

# Электромагнитные процессы

## в трехфазных индуктивно-емкостных преобразователях

**В статье анализируются электромагнитные процессы в трехфазных индуктивно-емкостных преобразователях (ИЕП), обеспечивающих неизменный ток в мощных нагрузках, требующих питания постоянным током. Трехфазные ИЕП нашли практическое применение в системах заряда больших емкостных накопителей, в источниках питания мощных дуговых и плазменных установок, в лазерной технике и т. п. В работе даются рекомендации по выбору и инженерному расчету схем трехфазных ИЕП, приводится сравнительный анализ массогабаритных показателей и оценивается гармонический состав входных токов. Моделирование электромагнитных процессов производилось с использованием программного средства Micro-Cap 9.**

**Виктор Опре,**  
д. т. н., профессор

**Сергей Дозоров**

**Анатолий Темников**

Трехфазные индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП), являющиеся преобразователями системы неизменного синусоидального напряжения в систему неизменного постоянного тока, нашли применение в тех случаях, когда возникает необходимость иметь мощные источники питания с внешними характеристиками источников тока. Электромагнитные процессы в этих устройствах аналогичны электромагнитным процессам в однофазных ИЕП [1]. Схемы трехфазных ИЕП образованы путем включения системы однофазных преобразователей в трехфазную сеть и нагруженных на трехфазный трансформатор с выпрямителем. Из всего разнообразия трехфазных ИЕП в работе анализируются две основные схемы: Т-образный ИЕП (рис. 1) и П-образный ИЕП (рис. 2), поскольку они представляют наибольший практический интерес. Следует отметить, что параметры трехфазных преобразователей

существенно зависят от схем включения составляющих их однофазных преобразователей. Можно выделить две основные схемы включения — фазное (рис. 1, 2) и линейное, когда входы однофазных преобразователей подключены к линейным напряжениям сети. Анализ показывает, что при таком включении ток нагрузки будет больше в 1,73 раза по сравнению с фазным включением. При этом напряжение первичных обмоток трансформатора в случае максимальных нагрузок, равных эквивалентному волновому сопротивлению  $R_{\max} = \rho = \sqrt{L_{\Sigma} C_{\Sigma}}$ , составит 220 В при фазном включении ИЕП и 380 В при линейном, что потребует применения соответствующих трансформаторов [1].

Поскольку в программе схемотехнического моделирования Micro-Cap 9 отсутствует такой компонент, как трехфазный трансформатор, в расчетах использовалась система из трех однофазных трансформаторов. Это допущение заведомо обеспечивает симметричность нагрузки трехфазных ИЕП, что несколько отличается от практики применения серийных трехфазных трансформаторов, являющихся в большинстве случаев несимметричными системами, но на точность расчетов это допущение не влияет.

В [2] были рассмотрены различные схемы ИЕП, которые в силу своей симметрии имеют высокий коэффициент мощности, равный в случае согласованной линейной нагрузки 0,945 у Т-образных и 0,992 у П-образных ИЕП, поэтому критерием выбора при их практическом использовании в первую очередь являются массогабаритные показатели и гармонический состав сетевых токов.

Исторически сложилось так, что на практике широкое применение нашли Т-образные ИЕП в системах заряда емкостных накопителей твердотельных технологических лазеров серии «Квант» [3]. У этих преобразователей приемлемые массогабаритные показатели, но они требуют изготовления дросселей с двумя магнитно-

