное реактивное сопротивление трансформатора и сетевого дросселя, приведённое к мощности ЭПЧ, должно быть на уровне 3%. Для выполнения этого требования необходимо правильно выбрать индуктивность сетевого дросселя.

Расчет индуктивности сетевого дросселя

Расчетная схема изображена на рис. 3.

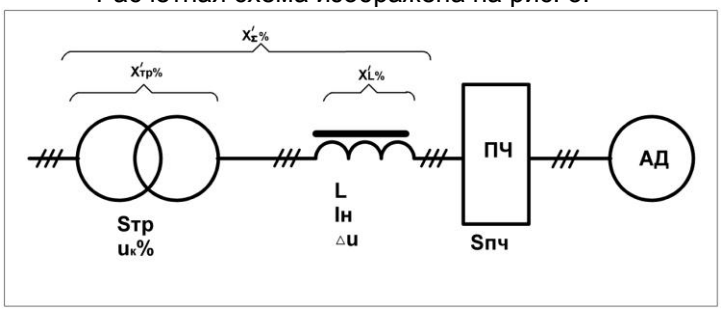


Рис.3. Расчетная схема для определения приведенного индуктивного сопротивления питающей сети

Приведенный реактанс трансформатора определяется по формуле 3:

Приведенное индуктивное сопротивление сетевого дросселя по формуле 4

$$X'_L\% = X'_\Sigma\% - X'_{тр}\% = 3 - X_{тр}\% \qquad (4)$$

Эквивалентную индуктивность дросселя можно рассчитать по формуле 5

$$L = \frac{X'_L\%}{100} \cdot \frac{\Delta U_н}{\sqrt{3}\, I_н} \cdot \frac{1}{314} \cdot \frac{S_{тр}}{S_{ПЧ}} \cdot 1000 \ (мГн) \qquad (5)$$

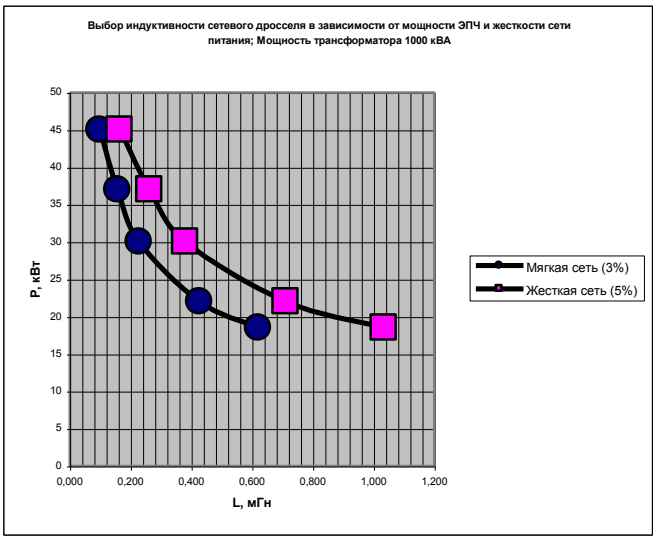
где

L—индуктивность дросселя;

$\Delta U_н$—падение напряжение на индуктивном сопротивлении сетевого дросселя при номинальном токе (3—5%$U_{ном}$);

$I_Н$—Номинальный ток ЭПЧ.

Рекомендуемое падение напряжения на дросселе: для нормальных сетей--3%; для жестких--5%. На основании приведенной выше методики выбора индуктивности сетевого дросселя построены нижеследующие диаграммы (см.рис.4 и рис. 5).



