

УДК 621.314.672

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МОЩНОСТИ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ И ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ» НА ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЕЕ ПЕРЕРЫВИСТОГО ВХОДНОГО ТОКА

Докт. техн. наук, проф. ФИРАГО Б. И., асп. МЕДВЕДЕВ К. М.

Белорусский национальный технический университет

Проблема электромагнитной совместимости различной преобразовательной техники, используемой для управления электроприводами, с системой электроснабжения в настоящее время является весьма актуальной. Этому, в частности, способствует активное внедрение в промышленное производство на территории Республики Беларусь преобразователей частоты (ПЧ), которые используются для эффективного управления режимами работы асинхронных электродвигателей (АД).

Такие системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ–АД) генерируют в электрическую сеть типичный для неуправляемых шестипульсных выпрямителей спектр канонических (соответствующих числу пульсаций) высших гармоник тока, определяемый выражением [1]

$$k = 6p \pm 1, \quad (1)$$

где k – номер гармоники тока; $p = 1; 2; 3; \dots$ – целые числа.

Кроме того, системы ПЧ–АД могут выдавать в сеть и неканонические гармоники [1–3], величина которых зависит от уровня несимметрии параметров питающей сети и самой ПЧ–АД.

Негативное влияние высших гармоник тока на систему электроснабжения давно и хорошо известно, поэтому знание и контроль уровней этих токов необходимы.

В литературных источниках изучение высших гармонических токов, генерируемых неуправляемыми выпрямителями, как правило, основывается на предположении идеальности кривой входного тока, имеющей прямоугольную либо трапецеидальную форму. Однако форма кривой входного тока системы ПЧ–АД практически всегда значительно отличается от идеальной, являясь зачастую прерывистой. Уровни высших гармоник тока в таком случае зависят от номинальной мощности, величины нагрузки ПЧ–АД и мощности питающей сети (в основном от индуктивной составляющей ее сопротивления).

Изучение влияния указанных параметров на гармонический состав входного тока системы ПЧ–АД представляется весьма важным, поскольку это позволит адекватно оценивать уровни высших гармоник тока в электрических сетях, от которых питаются данные установки. Кроме того, появится возможность использовать полученные данные для осуществления корректной эксплуатации и проектирования электроустановок с целью обеспечения электромагнитной совместимости ПЧ–АД с сетью в рамках действующих стандартов.

В [1] и [2] приводятся информация и некоторая оценка влияния сопротивления системы электроснабжения на гармонический состав входных токов вентиляльных преобразователей. Этой же проблеме для современных ПЧ посвящены и некоторые отечественные, а также зарубежные публикации [4, 5]. Это свидетельствует о возрастающем интересе к изучению вопросов электромагнитной совместимости преобразовательных установок электропривода с питающей сетью и необходимости дальнейших исследований в данной области.

Методика проведения исследований. Исследование гармонического состава входных токов системы ПЧ–АД проводилось с помощью разработанной в [6] математической модели. Схема проведения эксперимента приведена на рис. 1.

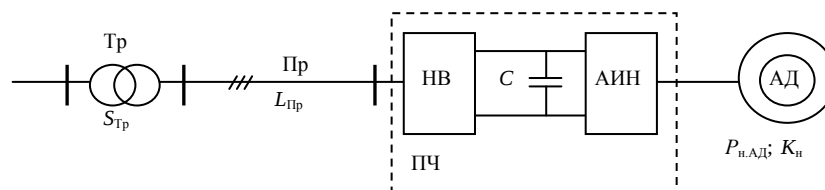


Рис. 1. Схема проведения исследований: Тр – питающий трансформатор; $S_{Тр}$ – номинальная мощность питающего трансформатора; Пр – питающий проводник; $L_{Пр}$ – длина питающего проводника; ПЧ – преобразователь частоты, в состав которого входят: НВ – неуправляемый выпрямитель; С – емкостный фильтр контура выпрямленного тока; АИН – автономный инвертор напряжения; АД – асинхронный двигатель; $P_{н.АД}$ – номинальная мощность АД; K_n – коэффициент нагрузки АД

При проведении эксперимента предполагалось отсутствие в комплектации ПЧ сетевых дросселей и дросселя контура выпрямленного тока. Эти дроссели, служащие в том числе и для снижения содержания высших гармоник в сетевом и выпрямленном токе ПЧ, часто являются дополнительными устройствами и далеко не всегда входят в заводскую комплектацию преобразователя частоты. Поэтому в данном исследовании представляет интерес проведение «чистого» эксперимента без учета влияния дополнительных индуктивностей.