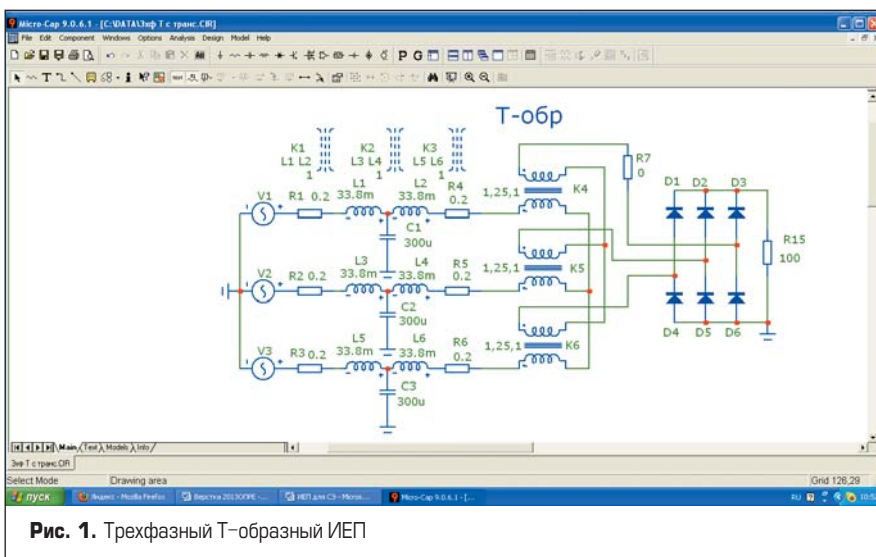


Рис. 1. Трехфазный Т-образный ИЕП

связанными обмотками и, как показал дальнейший анализ, имеют плохой гармонический состав сетевых токов для нагрузок всех видов. Тем

не менее практическое применение Т-образных ИЕП в системах заряда емкостных накопителей объясняется возможностью регулировать напря-

жение заряда путем закорачивания с помощью трехфазного тиристорного ключа выхода ИЕП (т. е. первичных обмоток согласующего трансформатора) в момент достижения напряжением требуемого уровня. Это возможно, поскольку эта схема имеет индуктивный выход и токи ключа ограничены [4]. В схемах ИЕП, имеющих емкостный выход, такой способ неприемлем из-за возникновения экстратовков в контуре коммутации.

Рекомендации и зависимости, необходимые для выбора схемы трехфазных ИЕП при их практической реализации, могут быть сделаны на основании их сравнения с учетом технико-экономических показателей. При этом расчет трехфазных ИЕП аналогичен расчету однофазных, поэтому достаточно использовать результаты анализа электромагнитных процессов в однофазных ИЕП [1]. Основными данными, требуемыми для расчета, являются величины тока нагрузки, сопротивления нагрузки и диапазон изменения сопротивления нагрузки, а в случае нелинейных нагрузок (емкостные накопители, аккумуляторные батареи и т. п.) — величина наибольшего напряжения на нагрузке. Коэффициент трансформации определяется как отношение действующих значений напряжений первичных и вторичных обмоток  $k_{тр} = U_{2\phi} / U_{1\phi}$ .

Действующие значения токов фаз вторичной и первичной обмоток трансформатора  $I_2 = \sqrt{2/3} \times I_{\phi}$ ,  $I_1 = k_{тр} \sqrt{2/3} \times I_{\phi}$  соответственно, а действующее значение напряжения вторичных обмоток трансформатора определяется через среднее значение выпрямленного напряжения, т. е.  $U_{2\phi} = U_H / 2,34$ . Выходные токи однофазных и трехфазных преобразователей при фазном включении соотносятся как  $\sqrt{1,5}$  [5].

Как показано в [1], суммарные величины номиналов конденсаторов и их количество одинаковы для всех основных четырех схем ИЕП. В силу этого сравнение массогабаритных показателей произведено только для индуктивных элементов. В качестве конструктивного выбран параметр  $LP$ , учитывающий соотношение величин индуктивностей  $L$  и действующих значений их токов  $I$  [6]. Анализ показал, что параметр  $LP$  у Т-образной схемы ИЕП в два раза меньше, чем у П-образной. Но при окончательном выборе схемы следует учитывать и некоторую сложность изготовления двухобмоточного дросселя для Т-образной схемы. При этом надо отметить, что форма токов обмоток дросселя Т-образной схемы и конденсатора существенно отличается от синусоидальной, и токи имеют сложный гармонический состав. Напротив, в П-образном ИЕП токи входного конденсатора и дросселя синусоидальны, соответственно меньше и потери в магнитопроводе от гармоник повышенной частоты. Следует признать, что выбор схемы ИЕП с учетом конструктивного параметра  $LP$  является предварительным и окончательно может быть сделан только после тщательных конструктивных расчетов дросселей с учетом тепловых потерь в них, что представляет определенную сложность. Сравнивая гармонический состав токов реактивных элементов двух схем (рис. 3, 4),

