

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 631.3

В.А. Тихомиров², С.В. Хватов¹

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА СЕТЕВОГО ТОКА УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
ООО «Экологические технологии»¹

Для двух самых распространенных типов современного регулируемого привода постоянного и переменного тока исследованы негативные последствия от циркуляции в питающей сети высших гармоник. Даны рекомендации по компенсации мощности искажения. Материал рассмотрен на примере многолетней эксплуатации полупроводниковых приводов буммашины на одном из предприятий г. Балахна.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, электропривод переменного тока, $\cos\varphi$, высшие гармоники, мощность искажения, компенсация мощности искажения.

Основным энергетическим показателем для различных типов преобразователей электрической энергии является коэффициент мощности K_M , который определяется отношением активной мощности, потребляемой из сети (определяется только первыми гармониками тока и напряжения), к полной мощности, т.е.:

$$K_M = P_{(1)}/S = P_{(1)} \cdot S_{(1)} / S_{(1)} \cdot S = \cos\varphi \cdot K_{\text{и}},$$

где $P_{(1)}$ – активная мощность первой гармоники; S – полная мощность; $S_{(1)}$ – полная мощность первой гармоники.

В выражении для коэффициента мощности имеются две составляющие $\cos\varphi$ и $K_{\text{и}}$, которые называются соответственно коэффициентами сдвига и искажения. При допущении о синусоидальной неискаженной форме напряжения они характеризуют одновременно фазовый сдвиг первой гармоники сетевого тока и коэффициент искажения формы сетевого тока $K_{\text{и}} = I_{\text{ф}(1)}/I_{\text{ф}}$, где $I_{\text{ф}(1)}$ – действующее значение первой гармоники сетевого тока; $I_{\text{ф}}$ – действующее значение полного тока сети.

Подробный анализ коэффициента сдвига в регулируемых приводах постоянного и переменного тока дан авторами в [1].

Коэффициенты искажения для управляемых выпрямителей при допущении о прямоугольной форме потребляемого из сети тока (при идеальном сглаживании выпрямленного тока) равны: $K_{\text{и}}=0,9$ – для однофазной мостовой схемы, $K_{\text{и}}=0,955$ – для трехфазной мостовой схемы.

В зарубежной литературе вместо коэффициента искажения $K_{\text{и}}$ принято использовать понятие **THD%** – **Total Harmonic Distortion** – Суммарное Гармоническое Искажение, которое определяется выражением:

$$\text{THD}\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} I_{(k)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100 ,$$

где $I(k)$ и $I(1)$ – амплитудные или действующие значения k -й и 1-й гармоник тока.

Связь между $K_{И}$ и THD определяется соотношениями:

$$K_{И} = \frac{I(1)}{I} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}}, \quad \text{THD} = \frac{\sqrt{1 - K_{И}^2}}{K_{И}}. \quad (1)$$

Для трехфазной мостовой схемы при $K_{И}=0,955$ будем иметь $\text{THD}=31\% \sim 0,31$.

Найдем связь мощности искажения T с коэффициентом искажения $K_{И}$. Действующее значение всех высших гармоник тока равно:

$$\sqrt{\sum_{k=2} I(k)^2} = \sqrt{I^2 - I(1)^2} = I\sqrt{1 - k_{И}^2}.$$

Тогда мощность искажения

$$T = U \cdot I \sqrt{1 - k_{И}^2} = U \cdot I \frac{I(1)}{I} \sqrt{1 - k_{И}^2} = S_{(1)} \frac{1}{k_{И}} \sqrt{1 - k_{И}^2} = S_{(1)} \sqrt{\frac{1}{k_{И}^2} - 1},$$

где $S_{(1)} = (P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2)^{0,5}$, $Q_{(1)}$ – реактивная мощность первой гармоники.

Учитывая, что $\frac{1}{k_{И}^2} = 1 + \text{THD}^2$, получим

$$T = S_{(1)} * \text{THD}, \quad (2)$$

т.е. чем больше THD, тем больше мощность искажения T . При этом $K_{И}$ получается низким, так как в токе сети I_{Φ} слишком много высших гармоник.

Заметим, что мощность искажения T находится в квадратуре по отношению к $S_{(1)}$, поэтому полная мощность $S = (S_{(1)}^2 + T^2)^{0,5}$ возрастает из-за THD в меньшей степени.

Далее приведены результаты оценки гармонического состава, THD и $K_{И}$ с помощью пакета моделирования MicroCAP для двух классов полупроводниковых преобразователей, наиболее широко применяемых в настоящее время для регулируемых электроприводов постоянного тока (система «Управляемый выпрямитель–Д») и переменного тока (система «ПЧ–АД»).

Описание моделей для анализа гармонического состава сетевого тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты

1. Трехфазный управляемый выпрямитель при идеальном сглаживании выпрямленного тока

Такой режим имеет место при работе выпрямителя на большую индуктивность (при анализе обычно полагают, что индуктивность цепи выпрямленного тока $L_d \rightarrow \infty$). Сетевой ток при этом имеет форму разнополярных прямоугольников длительностью 120 град. эл. В пакете моделирования эта форма сетевого тока имитировалась программным способом и был проведен ее гармонический анализ.

Диаграммы моделирования представлена на рис. 1.

В соответствии с результатами моделирования при таком режиме работы трехфазного управляемого выпрямителя $\text{THD}=31\%$, мощность искажения T составляет 31% от полной мощности первой гармоники $S_{(1)}$, $K_{И}=0,955$ [2].

2. Трехфазный управляемый выпрямитель при реальных пульсациях выпрямленного тока

Такой режим имеет место при конечной величине индуктивности цепи выпрямленного тока и нагрузке электродвигателя постоянного тока, близкой к номинальной. Сетевой ток при этом имеет форму разнополярных пульсирующих прямоугольников длительностью 120 град. эл.

Схема модели показана на рис. 2.

