

Фирма ELHAND TRANSFORMATORY  
Национальный университет «Львівська політехніка»

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРОССЕЛЕЙ ФИРМЫ ELHAND TRANSFORMATORY**

В последнее десятилетие экономия электроэнергии является одним из приоритетных направлений экономической политики большинства стран Восточной Европы. И в этой связи на промышленных предприятиях широкое распространение получили энергосберегающие преобразователи частоты (ПЧ), которые используются в качестве регуляторов производительности энергетических установок (насосов, вентиляторов, компрессоров и т.п.). Для получения максимального энергосберегающего эффекта ПЧ необходимо оснащать сетевыми и (или) сглаживающими дросселями. Но при этом практически всегда возникает один и тот же вопрос: нужно ли и в каких случаях необходимо использовать дополнительные дроссели.

Фирма ELHAND TRANSFORMATORY, Польша изготавливает дроссели, разработку и исследование которых проводит совместно с научными организациями. Фирма всегда готова к сотрудничеству с зарубежными партнерами. Система обеспечения качества, отвечающая требованиям нормы ISO-9001, внедренная на фирме ELHAND TRANSFORMATORY и имеющая сертификаты соответствия требованиям норм: ГОСТ-Р, Укр-СЕПРО, гарантирует наивысшее качество и повторяемость технических параметров выпускаемых дросселей. Дроссели, производимые фирмой, имеют характеристики аналогичные «фирменным», но при этом значительно дешевле.

Типовая схема подключения дросселей изображена на рис. 1. В структуру системы на базе энергосберегающего ПЧ, как правило, входят: сетевой ED3N, сглаживающий ED1W дроссели и дроссель двигателя ED3S.

**СЕТЕВЫЕ ДРОССЕЛИ**

Сетевой дроссель (ED3N) подключаются к входу ПЧ и является двухсторонним буфером между сетью электроснабжения и ПЧ.

Назначение сетевых дросселей

1. Повышение энергосберегающего эффекта от внедрения ПЧ путем увеличения коэффициента мощности системы ПЧ-асинхронный двигатель (АД);
2. Подавление высших гармоник входного тока ПЧ, генератором которых является неуправляемый выпрямитель ПЧ;
3. Выравнивание линейных напряжений на входе ПЧ при перекосах питающего напряжения;
4. Подавление быстрых изменений напряжения на входе ПЧ (грозовые перенапряжения, коммутация батарей статических конденсаторов и т.п.)
5. Снижение скорости нарастания тока короткого замыкания на выходе ПЧ.

Выбор сетевого дросселя фирма рекомендует производить исходя из желаемого повышения энергосберегающего эффекта от внедрения ПЧ

При питании АД от промышленной сети его коэффициент мощности (PF) равен  $\cos \varphi$  АД. Ситуация существенно ухудшается когда питание АД осуществляется от ПЧ. Коэффициент мощности (PF) системы ПЧ-АД становится меньше  $\cos \varphi$ , а это значит, что увеличивается реактивная составляющая мощности (Q, кВАр) и как следствие полная мощность (S, кВА), потребляемый системой ПЧ-АД из сети электроснабжения. Причиной этого явления являются высшие гармоники тока, а именно  $5^{\text{а}}, 7^{\text{а}}, 11^{\text{а}}, 13^{\text{а}}, 17^{\text{а}}, 19^{\text{а}}$ , генерируемые неуправляемым выпрямителем ПЧ. То есть в сети будут циркулировать, кроме токов основной частоты 50 Гц, токи с частотами 250, 350, 550, 650, 850, 950 Гц. Выражения (1) и (2) иллюстрируют негативное влияние описанного явления.