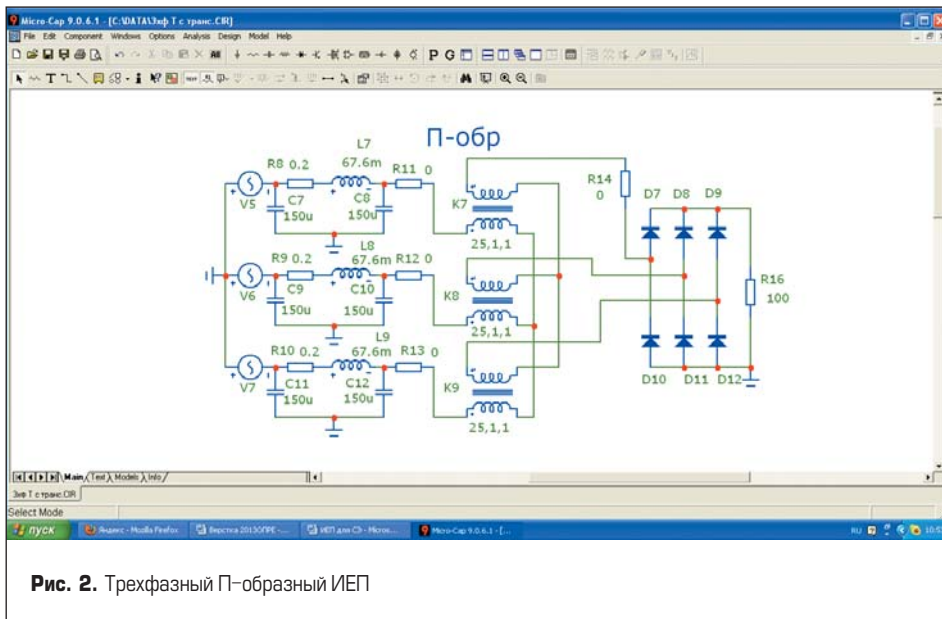


Рис. 2. Трехфазный П-образный ИЕП

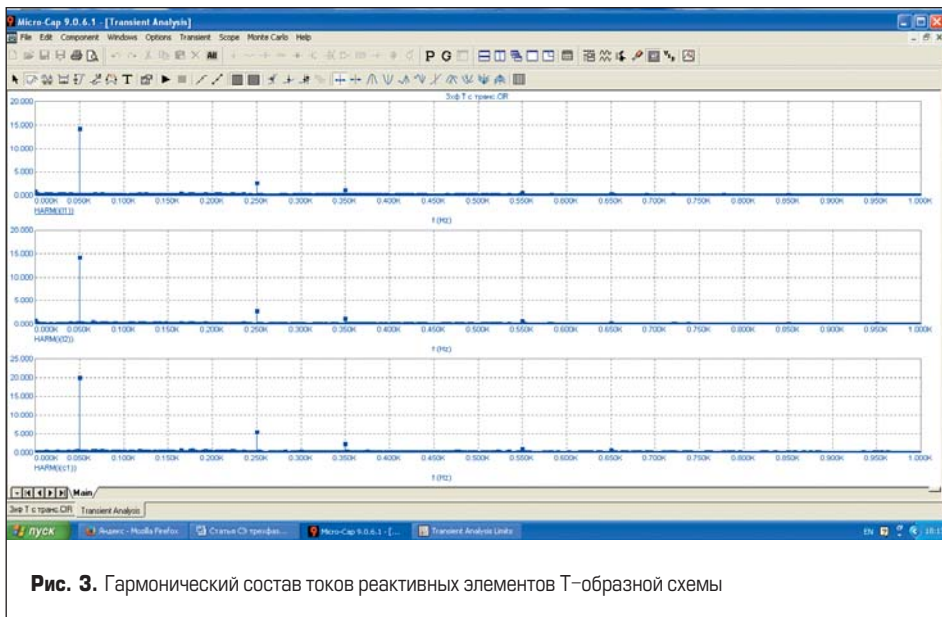


Рис. 3. Гармонический состав токов реактивных элементов Т-образной схемы

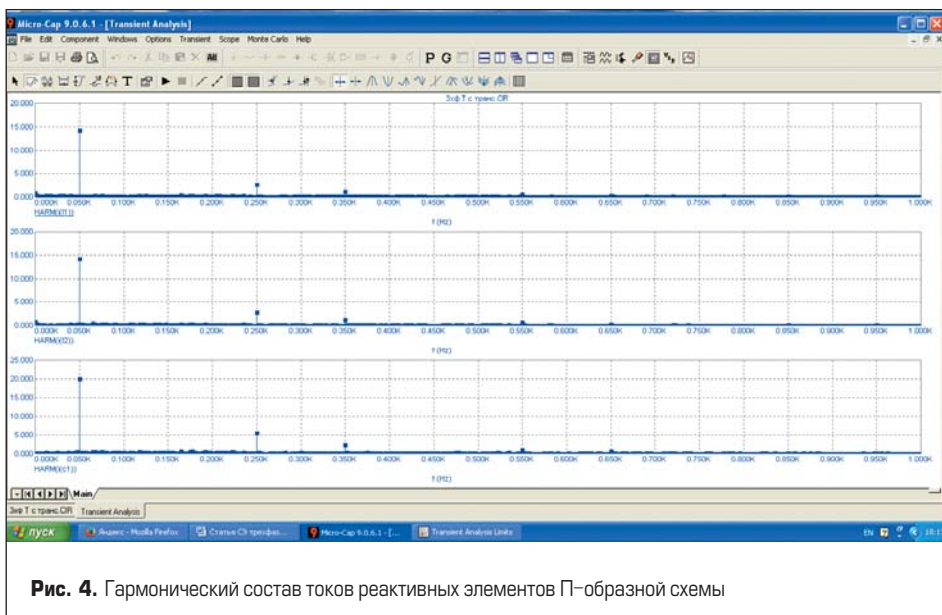


Рис. 4. Гармонический состав токов реактивных элементов П-образной схемы

учитывая синусоидальность входных токов П-образного ИЕП, то есть хорошую электромагнитную совместимость с питающей сетью, при выборе мощных ИЕП авторы рекомендуют отдавать предпочтение схеме П-образного ИЕП.

Из [2] известно, что величины эквивалентных реактивных элементов  $L_3$  и  $C_3$  одинаковы для всех однофазных схем, кроме Т-образной с магнитной связью индуктивных элементов, у которой индуктивности  $L_1 = L_2 = L_3/2$ , а емкость  $C = 2C_3$ . Эквивалентное волновое сопротивление конкретной схемы ИЕП может быть определено как  $\rho = \sqrt{L_3 C_3}$ , что позволяет в последующем определить оптимальную величину нагрузки. Несложно показать, что при  $\omega L_3 = 1/\omega C_3 = \rho$  действующее значение тока нагрузки в случае короткого замыкания равно  $I_H = U_{\text{СЕТИ}}/\omega L_3 = U_{\text{СЕТИ}} \times \omega C_3$ . Поскольку произведение  $L_3 C_3 = \text{const}$ , можно заранее определить величины реактивных элементов  $L_3$  и  $C_3$  исходя из требуемой величины тока нагрузки  $I_H$ , приведенной к первичной стороне согласующего трансформатора.