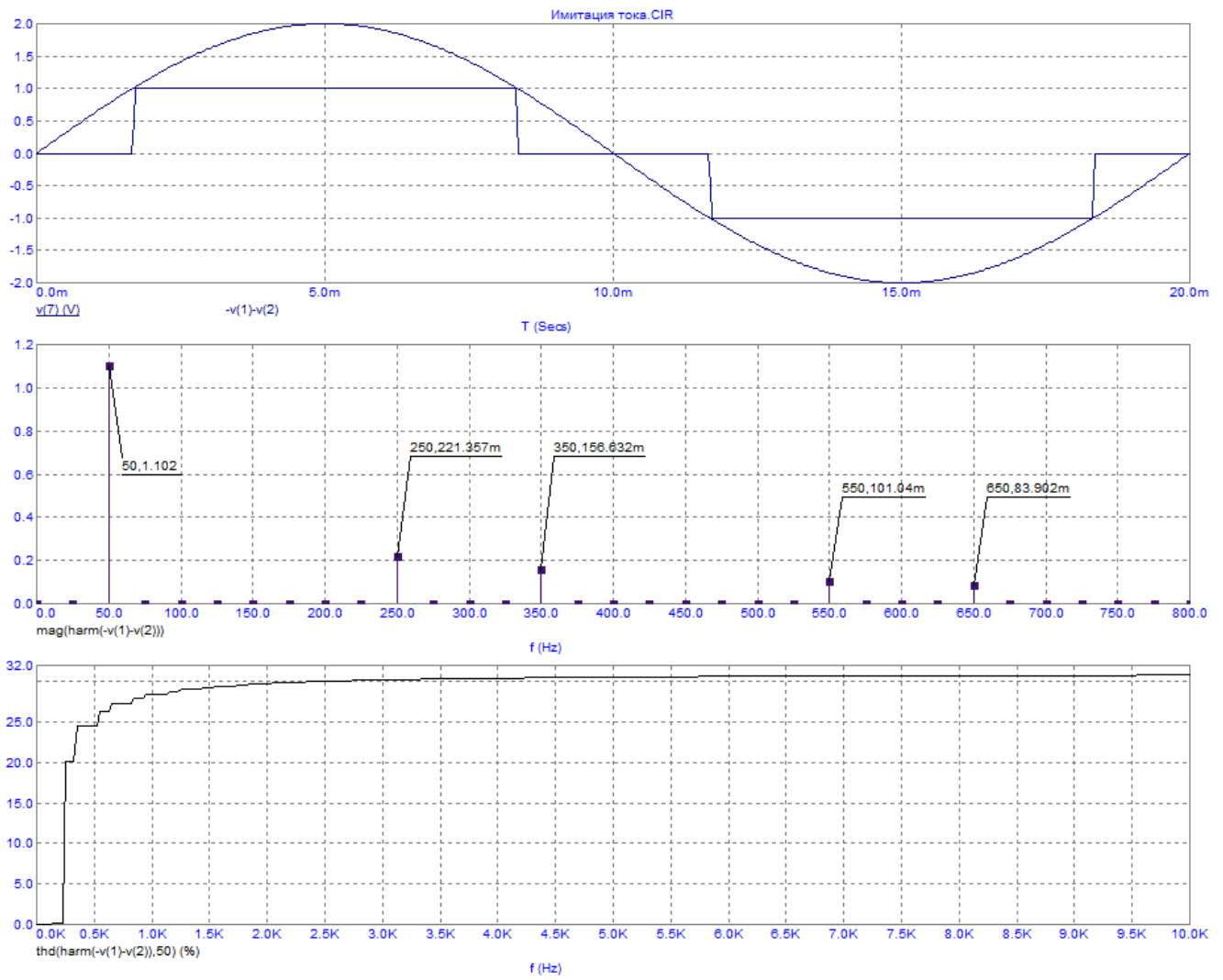


Рис. 1

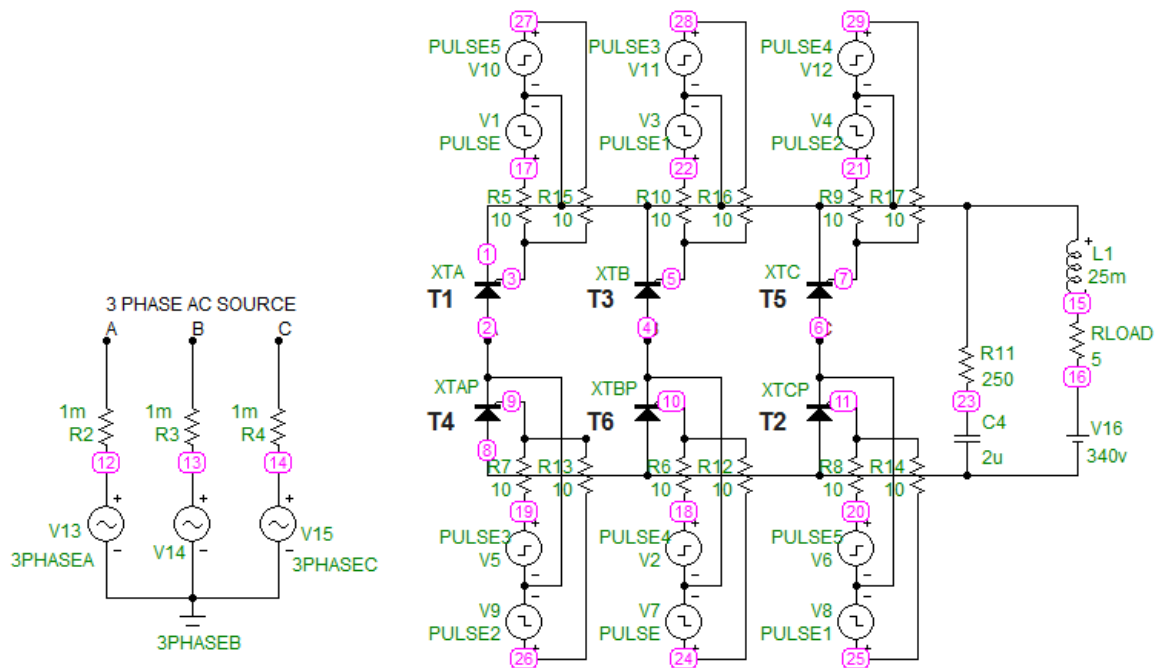


Рис. 2

Диаграммы моделирования с сигналами в обозначенных узлах схемы при угле управления $\alpha \approx 45^\circ$ эл. (рис. 3).

