

ЭЛЕКТРОНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.384.66

СИСТЕМА ПИТАНИЯ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ ТИПА ИЛУ

© 2023 г. В. В. Безуглов^а, А. А. Брызгин^а, А. Ю. Власов^а, Л. А. Воронин^а, Е. В. Дрогунов^а,
М. В. Коробейников^а, С. А. Максимов^а, **В. Е. Нехаев^а**, А. В. Пак^а, В. М. Радченко^а,
А. В. Сидоров^а, В. О. Ткаченко^а, Е. А. Штарклев^{а,*}

^аИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

*e-mail: shtarklev@gmail.com

Поступила в редакцию 07.07.2022 г.

После доработки 17.07.2022 г.

Принята к публикации 02.09.2022 г.

Описаны устройство и принцип работы импульсного модулятора, являющегося системой питания ускорителей серии ИЛУ, а также некоторые особенности, возникающие при его эксплуатации. Модулятор представляет собой устройство, являющееся нелинейной нагрузкой для питающей сети, вследствие чего во всех фазах сети питания возникает несимметричность формы тока за период сети. Это приводит к появлению постоянной составляющей тока в фазах питающего трансформатора. Для решения данной проблемы было предложено токовое симметрирование времени запуска модуляторов. С помощью данного метода также удается выравнивать величины эффективных токов по фазам. Другой проблемой является возможность появления в фазах сети питания высших по отношению к питающей частоте гармоник. Для снижения величин высших гармоник предлагается устанавливать в каждой фазе сети питания до модулятора дополнительные индуктивности, что позволяет снизить коэффициент гармоник в два раза.

DOI: 10.31857/S0032816223010044, EDN: JRNBCW

1. ВВЕДЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН была разработана серия импульсных высокочастотных (ВЧ) ускорителей электронов типа ИЛУ на энергию 1–10 МэВ, которые используются как в режиме облучения электронами, так и в режиме тормозного излучения. Для питания этих мощных импульсных ускорительных устройств, состоящих из одного или нескольких резонаторов, использованы генераторы на основе мощных высокоэффективных электровакуумных приборов — триодов ГИ-50А. Анодное питание генераторов формируется модуляторами, основу устройства которых составляют формирующие линии с сосредоточенными параметрами и коммутирующие элементы из силовых тиристоров. Каждый модулятор содержит: низковольтный трехфазный выпрямитель, собранный по мостовой схеме (схема Ларионова), накопительный дроссель, формирующую линию, импульсный трансформатор, согласующий параметры модулятора и генератора; коммутационными элементами являются тиристоры [1]. Все ускорители серии ИЛУ работают с одним модулятором, лишь ускоритель ИЛУ-14 с энергией ускоренных электронов до 10 МэВ и мощностью тока

пучка до 100 кВт при частоте повторения импульсов тока пучка до 50 Гц питается от трех модуляторов [2]. Импульс формируется за счет предварительно заряженной до заданного напряжения емкостной составляющей линии. Модулятор выдает высоковольтный импульс напряжения на анод ВЧ-генератора амплитудой до 32 кВ и длительностью около 500 мкс. Формирующая линия заряжается от сети питания без трансформации до напряжения 8 кВ. Основные технические характеристики модулятора представлены ниже:

Амплитуда выходного импульса	30 кВ
Пределы регулирования	0–100%
Длительность импульса	500 мкс
Частота повторения импульсов	1–50 Гц
Питание: трехфазная сеть переменного тока	220 В
Рабочая частота сети питания	50–60 Гц
Суммарная потребляемая мощность	150 кВт

2. УСТРОЙСТВО ИМПУЛЬСНОГО МОДУЛЯТОРА

Рассмотрим работу одного модулятора, предназначенного для импульсного питания про-