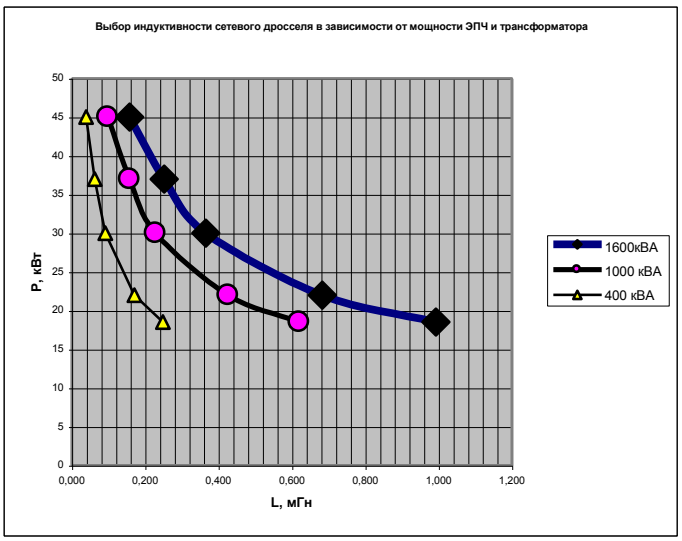


Рис.4.

Для иллюстрации сказанному в таблице 1 приведены параметры системы (ток, и коэффициент мощности, PF) для случаев прямого подключения АД, с ЭПЧ и с ЭПЧ и сетевым дросселем. При расчетах были использованы формулы 1 и 2. На рис.6 отображен гармонический спектр и форма тока на входе ЭПЧ, без сетевого дросселя и с сетевым дросселем (2.3 мГ**)**

Исходные данные:

ПЧ: мощность полная — 6,7 кВА, активная — 3.7 кВт, $I_н$ — 16,5 А;

АД: мощность — 3,7 кВт, cosφ = 0,85;

Трансформатор: мощность — 800 кВА, $X_к$ = 5%, $U_н$=200В.

Таблица 1

Параметр		Ток, %,	PF
1	Прямое подключение АД (3.7 кВт) к сети электроснабжения	100	0,85
2	Система ПЧ—АД без сетевого дросселя	152	0,56
3	Система ПЧ—АД с сетевым дросселем (L=2.4 мГ.)	104,2	0,82

Как видно, сетевой дроссель хорошо корректирует коэффициент мощности системы ЭПЧ-АД и снижает суммарный ток, потребляемый из сети за счет снижения реактивной составляющей.