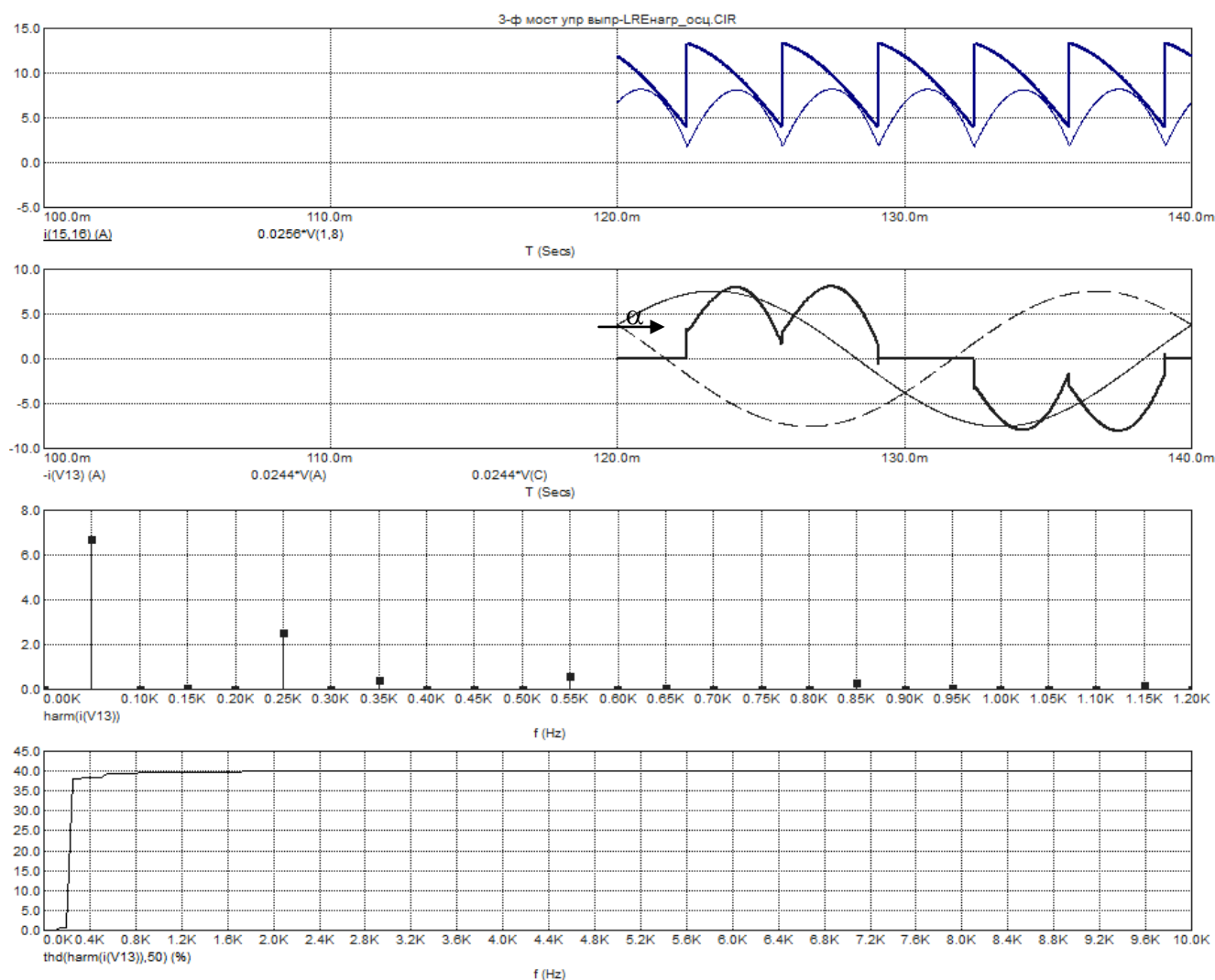


Рис. 3

В соответствии с результатами моделирования при таком режиме работы трехфазного управляемого выпрямителя THD=40%, мощность искажения T составляет 40% от полной мощности первой гармоники $S_{(1)}$, а $K_{И}=0,928$, что несколько ниже $K_{И}=0,955$ при идеальном сглаживании выпрямленного тока. Таким образом, повышенные пульсации выпрямленного тока негативно сказываются на значениях THD, T и $K_{И}$.

3. Трехфазный управляемый выпрямитель в режиме прерывистого тока

В настоящее время очень часто в комплекте электропривода сглаживающий дроссель отсутствует. При этом почти во всем диапазоне нагрузок на двигатель ток якоря является прерывистым и имеет большие пульсации. Далее на модели показывается, что режим прерывистого тока существенно ухудшает гармонический состав сетевого тока.

Схема модели аналогична пункту 2. Но для реализации режима прерывистого тока была уменьшена индуктивность в цепи выпрямленного тока ($L1$) и увеличено напряжение источника, имитирующего ЭДС в этой цепи (источник V16).

Диаграммы моделирования представлена на рис. 4.