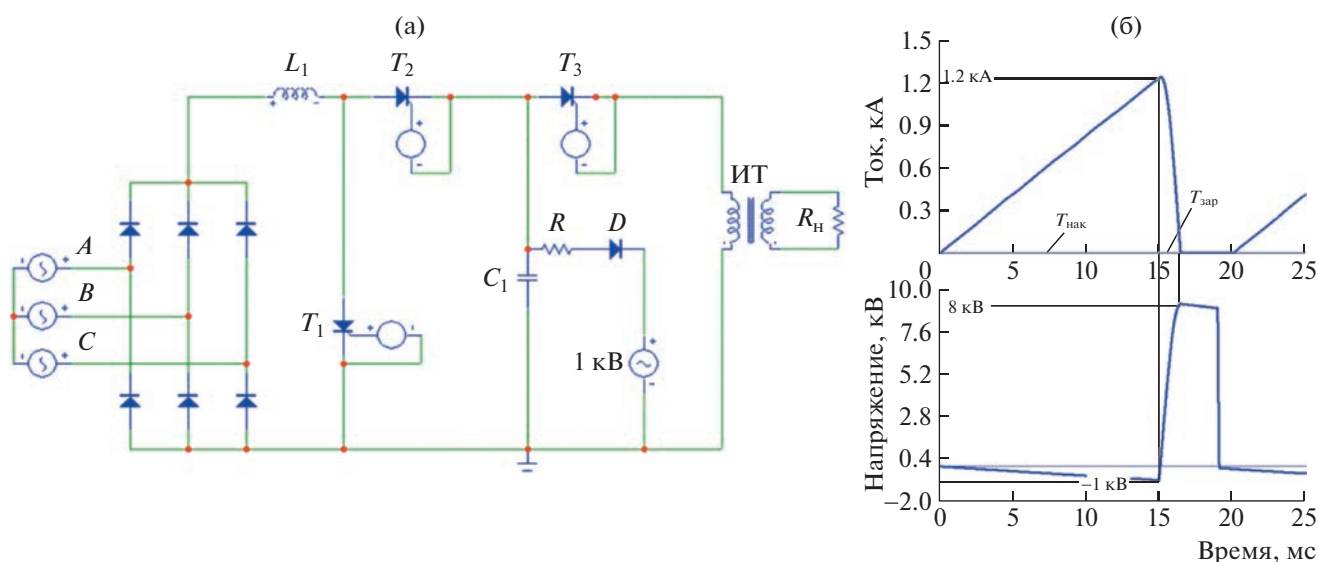


Рис. 1. а — схема импульсного накопления тока в индуктивности и зарядки емкости формирующей линии (T_1 – T_3 — синхронизируемые сборки коммутаторов; ИТ — импульсный трансформатор); б — временные диаграммы, поясняющие работу модулятора.

мышленных ускорителей электронов типа ИЛУ (с одним модулятором работают ускорители ИЛУ-7, ИЛУ-8, ИЛУ-10 и др.). Каждый модулятор содержит: управляемый трехфазный выпрямитель; линейный (с большим, равномерно распределенным по длине стального сердечника воздушным зазором) дроссель накопления L_1 ; емкость формирующей линии C_1 , равную 120 мкФ; синхронизируемые сборки коммутаторов T_1 – T_3 , набранные из тиристоров типа ТБ333-500-14. Принципиальная схема модулятора приведена на рис. 1а, на рис. 1б показаны временные диаграммы, поясняющие работу модулятора.

Рассмотрим выбор основных параметров и элементов модулятора. Время накопления для рабочего режима ускорителя электронов $T_{\text{нак}}$ равно 16 мс. При этом величина среднего тока накопления согласуется с величиной среднего тока тиристора T_1 (500 А). Величину индуктивности L_1 получаем из энергетического соотношения: $W_E = \frac{L_1 I^2}{2}$. При $W_E = 4000$ Дж, $I = 1200$ А получаем $L_1 = 6$ мГн. Время перезаряда $T_{\text{зар}}$ получаем из формулы Томсона: $T = 2\pi\sqrt{L_1 C_1}$, откуда $T_{\text{зар}} = T/4 = 1.33$ мс.

Схематичный чертеж дросселя накопления приведен на рис. 2. Два металлических керна, каждый по 4 секции, набраны пластинами из электротехнической стали толщиной 0.35 мм и сечением 16×16 см², высота кернов составляет 50 см. Сверху и снизу керны связаны стальными плитами длиной 50 см. Общая длина воздушного зазора, разделяющего секции кернов и плиты, состав-

ляет 28 см: 3 зазора по 2 см между секциями, а также верхний и нижний зазоры по 4 см.