На рис. 5 представлены временные зависимости действующих значений токов резистивных нагрузок в диапазоне их изменения 100–900 Ом при коэффициенте трансформации  $k_{\text{тр}} = 5$ . Эквивалентные волновые сопротивления этих схем одинаковы и  $\rho = 21,23$  Ом. Величины реактивных элементов следующие:  $L_3 = 67,6$  мГн,  $C_3 = 150$  мкФ. Эквивалентное волновое сопротивление  $\rho = 21,23$  Ом, ожидаемая величина тока короткого замыкания на выходе ИЕП  $10,36 \times 1,73$  А. Коэффициент трансформации согласующих трансформаторов принят равным  $k_{\text{тр}} = 5$ , величина волнового сопротивления, приведенная к вторичной стороне согласующих трансформаторов,  $\rho_2 = 530,75$  Ом, а величина эквивалентной нагрузки выпрямителя, при которой режим работы трехфазного ИЕП является согласованным, в  $\sqrt{3}$  больше ( $R = 919,3$  Ом). При этом напряжение первичных обмоток трансформатора не должно превышать 220 В.

На рис. 6 те же значения токов приведены в увеличенном масштабе, откуда следует, что относительная точность стабилизации  $k_p$ , которая рассчитывается как  $k_i = \Delta I_d / I_p \times 100\%$ , где  $\Delta I_d$  — разность величин токов при максимальном и минимальном значениях сопротивления нагрузки,  $I_p$  — ток согласованной нагрузки, у П-образных ИЕП он существенно выше.

На рис. 7 представлены входные токи двух ИЕП, работающих на резистивную нагрузку. Видно, что входной ток П-образного ИЕП синусоидален, а ток Т-образного ИЕП имеет существенные искажения.

Трехфазные ИЕП могут применяться при заряде больших емкостных накопителей, зарядке и подзарядке аккумуляторных батарей (АКБ) в устройствах бесперебойного питания, в системах питания плазменных установок и на других подобных объектах,

где критерий надежности превалирует над остальными. При этом следует отметить тот факт, что при нелинейных нагрузках

во всех схемах ИЕП, кроме П-образной, форма тока, потребляемого от сети, существенно отличается от синусоидальной.