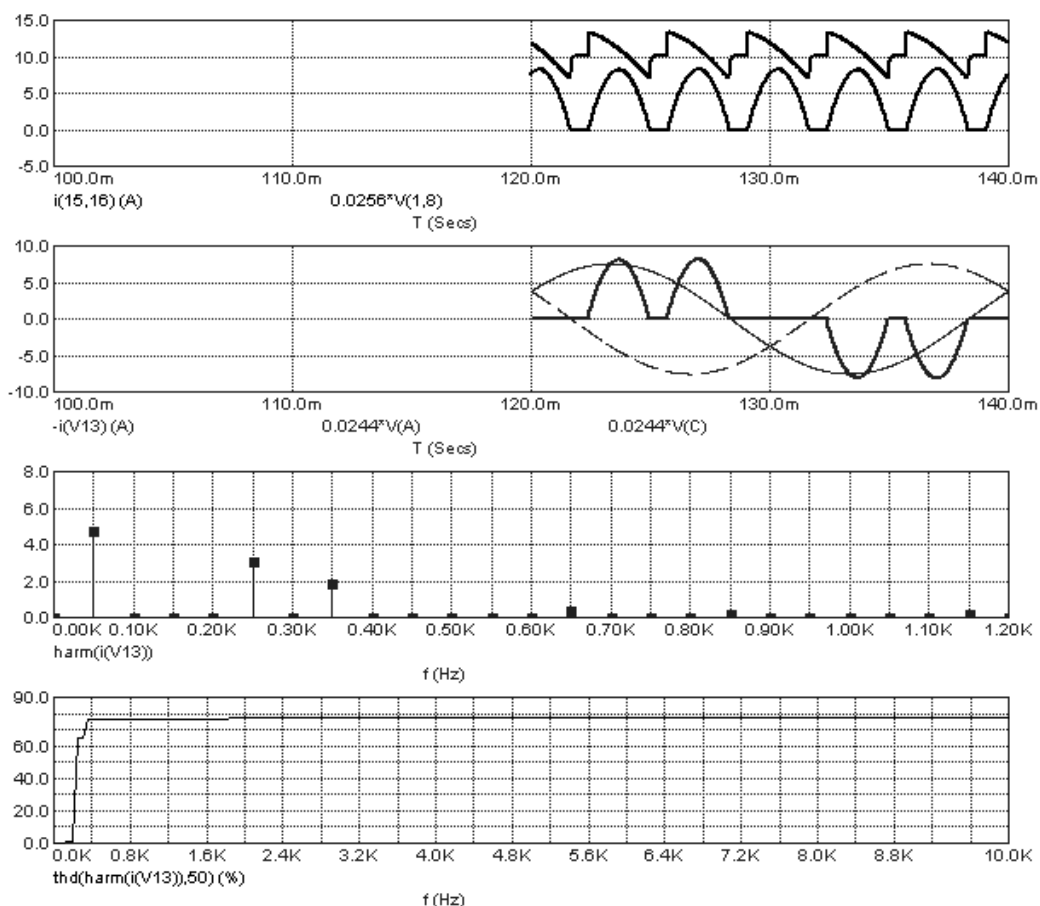


Рис. 4

В соответствии с результатами моделирования при таком режиме работы трехфазного управляемого выпрямителя $\text{THD}=77\%$, мощность искажения T составляет 77% от полной мощности первой гармоники $S_{(1)}$, а $K_{\text{И}}=0,792$, что ниже величины $K_{\text{И}}$ при реальных пульсациях выпрямленного тока. Кроме того, при повышенных пульсациях выпрямленного тока в сильной степени возрастает нагрев якоря двигателя и ухудшается коммутация коллекторно-щеточного аппарата. Все это снижает использование электродвигателя по мощности. Это свидетельствует о целесообразности применения дополнительного сглаживающего дросселя.

4. ПЧ с однофазным выпрямителем на входе (маломощные ПЧ)

Схема модели представлена на рис. 5.

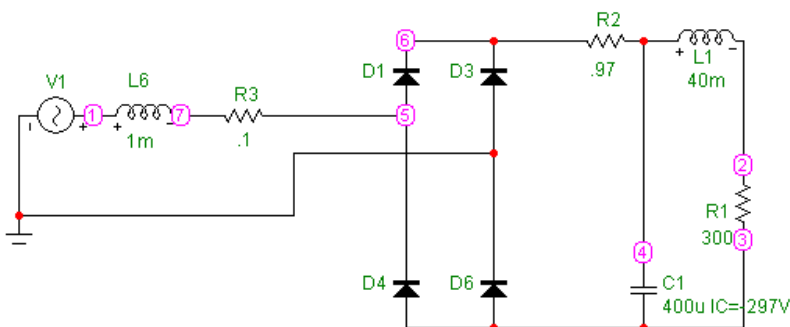


Рис. 5

Диаграммы моделирования показана на рис. 6.