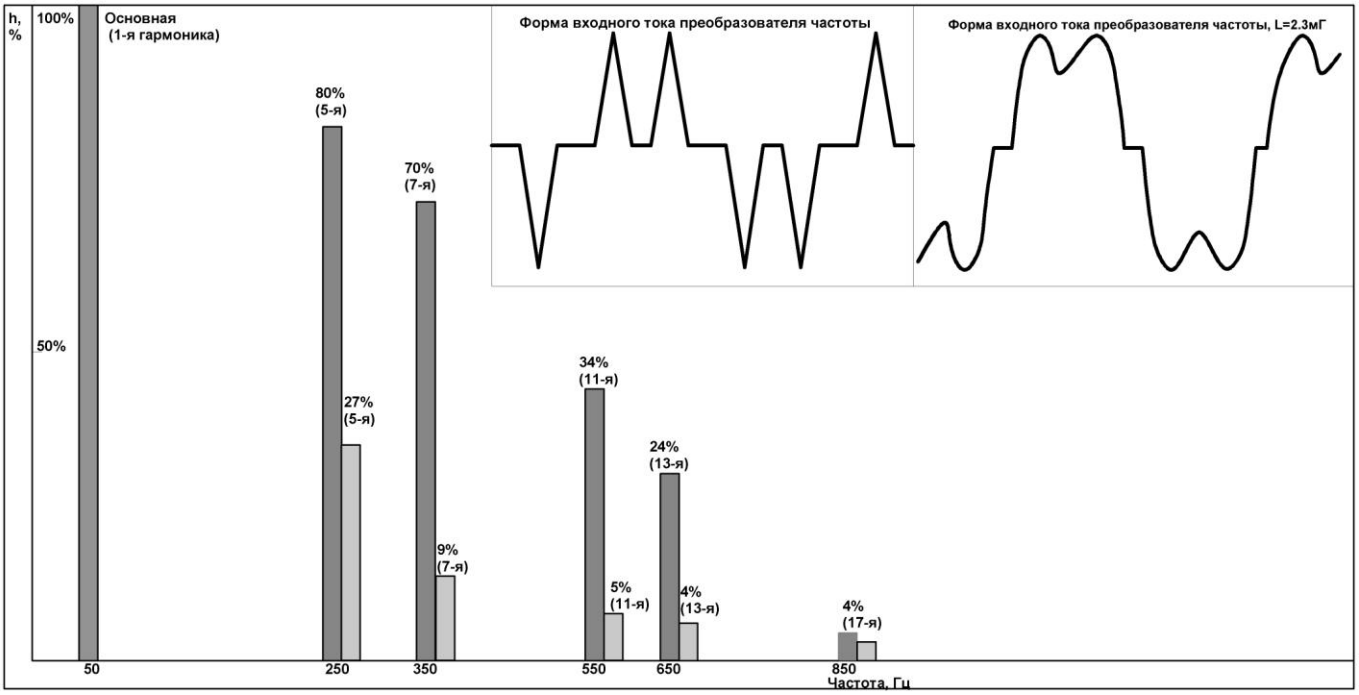


Рис. 6. Гармонический спектр и форма тока на входе ЭПЧ, ***без сетевого дросселя и с сетевым дросселем (2.3 мГ)***

2. Подавление высших гармоник входного тока ЭПЧ

Высшие гармоники тока искажают синусоиду питающего напряжения, приводя к появлению высших гармонических напряжений, токи которых циркулируют в обмотках статоров АД, в батареях статических конденсаторов, в кабельных сетях, приводя к дополнительным потерям, нагреву и снижению срока службы. Понятно, чем больше мощность ЭПЧ, тем существеннее искажение синусоиды напряжения, и тем более негативным будет влияние высших гармоник. Кроме того, они могут приводить к сбою в работе вторичных электронных приборов, всевозможных электронных датчиков, счетчиков, средств КИП и А.

3. Выравнивание линейных напряжений на входе ЭПЧ

Перекосы питающего напряжения по фазам вызывают увеличение токов через диоды неуправляемого выпрямителя ЭПЧ, что может привести к выходу их из строя. Падение напряжения на реактивном сопротивлении сетевого дросселя приводит к выравниванию линейных напряжений на входе ЭПЧ.

4. Подавление быстрых изменений напряжения на входе ЭПЧ

При скачкообразном увеличении напряжения сети (грозовые перенапряжения, коммутация батарей статических конденсаторов и т.п.) напряжение на конденсаторах в промежуточном контуре постоянного тока ЭПЧ увеличивается по экспоненциальному закону, а скорость нарастания тока через диоды ограничивается только собственной индуктивностью питающей сети. При определенных уровнях перенапряжения всплески тока могут превысить критическую для диода величину, и он выйдет из строя.

5. Снижение скорости нарастания тока короткого замыкания на выходе ЭПЧ

При коротких замыканиях на выходе ЭПЧ скорость нарастания тока через диоды выпрямителя и транзисторы инвертора ограничивается реактансом питающей сети, и чем он больше, тем выше вероятность успешного срабатывания электронной токовой защиты ЭПЧ. Реактанс питающей сети увеличивается последовательным включением сетевых и сглаживающих дросселей.

6. Увеличение срока службы электролитических конденсаторов в контуре постоянного напряжения ЭПЧ.

Одним из основных элементов структуры ЭПЧ, рис. 1. является электролитический конденсатор подключенный к выходу неуправляемого выпрямителя. При подаче питающего напряжения на вход ЭПЧ заряд конденсатора происходит через резистор (на схеме не указан). После полного заряда конденсатора срабатывает контактор, который шунтирует резистор и конденсатор оказывается подключенным непосредственно к выходу неуправляемого выпрямителя. При любых внезапных перенапряжениях на входе выпрямителя ток через конденсатор увеличивается скачкообразно и ограничивается лишь реактансом сети электроснабжения. Эти импульсные зарядные токи, кроме описанного выше, существенно снижают срок службы конденсаторов, а следовательно и срок службы ЭПЧ. Включение в цепь заряда дополнительного реактивного сопротивления в виде сетевого дросселя ограничивает величины переходных токов через конденсаторы, а следовательно увеличивает срок службы ЭПЧ.