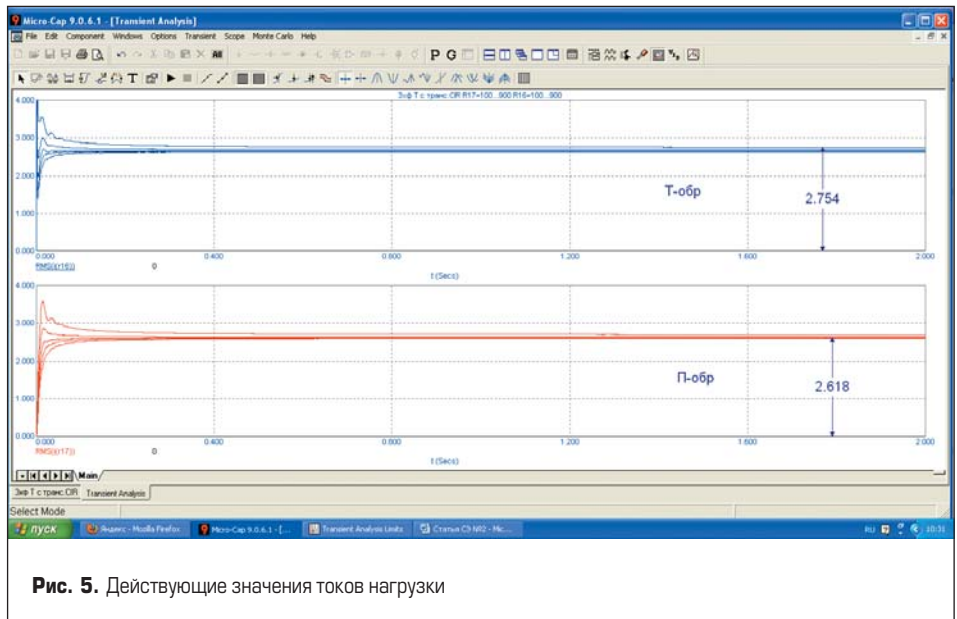


Рис. 5. Действующие значения токов нагрузки

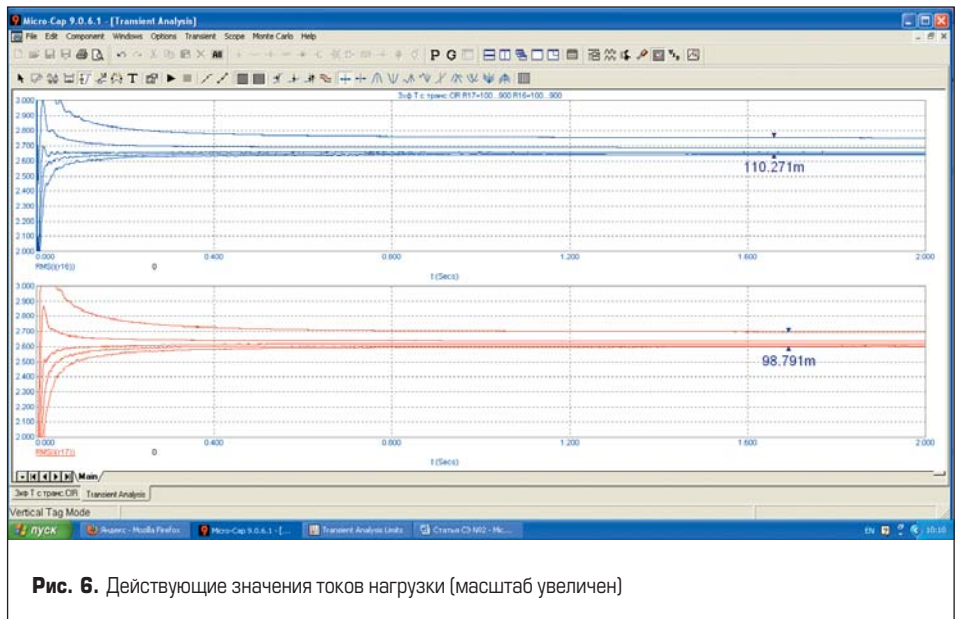


Рис. 6. Действующие значения токов нагрузки (масштаб увеличен)