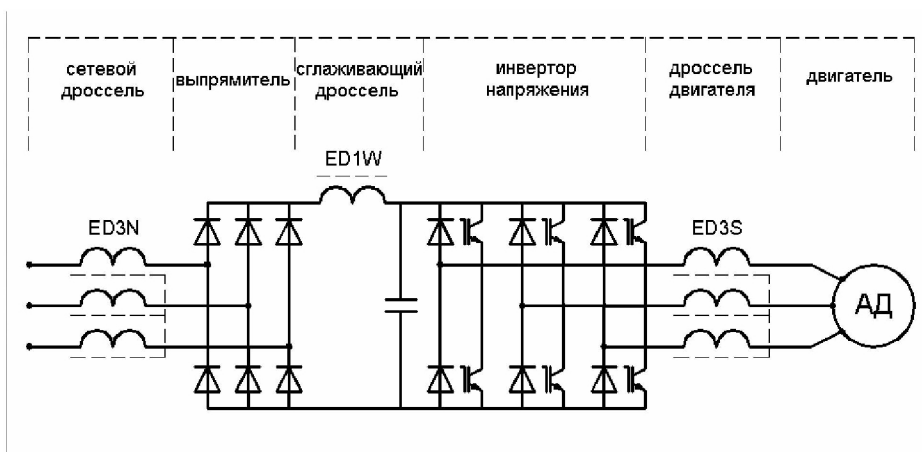


Рис.1. Типовая схема подключения энергосберегающего преобразователя частоты, например, TOSHIBA

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

$$I_s = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + \dots} \quad (2)$$

Где: PF-коэффициент мощности системы ПЧ-АД; P- активная мощность потребляемая из сети системой ПЧ-АД; S-полная мощность потребляемая из сети системой ПЧ-АД;  $U_1$  - действующее значение первой гармоники напряжения;  $I_1$  - действующее значение первой гармоники тока;  $\cos \varphi$  - коэффициент мощности при питании АД от промышленной сети;  $I_s$  - действующее значение суммарного тока;  $I_n$  - действующее значение n-гармоники тока.

Из формул (1,2) видно, что 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 ПЧ-АД от индуктивного сопротивления питающей сети приведенного к мощности ПЧ.

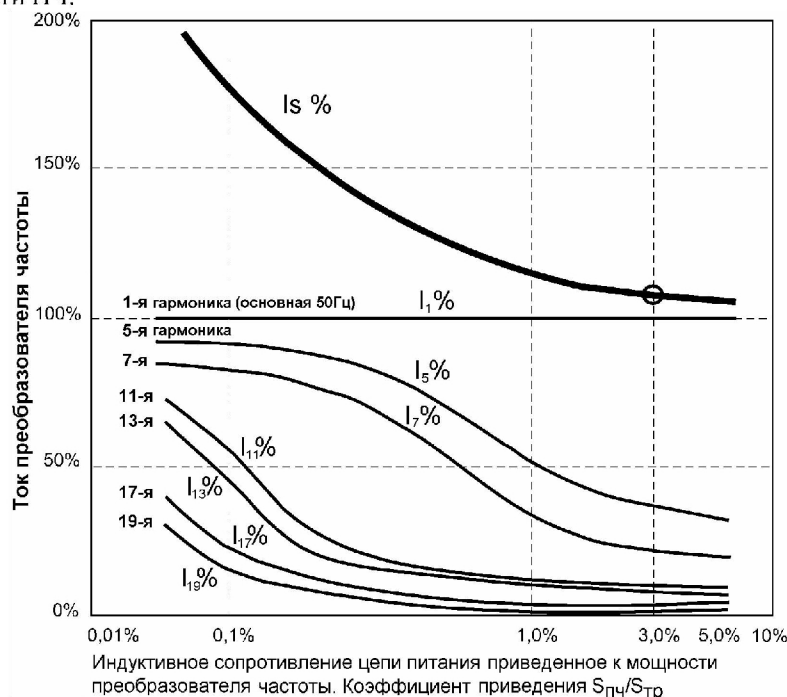


Рис.2. Зависимость суммарного тока ПЧ и его гармонических составляющих от индуктивного сопротивления питающей сети

форматора (кВА)

Из (3) видно, что чем больше мощность питающего трансформатора, по сравнению с мощностью ПЧ, тем ниже приведенный реактанс в цепи ПЧ и, следовательно, тем выше амплитуды высших гармоник.