СГЛАЖИВАЮЩИЕ ДРОССЕЛИ

Некоторые производители встраивают в свои ЭПЧ сглаживающие дроссели. Например, компания

INVT, Китай встраивает сглаживающие дроссели в модели от 18,5 до 90 кВт.

Назначение сглаживающих дросселей **ED1W**:

1. Уменьшение пульсаций выпрямленного напряжения и тока на выходе выпрямителя.
2. Повышение энергосберегающего эффекта путем увеличения коэффициента мощности системы ЭПЧ-АД.
3. Подавление высших гармоник входного тока, генерируемых неуправляемым выпрямителем ЭПЧ.
4. Снижение скорости нарастания тока короткого замыкания на выходе ЭПЧ.
5. Увеличение срока службы электролитических конденсаторов в контуре постоянного напряжения ЭПЧ.

1. Уменьшение пульсаций выпрямленного напряжения и тока на выходе выпрямителя

В цепи нагрузки любой схемы выпрямителя формируется выходное напряжение, образуемое двумя составляющими: постоянной и переменной. Чтобы ограничить переменную составляющую, между выходом выпрямителя и входом инвертора включают емкостной фильтр, состоящий из конденсатора большой емкости, или однозвенный Г-образный LC-фильтр, состоящий из сглаживающего дросселя и конденсатора (рис. 1).

Эффективность сглаживающего фильтра оценивается коэффициентом сглаживания (S_c), отражающим его способность уменьшать пульсацию.

Чем меньше S_c, тем выше эффективность фильтра. Для однозвенного Г-образного LC-фильтра коэффициент сглаживания можно рассчитать по формуле

$$s_c = \omega_1^2 L_d C - 1 \qquad (6)$$

ω_1 – *угловая скорость первой гармоники напряжения;*

L_d – *индуктивность сглаживающего дросселя;*

C – *емкость конденсатора.*

Требование к величине коэффициента сглаживания фильтра является основным при проектировании.

2–5. Повышение энергосберегающего эффекта от внедрения ЭПЧ; подавление высших гармоник входного тока; снижение скорости нарастания тока КЗ на выходе ЭПЧ; Увеличение срока службы электролитических конденсаторов в контуре постоянного напряжения ЭПЧ.

Принцип действия сглаживающего дросселя в этом качестве аналогичен действию сетевого дросселя и рассмотрен выше.

Сглаживающий дроссель **ED1W** более эффективно подавляет 5-ю и 7-ю гармоники, а сетевой дроссель **ED3N**—11-ю и выше. Поэтому оптимальный результат достигается в случае совместного использования сетевого и сглаживающего дросселей. Типовая иллюстрация этого факта отображена в таблице.

Метод определения гармоник	Уровень гармоники по отношению к первой (%)							
	5ая гармоника	**7ая гармоника**	**11ая гармоника**	**13ая гармоника**	**17ая гармоника**	**19ая гармоника**	**23ая гармоника**	**25ая гармоника**
Без дросселей	**65**	**41**	**8,5**	**7,7**	**4,3**	**3,1**	**2,6**	**1,8**
AC-дроссель	**38**	**14,5**	**7,4**	**3,4**	**3,2**	**1,9**	**1,7**	**1,3**
DC-дроссель	**30**	**13**	**8,4**	**5**	**4,7**	**3,2**	**3,0**	**2,2**
AC-дроссель и DC-дроссель	**28**	**9,1**	**7,2**	**4,1**	**3,2**	**2,4**	**1,6**	**1,4**

ВЫВОДЫ

1. Корректный выбор индуктивности сетевого дросселя в составе ЭПЧ позволяет более полно использовать его энергосберегающие возможности.

2. Сетевой дроссель защищает сеть от высших гармоник, генерируемых неуправляемым выпрямителем ЭПЧ, а также его самого от всплесков напряжения и перекосов линейных напряжений питающей сети.