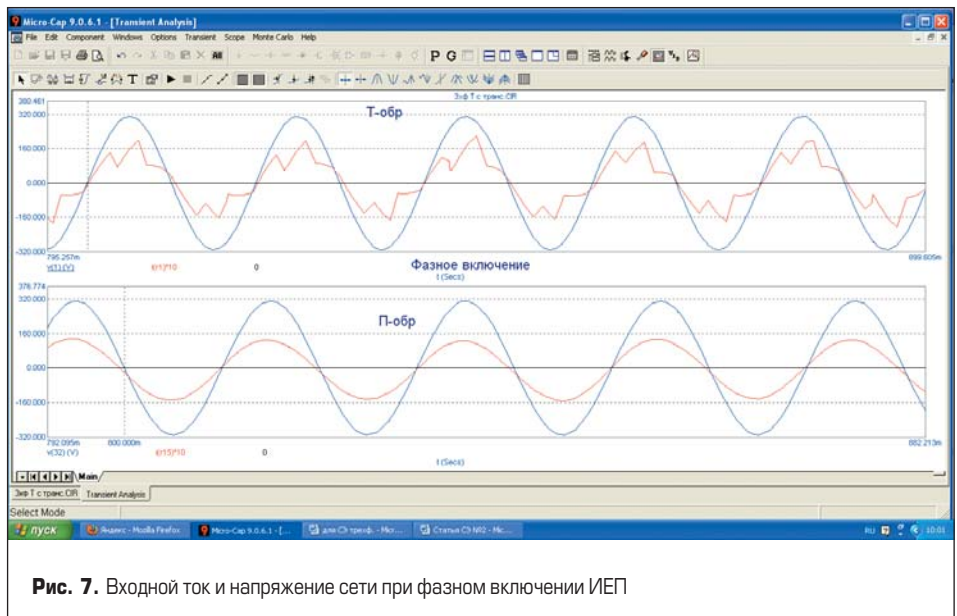


Рис. 7. Входной ток и напряжение сети при фазном включении ИЕП

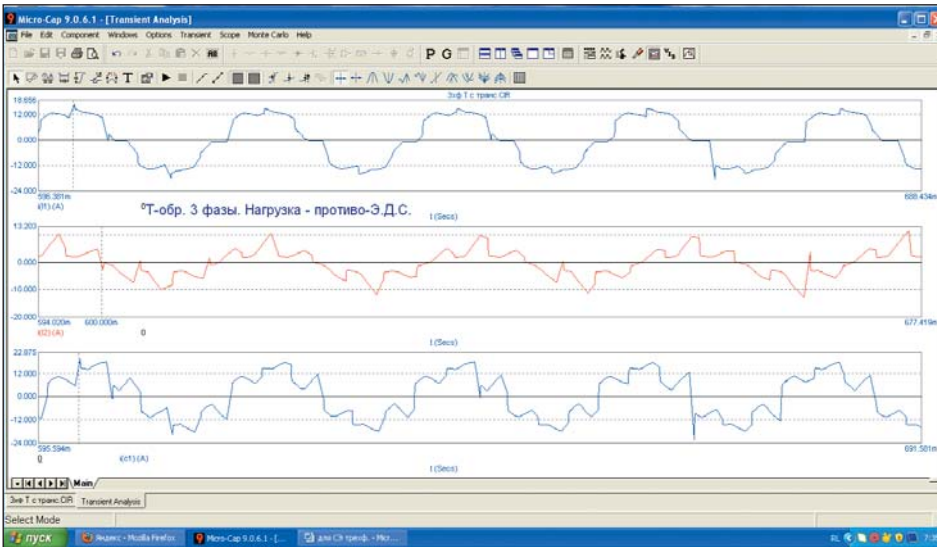


Рис. 8. Временные зависимости токов реактивных элементов Т-образной схемы ИЕП при нагрузке в виде противо-ЭДС

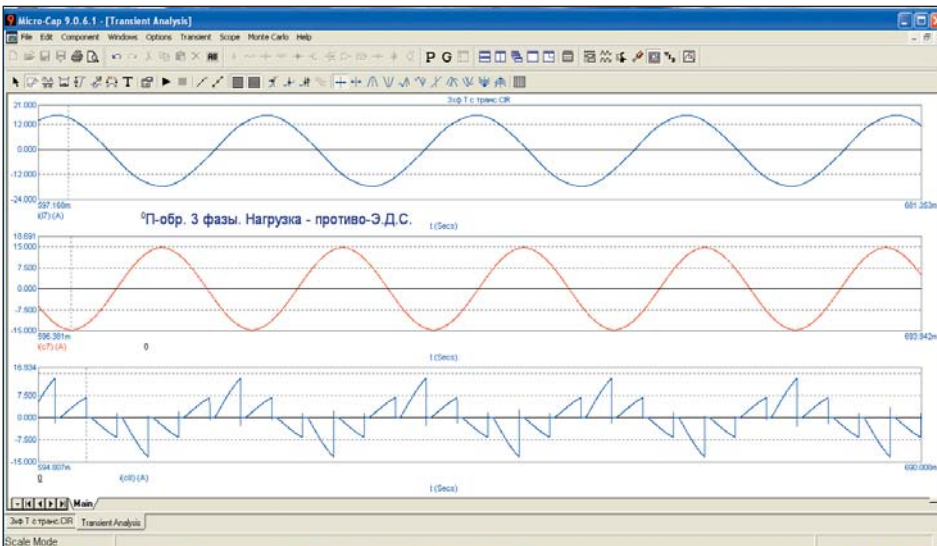


Рис. 9. Временные зависимости токов реактивных элементов П-образной схемы ИЕП при нагрузке в виде противо-ЭДС