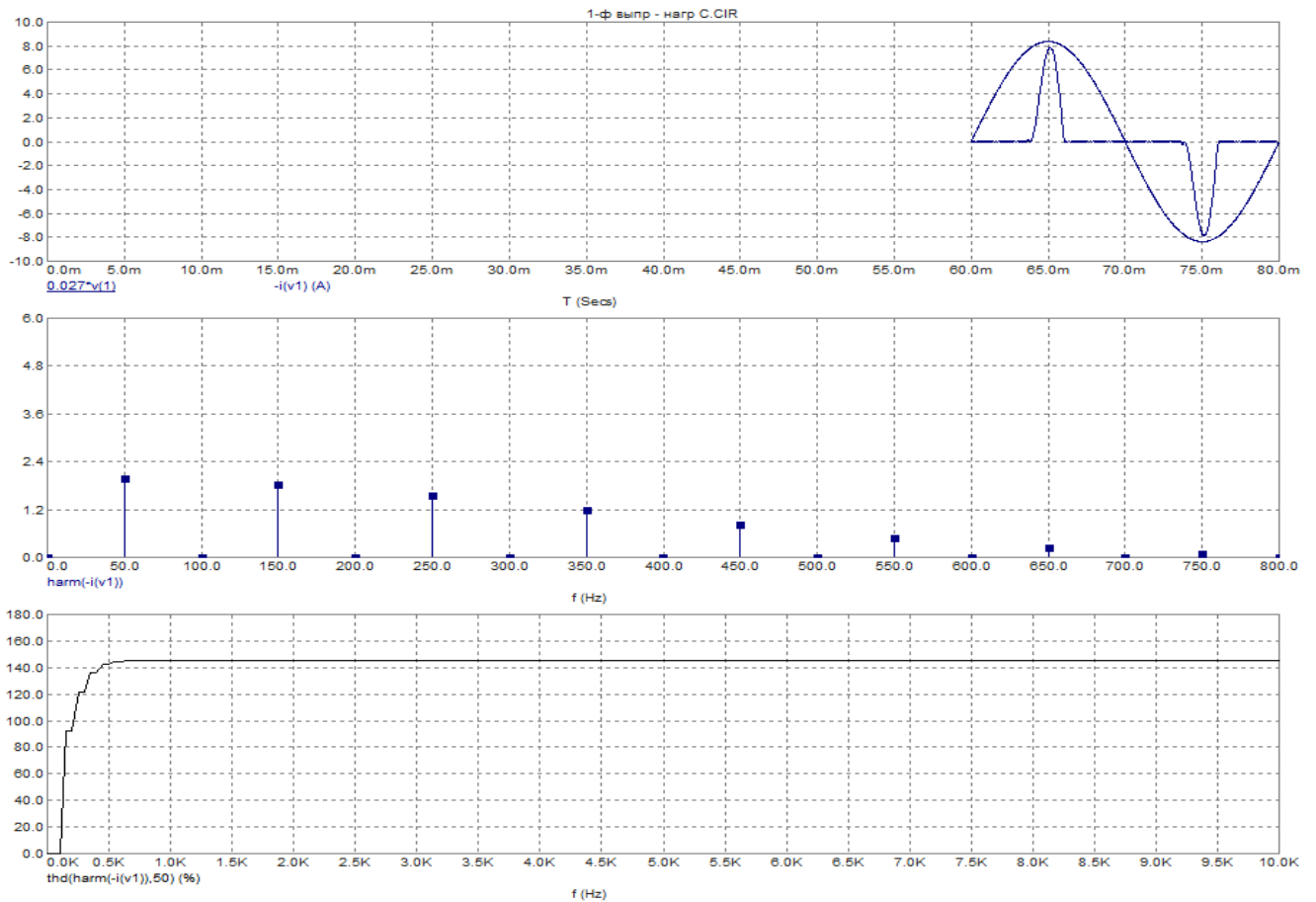


Рис. 6

Из диаграмм видно, что сетевой ток имеет форму узких импульсов, сильно отличается от синусоиды и содержит все нечетные гармоники, причем все ближайшие после первой гармоники имеют значительную величину. Однофазный выпрямитель, нагруженный на C , $TND=145\%$, поэтому мощность искажения T превышает даже полную мощность первой гармоники $S_{(1)}$ в 1,45 раз. При этом коэффициент искажения $K_{И}=0,567$, что является очень низкой величиной.

5. ПЧ с однофазным выпрямителем на входе при применении резонансного LC-фильтра

Схема модели показана на рис. 7.

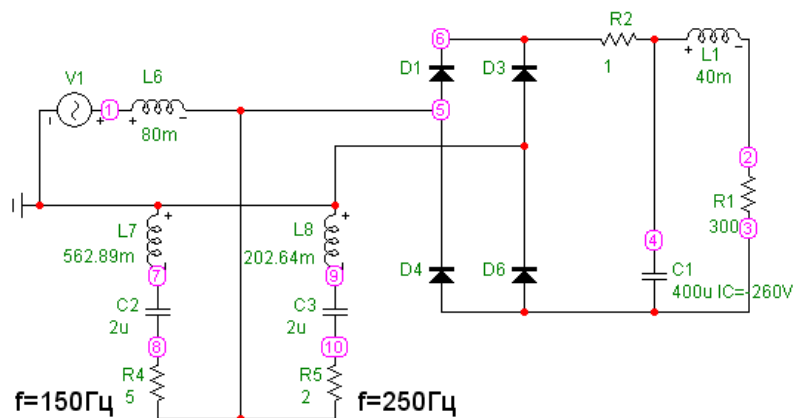


Рис. 7

Диаграммы моделирования показана на рис. 8.

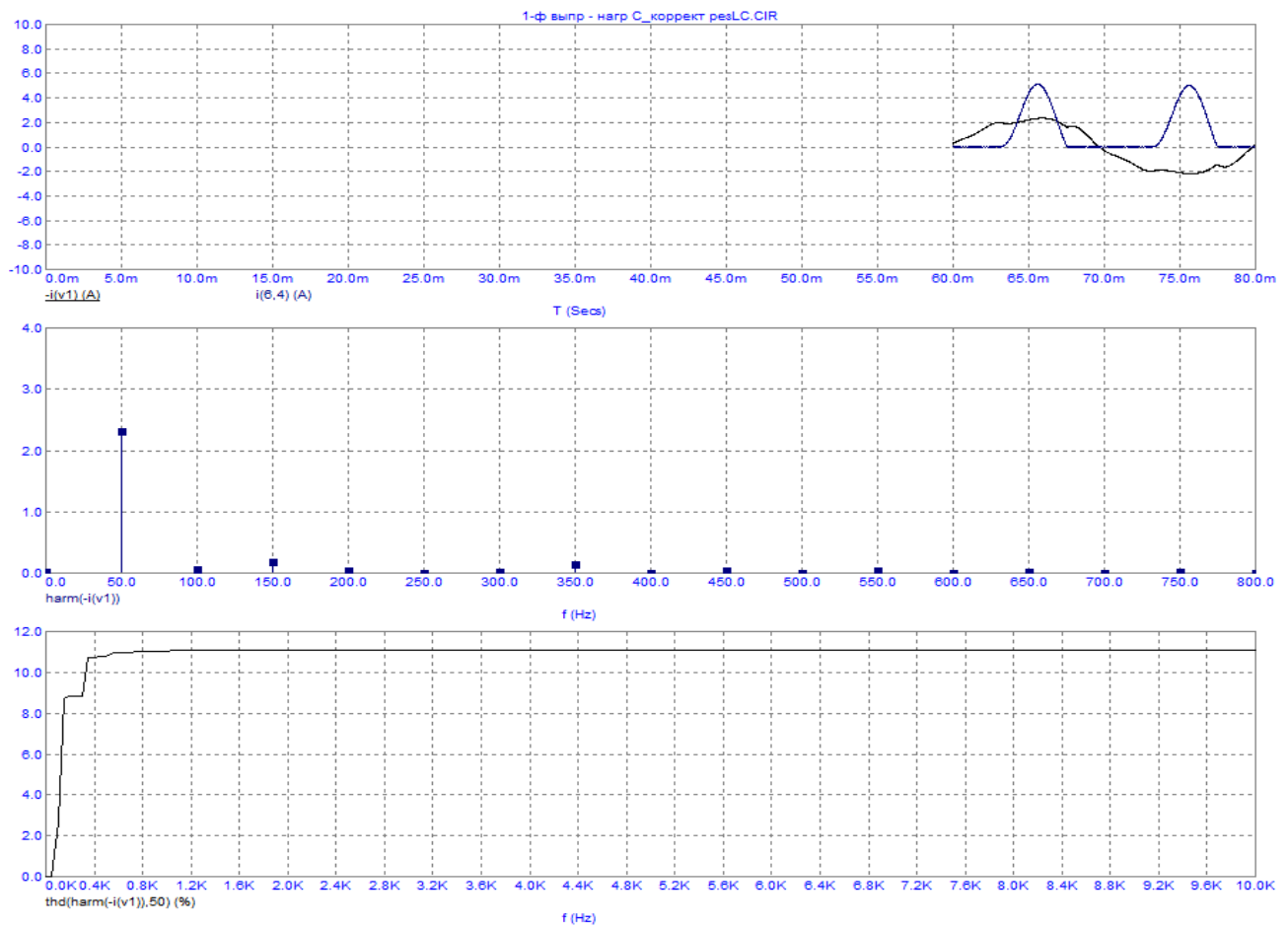


Рис. 8

Из диаграмм видно, что применение резонансного LC-фильтра на входе выпрямителя позволяет в значительной степени приблизить сетевой ток к синусоидальной форме, высшие гармоники при этом сильно подавляются. Значение $\text{THD}=11\%$, мощность искажения T составляет всего 11% от полной мощности первой гармоники $S_{(1)}$. При этом $K_{\text{и}}=0,994$.