Равномерное распределение воздушных зазоров по периметру магнитопровода обеспечивает отсутствие большого рассеяния магнитного потока в зазорах, а также минимизацию возможных вихревых потерь от наведенных токов в металлических элементах конструкции дросселя. Картина распределения магнитного поля дросселя показана на рис. 2. Катушки дросселя накопления w_1 и w_2 , расположенные на кернах, намотаны медной полый шиной марки OF-OK сечением 12.5×12.5 мм² с круглым отверстием диаметром 7 мм, каждая катушка состоит из трех секций по 30 витков.

Расчетный эффективный ток для времени накопления 16 мс и частоты повторения импульсов 50 Гц равен 670 А. Величина магнитной индукции в железе дросселя составляет порядка 1 Тл. Общие активные потери в шести обмотках достигают 8 кВт. Эффективные токи в фазах сети питания до выпрямителя достигают 570 А и накладывают ограничение на длину кабелей, соединяющих модулятор с питающим трансформатором. Так, используя для соединения трехфазный медный кабель длиной 100 м (сечение 150 мм², сопротивление 0.1 Ом/км), можно потерять около 10 кВт.

3. РАБОЧИЙ ЦИКЛ МОДУЛЯТОРА

При запуске тиристорной сборки T_1 в индуктивности L_1 начинает линейно нарастать ток и накапливаться энергия (время накопления $T_{\text{нак}}$ на рис. 1). Для случая включения индуктора без

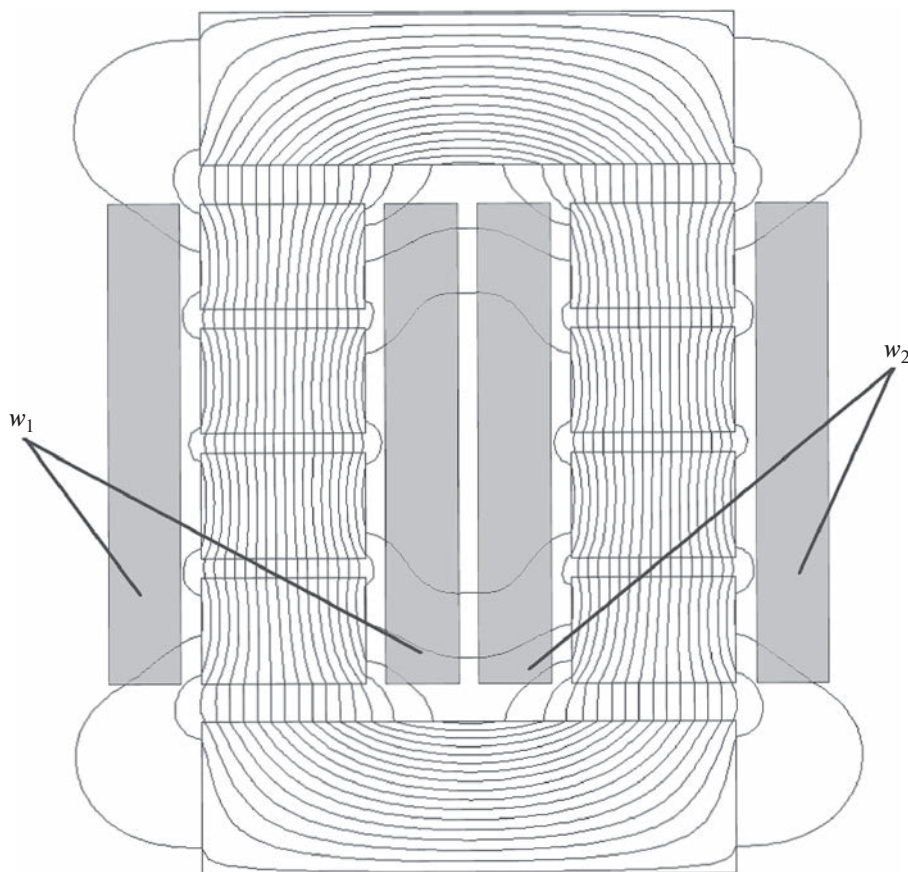


Рис. 2. Расчетная картина распределения магнитного потока по магнитопроводу дросселя накопления модулятора.