Исследования проводились в следующем порядке:

1) рассчитывались зависимости гармонического состава входного тока системы ПЧ–АД от:

- номинальной мощности АД $P_{н.АД}$ при следующих параметрах: $S_{Тр} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $\epsilon_c = 5 \%$; $K_n = 100 \%$; номинальные мощности АД взяты из

номинального ряда для двигателей типа 4А: 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110 кВт;

- номинальной мощности питающего сетевого трансформатора $S_{Тр}$ при следующих параметрах: $P_{н.АД} = 15$ кВт; $\varepsilon_c = 5$ %; $K_n = 100$ %; взяты трансформаторы с типовыми в цеховых сетях номиналами мощностей 630, 1000, 1600 и 2500 кВ · А;

- коэффициента нагрузки K_n двигателя при следующих параметрах: $S_{Тр} = 1000$ кВ · А; $P_{н.АД} = 15$ кВт; $\varepsilon_c = 5$ %;

- емкости фильтра контура выпрямленного тока C , выраженной величиной относительной пульсации выпрямленного напряжения ε_c , при следующих параметрах: $S_{Тр} = 1000$ кВ · А; $P_{н.АД} = 15$ кВт; $K_n = 100$ %.

Величина ε_c определяется в зависимости от требуемого уровня пульсаций выпрямленного напряжения и используется для расчета емкости фильтра контура выпрямленного тока C

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta U_d}{U_d} \cdot 100, \%, \quad (2)$$

где ΔU_d – абсолютная желаемая величина пульсаций выпрямленного напряжения; U_d – выпрямленное напряжение.

Тогда емкость C для номинального режима работы АД можно определить по формуле

$$C = \frac{3I_{1н}^2 \eta_{н.АД} \operatorname{tg} \varphi_{АД}}{P_{н.АД} \omega_{1н}} \frac{1}{\varepsilon_c}, \quad (3)$$

где $I_{1н}$ – номинальный ток АД, А; $\eta_{н.АД}$ – номинальный КПД АД, %; $\omega_{1н}$ – номинальная угловая частота сети (при 50 Гц), рад/с; $\operatorname{tg} \varphi_{АД}$ – номинальный коэффициент реактивной мощности АД.

Длина проводника $L_{пр}$ была принята равной 7 м, сечение – в зависимости от мощности ПЧ–АД;

2) по рассчитанным зависимостям были построены соответствующие графики (рис. 2–5);

3) проведено сравнение уровней высших гармоник тока, генерируемых системой ПЧ–АД, с имеющимися стандартами.

Действующий на территории Республики Беларусь стандарт на качество электроэнергии [7] не содержит норм, ограничивающих генерацию токов высших гармоник какими-либо техническими средствами.

С 1 августа 2006 г. на территории Республики Беларусь введен в действие стандарт СТБ МЭК 61000-3-2-2006 [8], который ограничивает эмиссию гармонических составляющих тока для оборудования с потребляемым током не более 16 А в одной фазе. Согласно этому документу все технические средства подразделяют на четыре класса:

- класс А – симметричные трехфазные технические средства, не подпадающие под классы В, С, D;
- класс В – переносные электроинструменты;
- класс С – световые приборы, включая устройства регулирования;

• класс D – технические средства с потребляемым током специальной прямоугольно-ступенчатой формы и активной мощностью менее 600 Вт.

Как видно из классификации, системы ПЧ–АД должны включаться в класс А, хотя далеко не все из них потребляют ток не более 16 А. В табл. 1 приведены нормы для самых весомых нечетных канонических гармоник [8].

Таблица 1

Номер гармоники k	5	7	11	13	17	19
Ток k -й гармоники $I_{(k)}$, А	1,14	0,77	0,4	0,21	0,132	0,118

Результаты исследований. Зависимости гармонического состава входного тока системы ПЧ–АД от номинальной мощности АД, мощности трансформатора, нагрузки АД и емкости фильтра контура выпрямленного тока приведены на рис. 2–5.