6. ПЧ с трехфазным выпрямителем на входе

Схема модели показана на рис. 9.

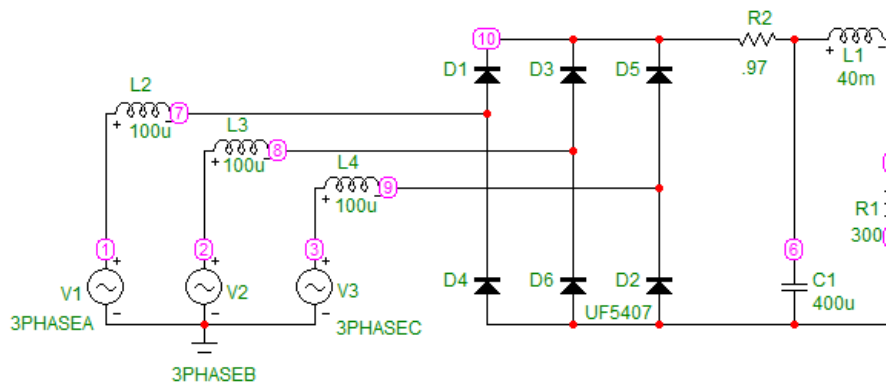


Рис. 9

Диаграммы моделирования представлена на рис. 10.

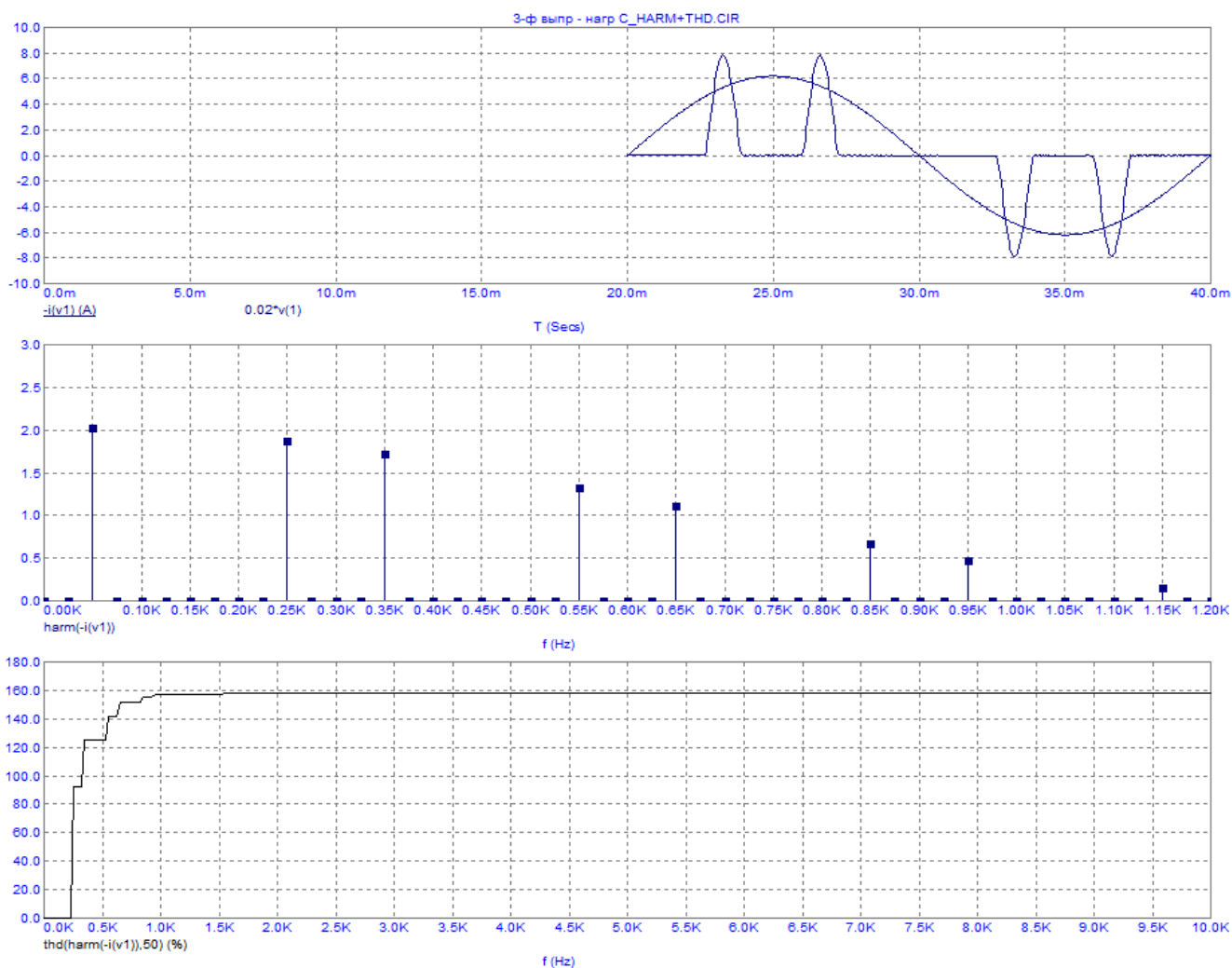


Рис. 10

Из диаграмм видно, что сетевой ток имеет форму сдвоенных узких импульсов и сильно отличается от синусоиды. Он содержит нечетные гармоники 1, 5, 7, 11 и т.д., и не содержит четных гармоник и кратных трем. Ближайшие к первой высшие гармоники имеют значительную величину. Значение THD=158%, что больше, чем даже у однофазного выпрямителя (см. пункт 4). При этом мощность искажения T превышает даже полную мощность первой гармоники $S_{(1)}$ в 1,58 раз, а коэффициент искажения $K_{И} = 0,535$, что ниже, чем у однофазного ПЧ.

Таким образом, гармонический состав сетевого тока 3-фазного ПЧ, хуже, чем у ПЧ с однофазным выпрямителем на входе.

7. ПЧ с трехфазным выпрямителем на входе при применении резонансного LC-фильтра

Схема модели показана на рис. 11.