активных потерь на постоянную ЭДС ток в индукторе линейно нарастает от времени: $i(t) = \frac{E}{L_1} t$.

Расчет дает величину $T_{\text{нак}} = 14$ мс для запасаемой энергии до 4.3 кДж и тока до 1.2 кА. Величина выходного напряжения выпрямителя равна амплитудному значению линейного напряжения сети — 537 В. Экспериментально эти рабочие параметры (с учетом активных потерь) достигаются при времени накопления около 15 мс. При запуске ключа T_2 тиристор ключа T_1 восстанавливает изолирующее состояние (ключ T_1 размыкается), при этом процесс накопления прекращается, и вся энергия, запасенная в индуктивности L_1 , резонансно перебрасывается в емкость формирующей линии C_1 (время заряда $T_{\text{зар}} = 1.33$ мс на рис. 1).

Остановка нарастающего тока в дросселе или принудительное выключение T_1 достигается возможностью схемы подключать к аноду проводящего тиристора T_1 предварительно заряженный конденсатор — емкость C_1 формирующей линии. Отрицательная полярность до напряжения -1 кВ на рабочей емкости предварительно формируется дополнительным источником через элементы R и

D на рис. 1. Тиристорный ключ T_2 подключает C_1 (практически ЭДС) к проводящему тиристор T_1 . Время действия обратного напряжения определяется временем перезаряда этой емкости и накопительного дросселя от -1 до $+8$ кВ. Время перезаряда от -1 кВ до 0, когда к T_1 приложено отрицательное напряжение, под действием которого восстанавливается запирающая способность тиристора, равно не менее 100 мкс (время выключения тиристора ТБ333-500 по паспорту меньше 50 мкс). Таким способом осуществляется зарядка емкости с плавной регулировкой величины напряжения временем накопления заряда $T_{\text{нак}}$.

После окончания процесса заряда емкости тиристорный ключ T_2 запирается, поскольку ток в дросселе становится равным нулю (ток через T_2 отсутствует), срабатывает управляемый тиристорный ключ T_3 , и формирующая линия подключается к нагрузке R_n . При этом время накопления энергии в дросселе и перекачки ее в емкость, а также время формирования рабочего импульса (до 1 мс) определяют частоту повторения импульсов до 50 Гц ($T_{\text{раб}} = 20$ мс на рис. 1), с которой работает устройство, и величины токов и напряжений для выбора элементов приведенной

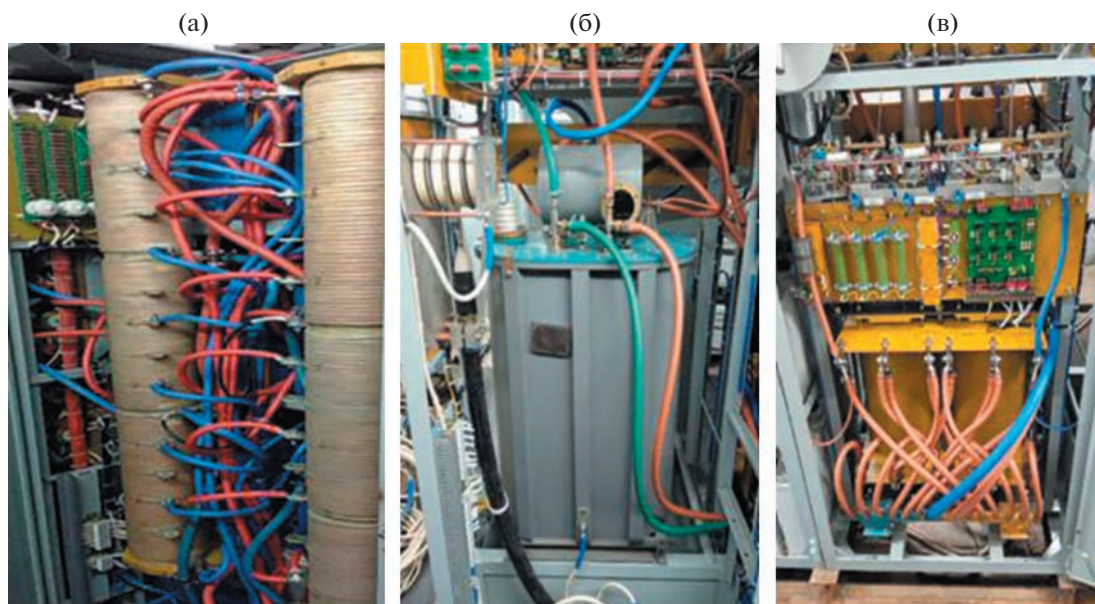


Рис. 3. Шкаф: а – с формирующей линией C_1 ; б – с импульсным трансформатором; в – с накопительным дросселем L_1 .