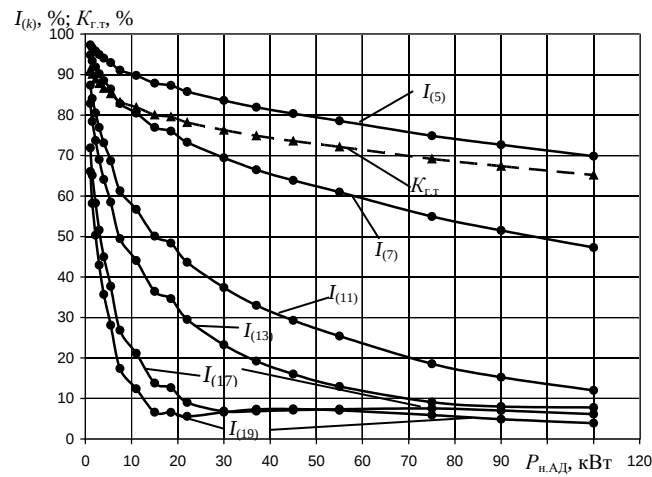


Рис. 2. Зависимости гармонического состава входного тока системы ПЧ–АД от номинальной мощности питаемого АД $P_{н.АД}$: $S_{Тр} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $\epsilon_c = 5 \%$; $K_H = 100 \%$

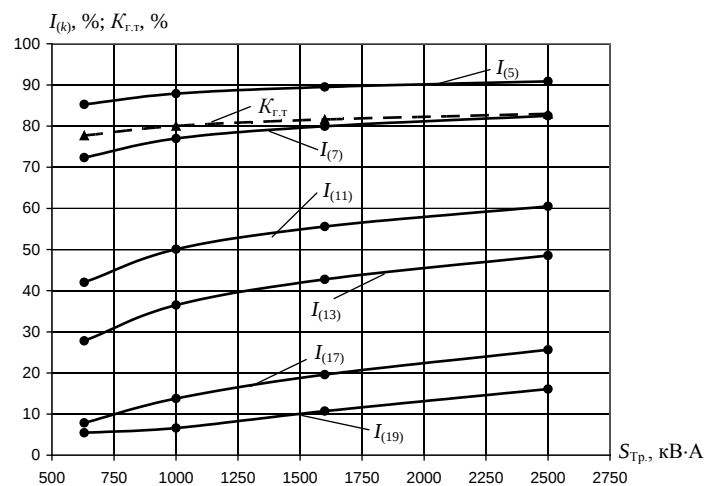


Рис. 3. Зависимости гармонического состава входного тока системы ПЧ–АД от номинальной мощности питающего трансформатора $S_{Тр}$: $P_{н.АД} = 15 \text{ кВт}$; $\epsilon_c = 5 \%$; $K_H = 100 \%$

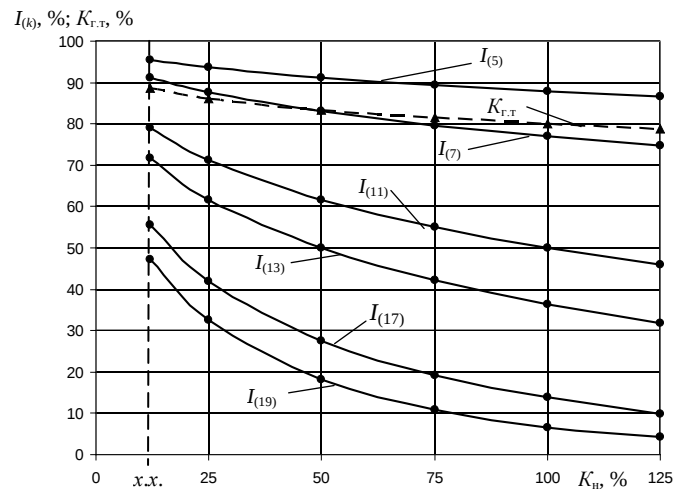


Рис. 4. Зависимости гармонического состава входного тока системы ПЧ–АД от коэффициента нагрузки АД K_n : $S_{Tp} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $P_{н.АД} = 15 \text{ кВт}$; $\varepsilon_c = 5 \%$