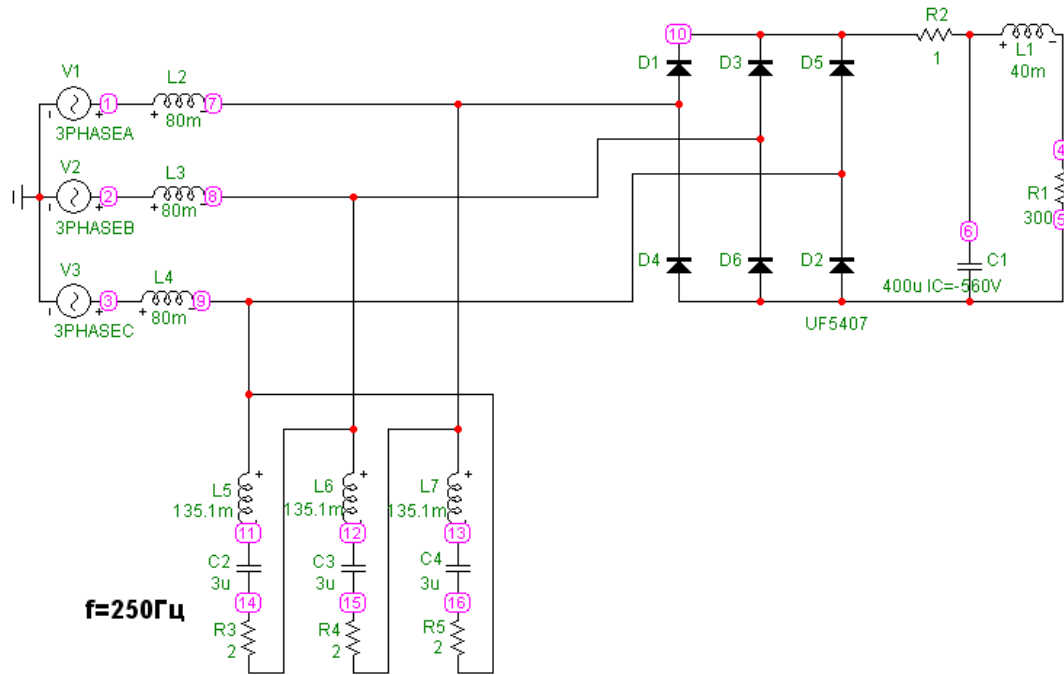


Рис. 11

Диаграммы моделирования представлена на рис. 12.

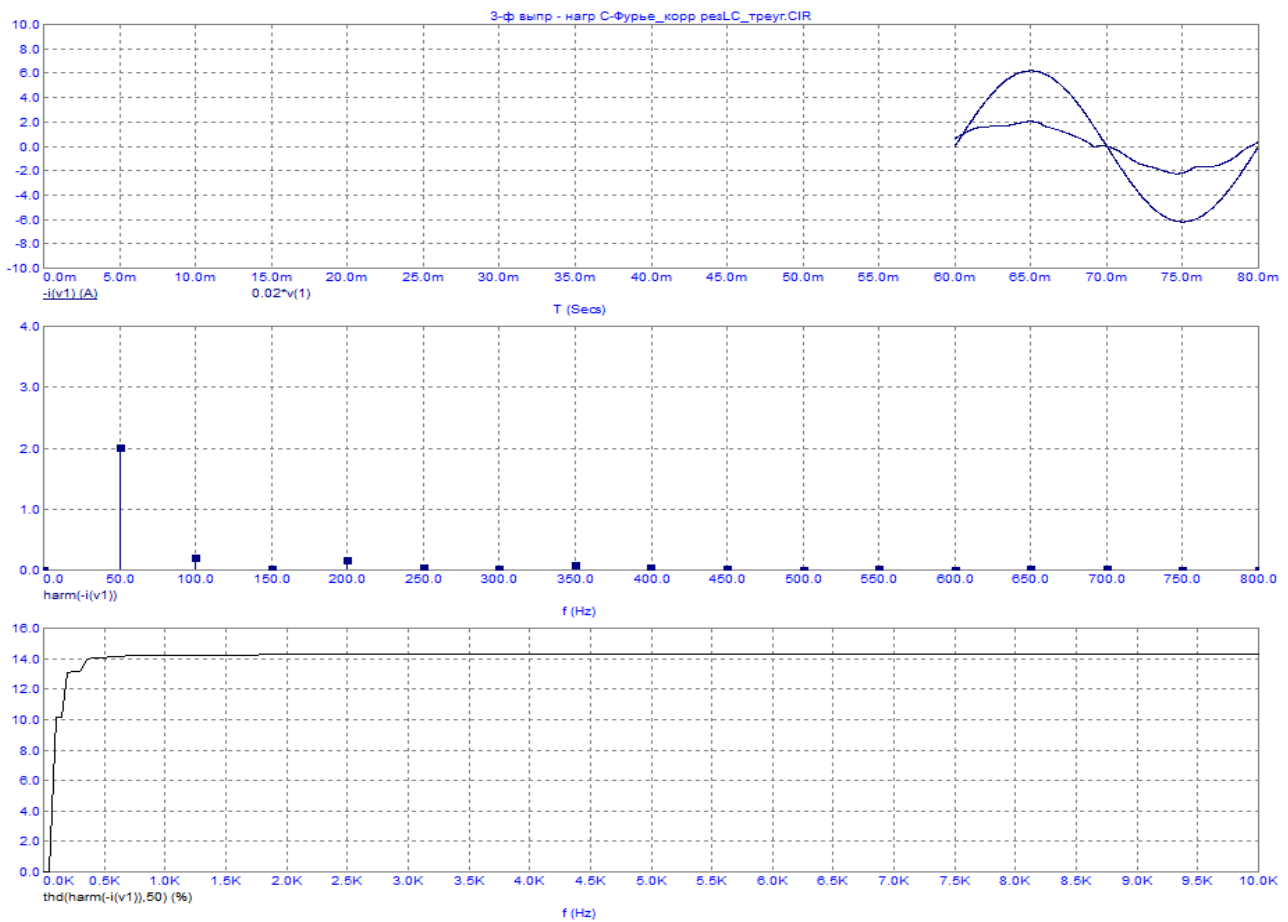


Рис. 12

Из диаграмм видно, что применение резонансного LC-фильтра на входе 3-фазного

выпрямителя ПЧ позволяет в значительной степени приблизить сетевой ток к синусоидальной форме. При этом $\text{THD}=14\%$, мощность искажения T составляет всего 14% от полной мощности первой гармоники $S_{(1)}$, а $K_{\text{и}}=0,99$.