схемы. Конструктивно все элементы модулятора размещены в стальных электротехнических шкафах (рис. 3).

4. РАСЧЕТЫ ТОКОВ В ФАЗАХ СЕТИ ПИТАНИЯ

Рассмотрим временные диаграммы всех токов (рис. 4) для различных схем включений модуляторов. При включении одного модулятора (см. рис. 4а) видна значительная несимметричность формы сигнала тока за период сети, о чем свидетельствует вид кривых роста среднего тока за один период в фазах. Это приводит к появлению постоянной составляющей тока в фазах питающего трансформатора при работе одного модулятора. Из-за этого в токе вторичных обмоток, питающих модулятор, в каждом из трех стержней магнитопровода трансформатора (входящего в схему установки или на подстанции) возникает односторонний поток подмагничивания трансформатора, который уменьшает допустимый диапазон изменения индукции в сердечнике. Трансформатор при этом может намагничиваться (магнитные сопротивления сердечника возрастают), и магнитные потоки замыкаются по воздуху и конструктивным элементам трансформатора. Это приводит к возникновению аварийных токов и перегреву трансформатора.

Для решения данной проблемы было предложено токовое симметрирование времени начала накопления в устройствах зарядки емкостных нагрузок [3]. При включении трех модуляторов для получения симметричной системы несинусоидальных токов модуляторы запускаются каждый

через 6.67 мс, а при включении двух модуляторов – через полпериода сети [4]. С помощью такого метода удастся выравнять величины эффективных токов по фазам. Симметрирование токов по фазам одного модулятора не достигается за период сети, и для обнуления среднего тока необходимо пропустить еще один период сети. Начинать следующий цикл накопления следует через 10 мс (частоты повторения импульсов при этом равны 33.3, 20, 14.3, 12.5 Гц и т.д.). Анализ формы средних токов по фазам (см. рис. 4а) показывает, что для одного модулятора полное размагничивание стержней трансформатора в питающих фазах происходит только на втором импульсе накопления, когда фазные токи сменяют полярность. С учетом постоянной составляющей в токе приходится удваивать мощность трансформатора. Эффективные токи по фазам также приходится симметрировать. Следует отметить удобство контроля намагниченности стержней трансформатора по кривым средних токов в фазах.

Средние токи за период сети для вариантов включения двух (рис. 4б) и трех (рис. 4в) модуляторов обнуляются за период, а следовательно, нет намагничивающих токов в питающей ускоритель сети. Для варианта на рис. 4в эффективные токи по фазам одинаковы.

5. ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ ЧАСТОТЫ СЕТИ ПИТАНИЯ

Модулятор представляет собой устройство, потребляющее несинусоидальный ток (т.е. является нелинейной нагрузкой). Рассмотрим спектры гармоник, создаваемых токами 6-пульсного