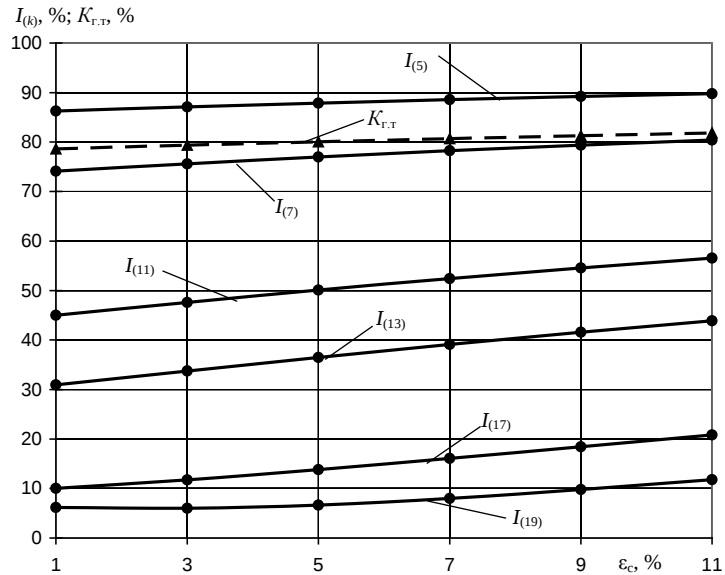


Рис. 5. Зависимости гармонического состава входного тока системы ПЧ–АД от емкости фильтра контура выпрямленного тока C , выраженной величиной ε_c :
 $S_{Tp} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $P_{н.АД} = 15 \text{ кВт}$, $K_n = 100 \%$

На графиках приняты следующие обозначения:

1) $I_{(k)}, \%$ – относительное значение тока k -й гармоники, определяемое по выражению

$$I_{(k)}, \% = \frac{I_{(k)}, \text{А}}{I_{(1)}, \text{А}} \cdot 100, \% \quad (4)$$

где $I_{(k)}, \text{А}$ – абсолютное значение тока k -й гармоники тока, А ; $I_{(1)}, \text{А}$ – то же 1-й (основной) гармоники тока, А ;

2) $K_{г.т}$ – коэффициент гармоник тока, определяемый по выражению

$$K_{г.т.} = \frac{\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2}}{I} \cdot 100, \%, \quad (5)$$

где I – полный входной ток ПЧ–АД.

В табл. 2 приведены значения токов высших гармоник системы ПЧ–АД для АД различной номинальной мощности для оценки выполнения норм [8]. Данные табл. 2 взяты из результатов моделирования и гармонического анализа кривых входного тока ПЧ–АД при: $S_{Гр} = 1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $\varepsilon_c = 5 \%$; $K_n = 100 \%$.

Таблица 2

Номер гар- моники k $P_{н.АД}, \text{ кВт}$	5	7	11	13	17	19	Полный ток ПЧ–АД $I, \text{ А}$
0,09	0,139	0,138	0,135	0,133	0,128	0,126	0,477
0,12	0,185	0,183	0,178	0,175	0,168	0,164	0,608
0,18	0,277	0,274	0,266	0,261	0,248	0,241	0,879
0,25	0,384	0,379	0,365	0,357	0,335	0,323	1,16
0,37	0,569	0,562	0,541	0,527	0,494	0,475	1,7
0,55	0,842	0,828	0,786	0,76	0,696	0,661	2,36
0,75	1,144	1,12	1,05	1,01	0,91	0,855	3,07
1,1	1,64	1,6	1,48	1,4	1,21	1,12	4,15
1,5	2,26	2,18	1,96	1,83	1,52	1,36	5,4
2,2	3,28	3,15	2,76	2,53	2,0	1,73	7,5
3,0	4,44	4,22	3,6	3,23	2,41	2,01	9,78
4,0	5,87	5,53	4,57	4,0	2,81	2,23	12,51
5,5	8,6	8,0	5,91	5,03	3,24	2,42	16,5