Все полученные результаты сведены в табл. 1 в формате Excel, в которой коэффициенты THD брались из результатов моделирования в MicroCap, а коэффициент искажения $K_{\text{и}}$ вычислялся автоматически по формуле (1).

Таблица 1

Расчет коэффициента искажения $K_{\text{и}}$ по THD		
	THD	$K_{\text{и}}$
1) имит тока	0,30853	0,955553735
2) 3ф-упр+L	0,40123	0,928082534
3) 3ф-упр прер ток	0,76947	0,792532353
4) 1ф-C	1,45321	0,566882193
5) 1ф-C+LC	0,11085	0,993912186
6) 3ф-C	1,57882	0,535082887
7) 3ф-C+LC	0,14273	0,989967107

В этой таблице, чем меньше значение THD и больше значение $K_{\text{и}}$, тем лучше спектральный состав сетевого тока.

Результаты с положительной оценкой отмечены жирным шрифтом, с негативной оценкой – подчеркнутый курсив, приемлемые – обычный шрифт.

Наилучшие результаты с точки зрения значения THD , уровня мощности искажения T и значения $K_{\text{и}}$ имеют варианты 5) и 7). Эти варианты относятся к ПЧ, у которых $\cos\varphi = 1$, потребляется из сети наименьшая мощность искажения T , а хорошие результаты получены за счет применения резонансных LC-фильтров для фильтрации высших гармоник.

Без резонансных фильтров результаты у ПЧ получаются наихудшими (варианты 4) и 6)) среди всех проанализированных вариантов.

При известном токе нагрузки преобразователя значение $K_{\text{и}}$ определяет действующее значение полного тока сети $I_{\text{ф}}=I_{\text{ф}(1)}/K_{\text{и}}$. Поэтому, чем ниже $K_{\text{и}}$, тем больше $I_{\text{ф}}$, что приводит к необходимости повышения сечения первичных кабелей. Например, у ПЧ с трехфазным выпрямителем на входе, как видно из рис. 10, пики тока превышают амплитуду 1-й гармоники в четыре раза, а $I_{\text{ф}}$ превышает $I_{\text{ф}(1)}$ в $1/K_{\text{и}}=1,87$ раз. При этом $I_{\text{ф}(1)}$ определяется током нагрузки АД.

Отсутствие сглаживающего дросселя в цепи выпрямленного тока управляемых выпрямителей приводит к появлению достаточно широкой зоны прерывистых токов и существенному ухудшению показателей (вариант 3)). Кроме того, не следует забывать, что управляемые выпрямители потребляют значительную реактивную мощность из сети и имеют низкий $\cos\varphi$ при глубоком регулировании скорости электродвигателя за счет снижения выпрямленного напряжения на его якоре [1].

Выводы

В работе дан количественный сравнительный анализ гармонического состава сетевого тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты, применяемых в современном регулируемом электроприводе постоянного и переменного тока. Для анализа использовалось осциллографирование на реальном объекте (бумагоделательная машина, расположена в Нижегородской области) и моделирование с помощью компьютерной программы MicroCap.

На основе результатов анализа можно сформулировать следующие выводы:

1. Компенсации реактивной мощности и мощности искажения должно уделяться пристальное внимание на электропотребляющих предприятиях, иначе возможно появление дополнительных затрат, ухудшение качества и устойчивости электроснабжения, снижение надежности работы и срока службы электрооборудования.

2. При применении регулируемого электропривода с двигателем постоянного тока необходимо обращать особое внимание на конфигурацию якорной цепи двигателя, обосновывать отказ от установки сглаживающего реактора. В режиме прерывистого тока, который возникает при недогрузке электродвигателя или при отсутствии сглаживающего дросселя и малой индуктивности якорной цепи, гармонический состав сетевого тока может оказаться очень неблагоприятным (сравнимым с гармоническим составом ПЧ без LC-фильтра на входе). В этом случае потребуются дополнительный сглаживающий дроссель или фильтро-компенсирующее устройство. Последний вариант может решить проблему и с низким коэффициентом мощности при глубоком регулировании скорости двигателя постоянного тока.

3. При применении регулируемого электропривода переменного тока на основе ПЧ с асинхронным короткозамкнутым двигателем не требуется компенсации реактивной мощности, но особое внимание необходимо обращать на гармонический состав сетевого тока и при необходимости принимать меры по компенсации высших гармоник с помощью пассивных или активных фильтров высших гармоник.

4. Увеличение общего действующего значения сетевого тока при наличии высших гармоник приводит к увеличению потерь и перегреву всего оборудования питающей сети. Необходимо внимательно подходить к выбору сечения питающих кабелей при высоком уровне гармоник в потребляемом токе.

5. Высшие гармоники тока влияют на форму напряжения в системе электроснабжения, вызывая его несинусоидальность, которая отрицательно воздействует на изоляцию кабельных линий и может нарушить нормальную работу конденсаторных батарей для компенсации реактивной мощности и устройств автоматики. Оценка уровня гармоник напряжения может быть выполнена, например, с помощью анализатора качества электроэнергии РМ172ЕН [3].

Библиографический список

1. **Тихомиров, В.А.** Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока / В.А. Тихомиров, В.Г. Титов, С.В. Хватов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. 2010. №4 (83). С. 190–204.
2. **Руденко, В.С.** Преобразовательная техника / В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко. – Киев: Вища школа, 1983. – 431 с.
3. Анализатор качества электроэнергии РМ172ЕН. http://www.epsa-spb.ru/shop/?mode=product&product_id=109851201

*Дата поступления
в редакцию 19.07.2011*

V.A. Tikhomirov, S.V. Hvatov

BENCHMARK ANALYSIS OF THE HARMONIC COMPOSITION OF THE NETWORK CURRENT OF THE CONTROLLED RECTIFIERS AND FREQUENCY CONVERTERS

For two the most wide-spread types of the modern controlled drive constant and alternating current explored negative consequences from circulation in supplying network of the high harmonicas. Recommendations are given on compensation of the power of the distortion. The Material is considered on example of the perennial usage semiconductor drives of the machine on production of the paper on one of the enterprise Balahny.

Key words: drive of the direct current, drive alternating current, $\cos\varphi$, high harmonicas, power of the distortion, compensation of the power of the distortion.