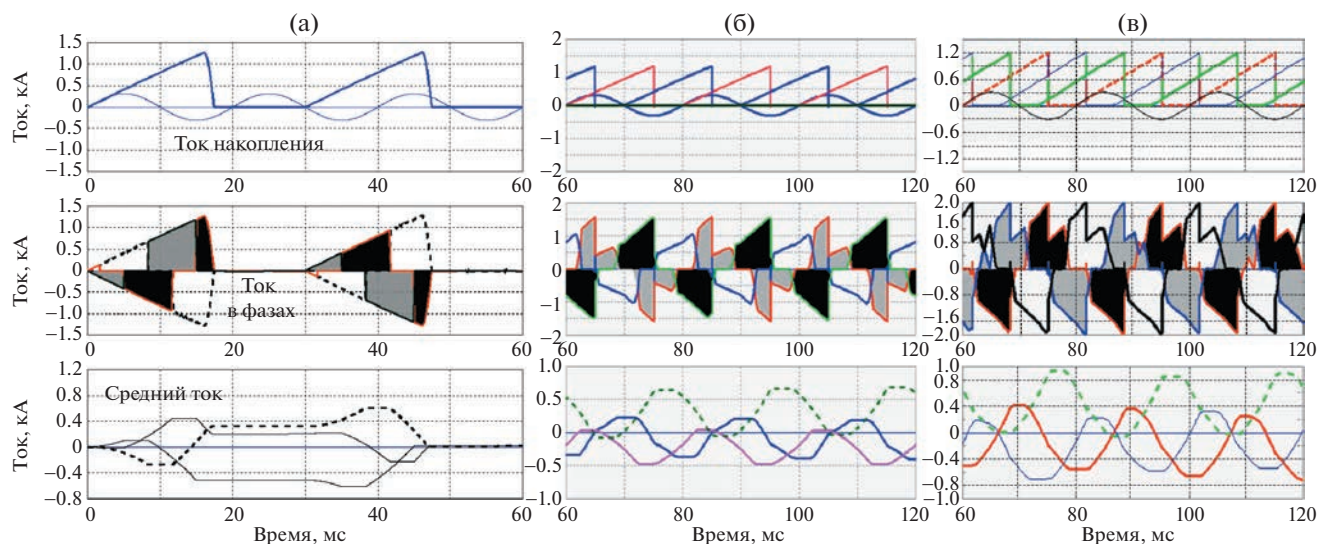


Рис. 4. Кривые токов накопления, суммарных токов по фазам (каждая фаза выделена своим цветом) и средние токи в каждой фазе сети питания для одного (а), двух (б) и трех (в) модуляторов. На верхних рисунках для понимания приведена синусоида напряжения питающей сети (50 Гц).

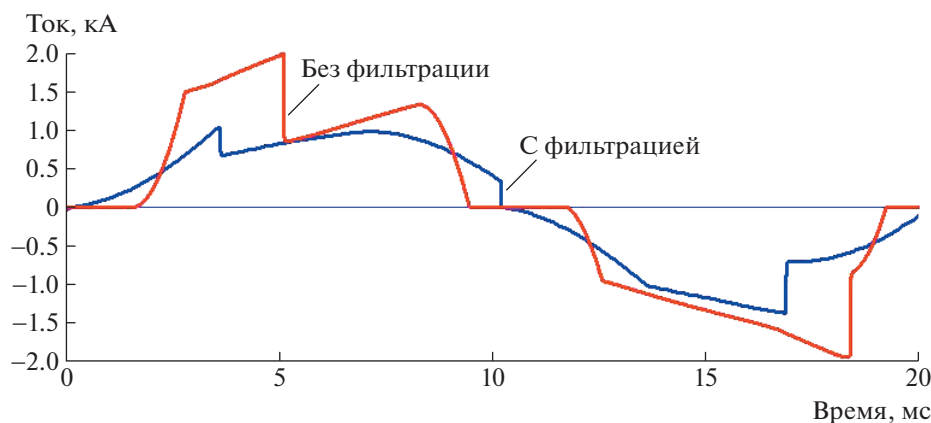


Рис. 5. Влияние фильтрующих дросселей на форму периода тока фазы А.

выпрямителя в трехфазных сетях, для случая трех модуляторов (рис. 4в). В схеме электропитания применен трехфазный мостовой выпрямитель, который формирует и распределяет по фазам импульсные токи. Основным генератором высших гармоник является не нагрузка, а выпрямитель (индуктивная нагрузка линейна). Для снижения высших гармоник предлагается устанавливать в каждой фазе до выпрямителя дополнительные индуктивности (фильтрующие дроссели) по 0.5 мГн. На рис. 5 приведены кривые токов одной фазы сети без индуктивностей и с фильтрующими дросселями.

С помощью разложения Фурье получаем представление функции периода тока тригонометрическим рядом суммы 15-ти гармоник. Соответствующие гистограммы приведены на рис. 6. Ко-

эффициент гармоник K_U в ГОСТ 13109-97 определяется как коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения и вычисляется по формуле:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{15} (U_k / \sqrt{2})^2}}{U_1} \times 100,$$

где U_k — действующее значение межфазного напряжения высших гармоник, кратных по частоте основной гармонике.