Результаты оценки соответствия уровней токов высших гармоник указанному стандарту, полученные путем сравнения представленных в табл. 1 и 2 данных, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Номер гармоники k	5	7	11	13	17	19
$P_{н.АД}, \text{ кВт}$	0,55	0,37	0,25	0,12	0,09	–

Из данных табл. 3 можно сделать вывод, что СТБ МЭК 61000-3-2-2006 полностью не соответствует ни одна система ПЧ–АД даже с АД с минимально существующей номинальной мощностью. Поэтому для снижения токов высших гармоник во входном токе систем ПЧ–АД до уровней, указанных в данном стандарте, абсолютно необходимо применение соответствующих мероприятий, в частности установка тех же сетевых дросселей и дросселей в контуре выпрямленного тока.

ВЫВОДЫ

1. Анализируя зависимость гармонического состава входного тока ПЧ–АД от номинальной мощности АД, можно сделать следующие выводы:

- чем меньше мощность АД, подключенного к ПЧ, тем сильнее искажена форма входного тока системы ПЧ–АД;
- для ПЧ–АД небольших мощностей (с АД приблизительно до 7,5 кВт) соизмеримый вклад в сильно искаженную форму кривой входного тока вносят как 5-я и 7-я гармоники, так и гармоники более высоких порядков (11-, 13-, 17-, 19-я и выше);

• форма входного тока ПЧ–АД с АД мощностью более 15 кВт определяется в основном 5-й и 7-й гармониками; уровень 11-й гармоники уже значительно ниже 7-й, а значения токов 17-й и 19-й – не превышают 6–8 %.

2. С увеличением мощности питающего трансформатора (т. е. с уменьшением его индуктивного сопротивления) искажение кривой входного тока ПЧ–АД усиливается. Однако это влияние не одинаково для различных мощностей питаемого АД. В данном случае был взят АД мощностью 15 кВт, но чем двигатель мощнее, тем сильнее влияет мощность трансформатора на гармонический состав входного тока ПЧ–АД.

3. Величина нагрузки АД также весьма заметно влияет на гармонический состав входного тока системы ПЧ–АД (рис. 4), и это влияние так же, как и влияние мощности питающего трансформатора, не является одинаковым для разных номинальных мощностей двигателя. С увеличением номинальной мощности АД влияние коэффициента нагрузки усиливается.

4. Влияние величины емкости фильтра контура выпрямленного тока на уровень искажения кривой сетевого тока системы ПЧ–АД выражено гораздо меньше, чем влияние других параметров (рис. 5). Однако увеличение ϵ_c (т. е. уменьшение величины емкости C) несколько увеличивает содержание высших гармоник в кривой сетевого тока.

5. Что касается соответствия уровней токов высших гармоник стандарту СТБ МЭК 61000-3-2-2006, то для данного случая только ПЧ–АД с номинальной мощностью АД до 4,0 кВт включительно подпадает под действие данного документа, так как полный ток АД следующего номинала 5,5 кВт больше 16 А.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
2. Arrillaga, J. Power system harmonics / J. Arrillaga, N. R. Watson // Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2003.
3. Фираго, Б. И. Оценка влияния несимметрии напряжения питающей сети на гармонический состав прерывистого входного тока системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» / Б. И. Фираго, К. М. Медведев // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2005. – № 3 (22).
4. Морозов, И. М. Дроссели фирмы ELHAND TRANSFORMATORY в составе энергосберегающих преобразователей частоты // И. М. Морозов, М. Лукевски // Электромагизин. – 2003. – № 9 (30).
5. Manfred, G. Line current harmonics of VSI-fed adjustable-speed drives / G. Manfred, R. Reiner // IEEE Transactions on industry applications. – 2000. – Vol. 36, № 2.
6. Фираго, Б. И. Анализ входных токов системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» при несимметрии питающего напряжения / Б. И. Фираго, К. М. Медведев // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 1.
7. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997.
8. Электромагнитная совместимость. Часть 3-2. Нормы. Нормы и эмиссии гармонических составляющих тока для оборудования с потребляемым током не более 16 А в одной фазе: СТБ МЭК 61000-3-2-2006. – Минск: Госстандарт, 2006.

Представлена кафедрой ЭАПУ и ТК

Поступила 13.02.2006