Питание систем ПЧ-АД, как правило, осуществляется от цеховых трансформаторных подстанций с типовыми мощностями 1000 кВА или 1600 кВА. Для оценки величины приведенного индуктивного сопротивления этих трансформаторов воспользуемся (3) с учетом того что  $u_k\%$  равно 5,05% и 5,09% соответственно для трансформаторов 1000 и 1600 кВА. Мощность ПЧ равна, например, 45кВт (69кВА). Тогда

$$X'_{тр} \% = 0,348\% - \text{для трансформатора } 1000\text{кВА}; \quad X'_{тр} \% = 0,22\% - \text{для трансформатора } 1600\text{кВА}$$

Из рис.2 видно, что при таких реактансах величины высших гармоник имеют существенные значения и для их подавления обязательно нужно использовать сетевой дроссель. Из последних двух выражений можно сделать вывод о том, что при несоизмеримо большей мощности источника питания системы ПЧ-АД реактивное сопротивление трансформатора слабо подавляет высшие гармоники. В таких схемах обязательно использование сетевых дросселей. Суммарное приведенное к мощности ПЧ реактивное сопротивление трансформатора и сетевого дросселя должно быть на уровне 3%. Для выполнения этого требования необходимо правильно выбрать индуктивность сетевого дросселя.

Расчет индуктивности сетевого дросселя

Приведенное индуктивное сопротивление сетевого дросселя находим из выражения.

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

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

В случае подключения системы ПЧ-АД без сетевого дросселя приведенная индуктивность питающей сети находится из выражения (3).

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

где

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

$u_k \%$  - напряжение короткого замыкания трансформатора (%);

$S_{ПЧ}$  - полная мощность преобразователя (кВА);

$S_{тр}$  - полная мощность транс-

где приведенное индуктивное сопротивление трансформатора находим в соответствии с (3).

Величину эквивалентной индуктивности дросселя (L) можно рассчитать по выражению

$$L = \frac{X_L' \%}{100} \cdot \frac{\Delta U_H}{\sqrt{3} I_H} \cdot \frac{1}{314} \cdot \frac{S_{тр}}{S_{пч}} \cdot 1000 \text{ (мГн)}, \quad (5)$$

где:  $\Delta U_H$ —падение напряжение на индуктивном сопротивлении сетевого дросселя при номинальном токе ( $3—5\%U_H$ );  $I_H$ —Номинальный ток ПЧ.

Падение напряжения на дросселе рекомендуется выбирать: для мягких сетей 3%; для мощных - 5%. На основании приведенной выше методики выбора индуктивности сетевого дросселя построены диаграммы (см.рис.3 и рис. 4).

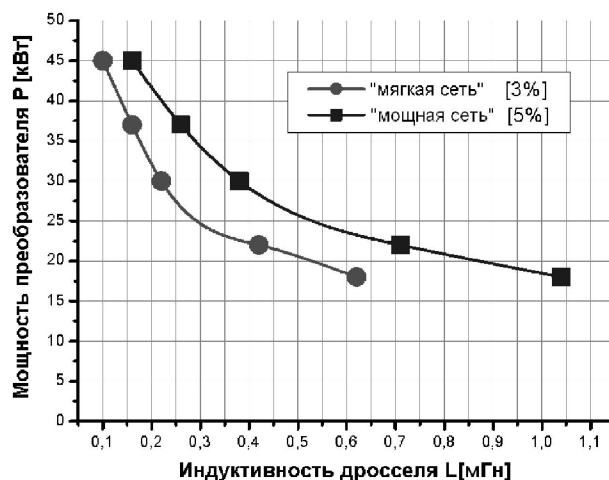


Рис.3.