Предельно допустимое значение коэффициента гармоник K_U , согласно ГОСТ 13109-97, составляет 12%, расчет без дополнительных дросселей в фазах сети питания дает величину 21.2%, а

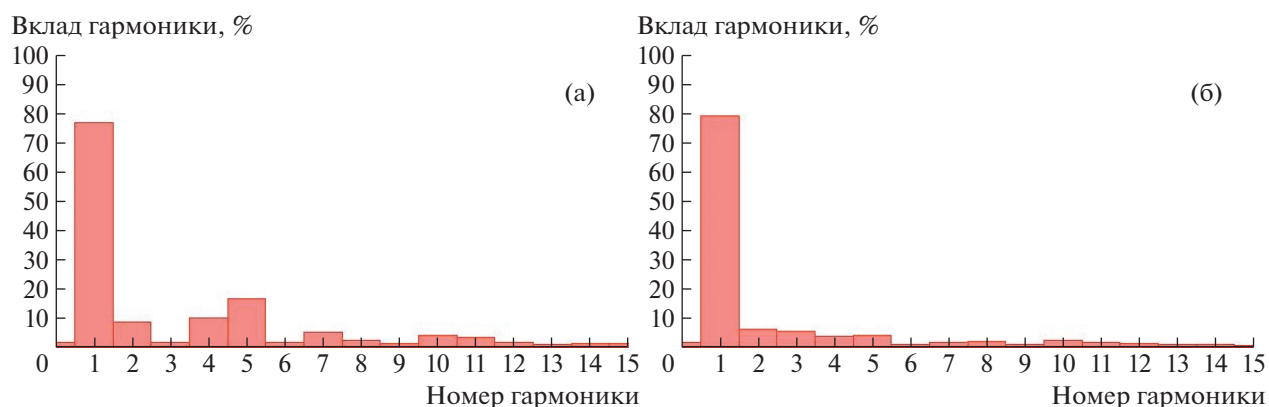


Рис. 6. Разложения тока фазы *A* по гармоникам: **а** — без дополнительных индуктивностей, **б** — с фильтрующими дросселями.

при расчете на гармоники тока с фильтрующими дросселями — 10%.

требуемых по ГОСТ 13109-97 значений, а запуск трех модуляторов через 6.67 мс позволяет выравнять эффективные токи по фазам.

6. ВЫВОДЫ

Мощности современных промышленных ускорителей выросли до сотен киловатт, и применяемые для их питания устройства, которые потребляют несинусоидальный ток, могут искажать всю питающую сеть. Для устранения нежелательных эффектов, связанных с эксплуатацией систем питания с линейной зарядкой индуктивного накопителя и емкостной нагрузкой, было предложено несколько методов усовершенствования их работы, позволяющих добиться симметрирования эффективных токов по фазам питающей сети, а также уменьшения гармонических искажений в электросети. В частности, установка линейных дросселей по 0.5 мГн в фазах сети позволяет уменьшить гармонические искажения до

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ауслендер В.Л., Лапик Р.М., Тараленко Н.Д., Тувик А.А. // ПТЭ. 1982. № 2. С. 103.
2. Ауслендер В.Л., Брызгин А.А., Горбунов В.А., Горнаков И.В., Кокин Е.Н., Кузнецов Г.И., Лукин А.Н., Макаров И.Г., Максимов С.А., Матяш Н.В., Острейко Г.Н., Панфилов А.Д., Сердобинцев Г.В., Сидоров А.В., Радченко В.М. и др. Препринт № 2. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 2010.
3. Безуглов В.В., Брызгин А.А., Власов А.Ю., Нехаев В.Е., Радченко В.М., Штарклев Е.А. Патент № RU 2755519 С1 // Оpubл. 16.09.2021. Бюл. № 26.
4. Безуглов В.В., Брызгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Кокин Е.Н., Коробейников М.В., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Штарклев Е.А. // ПТЭ. 2021. № 1. С. 93. <https://doi.org/10.31857/S0032816221010055>