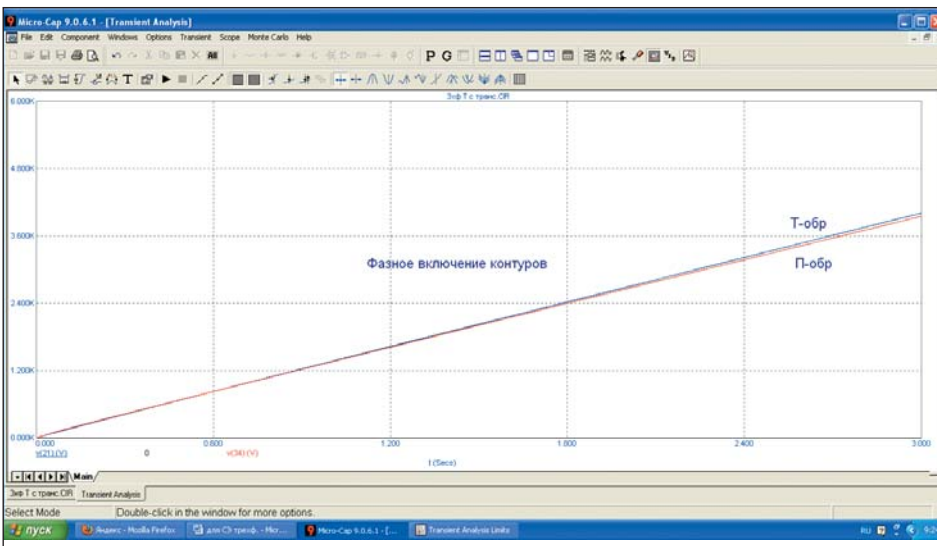


Рис. 10. Временные зависимости напряжений заряда емкостных накопителей

На рис. 8 видно, что токи всех реактивных элементов Т-образной схемы имеют плохой гармонический состав, а токи индуктивности и входной емкости П-образной схемы (рис. 9) синусоидальны, и только ток выходной емкости имеет искажения.

При заряде больших емкостных накопителей мощность, потребляемая от сети в процессе заряда, и ток сети растут при линейном росте напряжения заряда (рис. 10). Форма токов сети у всех схем ИЕП, кроме П-образной, существенно отличается от синусоидальной, поскольку нагрузка представляет собой противо-ЭДС, величина которой растет линейно во времени.

Авторы считают возможным рекомендовать для практической реализации ИЕП П-образную схему, имеющую коэффициент мощности, близкий к единице, и обеспечивающую синусоидальный входной ток при работе на линейные и нелинейные нагрузки.

При инженерном расчете любой из схем трехфазных ИЕП следует ввести ограничение, при котором максимальное напряжение на первичных обмотках согласующего трансформатора  $U_1$ , соответствующее максимальному напряжению на переменной нагрузке  $U_{max}$ , не должно превышать стандартной величины 220 или 380 В. Для резистивных нагрузок  $U_{max} = I_n R_{max}$ , для аккумуляторных батарей  $U_{max} = U_{зар}$  (напряжение заряда), для емкостных накопителей это максимальное напряжение заряда  $U_{max}$  [1]. Величины этих напряжений должны быть приведены к первичной обмотке с учетом коэффициента трансформации  $k_{тр}$ , то есть  $U_1 = U_{max}/k_{тр}$  для повышающих трансформаторов. Это ограничение связано с тем, что в качестве согласующих трансформаторов обычно используются серийные силовые трансформаторы требуемой мощности с заданным коэффициентом трансформации и стандартными напряжениями первичных обмоток.

Литература

1. Опре В. М., Дозоров С. А. Сравнительный анализ электромагнитных процессов в однофазных индуктивно-емкостных преобразователях // Силовая электроника. 2013. № 3.
2. Мияля А. Н., Кубышин Б. Е., Волков И. В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. Киев: Наукова думка. 1974.
3. Вакуленко В. М., Иванов Л. П. Источники питания лазеров. М.: Сов. радио. 1980.
4. Модулятор МТ-42. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Ульяновск: УЭЗ. 1983.
5. Полупроводниковые выпрямители / Под ред. Ф. И. Ковалева и Г. П. Мостковой. М.: «Энергия». 1967.
6. Белопольский И. И. и др. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: «Энергия». 1973.