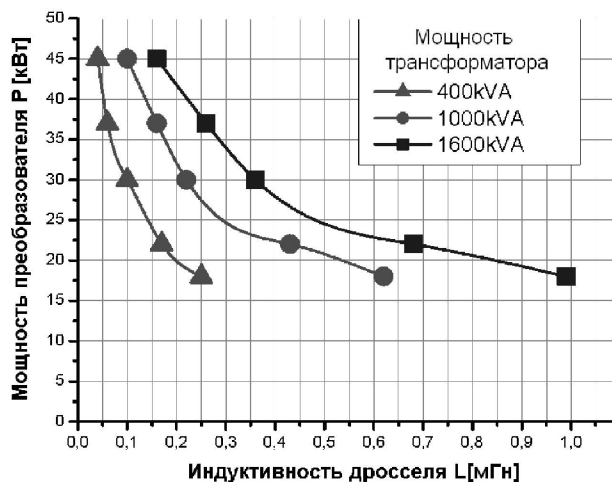


Рис.4.

Из рис.4. видно, что требуемая индуктивность сетевого дросселя существенно изменяется в зависимости от мощности трансформатора.

Для иллюстрации негативного влияния высших гармоник рассмотрим конкретный пример подключения системы ПЧ-АД к промышленной сети.

Исходные данные:

Преобразователь частоты - VFS9-2037PM, Toshiba,  $S_{эпч}$ -6,7кВА,  $P$ =3,7кВт,  $I_H$ =16,5А; Асинхронный двигатель 3,7 кВт, 2-пары полюсов,  $\cos\phi$ =0,85; Трансформатор-  $S_{тр}$ =800кВА,  $X_k\%$ =5%,  $U_H$ =200В.

Сравниваются два варианта подключения системы ПЧ-АД: а) без сетевого дросселя; б) с сетевым дросселем. Результаты сравнения сведены в таблицу. При расчетах были использованы выражения (1) и (2)

Параметр		Ток сист. $I_s$ , %	Кэфф мощн. 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 мГн.)	104,2	0,82

На рис.5 показаны гармонический спектр и форма тока на входе ПЧ без сетевого дросселя и с сетевым дросселем.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Входной ток системы ПЧ-АД без сетевого дросселя вырос на 52% по сравнению с номинальным током АД при питании его от промышленной сети;
2. Коэффициент мощности ПЧ-АД без сетевого дросселя снизился на 34% по сравнению с  $\cos\phi$  АД.
3. Входной ток системы ПЧ-АД с сетевым дросселем вырос на 4,2% по сравнению с номинальным током АД при питании его от промышленной сети;
4. Коэффициент мощности системы ПЧ-АД с сетевым дросселем снизился на 3,5%;
5. Сетевой дроссель, хорошо корректирует коэффициент мощности системы ПЧ-АД и снижает суммарный ток потребляемый из сети электроснабжения за счет снижения реактивной составляющей.

#### СГЛАЖИВАЮЩИЕ ДРОССЕЛИ

Назначение сглаживающих дросселей

1. Уменьшение пульсаций выпрямленного напряжения и тока на выходе выпрямителя. Чтобы ограничить переменную составляющую выходного напряжения, между выходом выпрямителя и входом инвертора включают емкостной фильтр, состоящий из электролитического конденсатора большой емкости, или однозвенный Г-образный LC-фильтр, состоящий из сглаживающего дросселя и конденсатора, см. рис.1. Эффективность сглаживающего фильтра оценивают по его способности уменьшать пульсацию, т.е. по

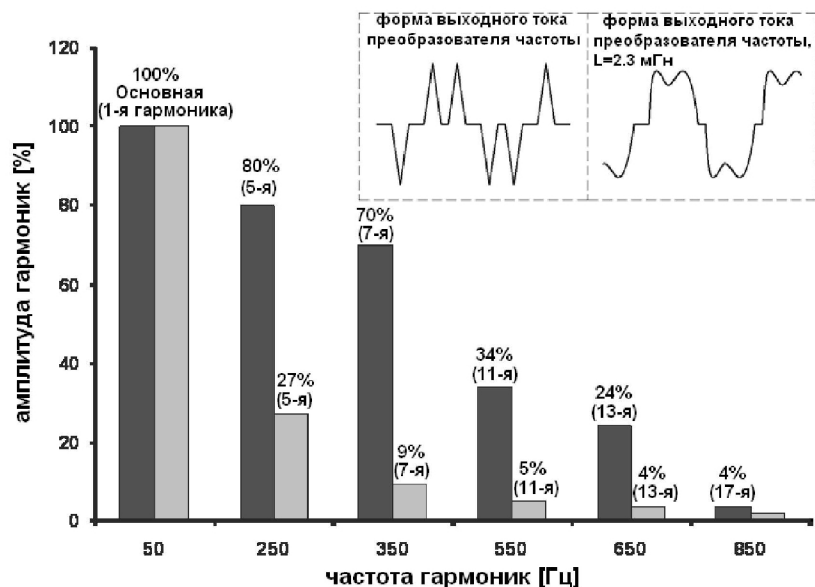


Рис. 5. Гармонический спектр и форма тока на входе ПЧ частоты типа VF S9-2037-PM (3.7 kW), TOSHIBA, без сетевого дросселя (темный цвет) и с сетевым дросселем (светлый цвет) ED3N-2.3/18 (2.3 мГн)

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.

Схема ПЧ-АД	Уровень гармоники по отношению к первой (%)							
	5 <sup>я</sup> гарм.	7 <sup>я</sup> гарм.	11 <sup>я</sup> гарм.	13 <sup>я</sup> гарм.	17 <sup>я</sup> гарм.	19 <sup>я</sup> гарм.	23 <sup>я</sup> гарм.	25 <sup>я</sup> гарм.
Без дросселей	65	41	8,5	7,7	4,3	3,1	2,6	1,8
АС-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
АС и DC-др	28	9,1	7,2	4,1	3,2	2,4	1,6	1,4

#### ДРОССЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ.

Назначение дросселя двигателя

1. Ограничение скорости нарастания напряжения на выходе ПЧ, которое представляет собой ШИМ сигнал, путем установки между двигателем и ПЧ дросселя двигателя типа ED3S (см. рис.1), что снижает риск повреждения изоляции двигателя.

2. Ограничение тока короткого замыкания на выходе ПЧ до момента срабатывания защиты. На практике часто двигатель значительно удален от ПЧ.

3. Компенсация емкости питающей линии, а также ограничивает гармоник и коммутационных перенапряжения в цепи АД, что уменьшает нагревание двигателя.

#### ВЫВОДЫ:

1. Правильный выбор индуктивности сетевого дросселя в составе преобразователя частоты позволяет более полно использовать энергосберегающие свойства ПЧ, работающего в качестве регулятора производительности насоса, вентилятора и других механизмов с вентиляторной механической характеристикой в функции заданного технологического параметра, например, давления;

2. Сетевой дроссель защищает сеть электроснабжения от высших гармоник, генератором которых является неуправляемый выпрямитель энергосберегающего преобразователя частоты;

3. Сетевой дроссель защищает сам преобразователь частоты от: всплесков напряжения в сети электроснабжения; перекосов линейных напряжений питающей сети.

4. Сглаживающий дроссель целесообразно использовать совместно с сетевым дросселем для преобразователей частоты мощностью более 55 кВт.

5. Дроссель двигателя необходимо использовать при длинных кабельных линиях или высокой вероятности короткого замыкания на выходе преобразователя частоты

6. Дроссели фирмы ELHAND экономически выгодная альтернатива «фирменным» дросселям.

#### Литература.

1. Hitachi inverter L300P series. Instruction manual Tokyo, Japan, 2006.
2. Hitachi inverter. Technical guide book. Tokyo, Japan, 2006.
3. Mitsubishi transistorized inverter FR-E500. Instruction manual, Japan, 2007.

значению коэффициента сглаживания  $S_c$ . Для однозвенного Г-образного LC-фильтра коэффициент сглаживания можно рассчитать по формуле

$$s_c = \omega_1^2 L_d C - 1$$

(6)

Требование к коэффициенту сглаживания фильтра является основным при проектировании

2.Повышение энергосберегающего эффекта от внедрения ПЧ путем увеличения коэффициента мощности системы ПЧ-АД;

3. Снижение скорости нарастания тока КЗ на выходе ПЧ.

4.Подавление (аналогично сетевому дросселю) высших гармоник входного тока ПЧ, генератором которых является неуправляемый выпрямитель ПЧ

Сглаживающий дроссель