

Сравнительный анализ электромагнитных процессов

в однофазных индуктивно-емкостных преобразователях

В статье анализируются электромагнитные процессы в однофазных индуктивно-емкостных преобразователях (ИЕП), обеспечивающих неизменный ток в различных линейных и нелинейных нагрузках. ИЕП нашли практическое применение в системах заряда больших емкостных накопителей, источниках питания дуговых и плазменных установок, системах электропривода, в лазерной технике и т. п. Даются рекомендации по выбору и расчету схем однофазных ИЕП для различных нагрузок, а также приводится сравнительный анализ массо-габаритных показателей. Моделирование электромагнитных процессов производилось с использованием программного средства Micro-Cap 9.

Виктор Опре,
д. т. н., профессор

Сергей Дозоров

Индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП), являющиеся преобразователями системы неизменного напряжения в систему неизменного тока, применяются в тех случаях, когда возникает необходимость иметь простые и надежные источники питания с внешними характеристиками источников тока. На практике нашли применение ИЕП, созданные на основе простых схем Бушера, Штейнметца и Пеплова [1–3], предложенных еще в начале предыдущего столетия. Электромагнитные процессы в этих устройствах основаны на явлении резонанса в электрических цепях, содержащих линейные реактивные элементы — индуктивности и емкости. На рис. 1 приведены две схемы Бушера: обычная и дуальная с предвключенной емкостью, которые и явились основой для всех последующих схемных решений ИЕП.

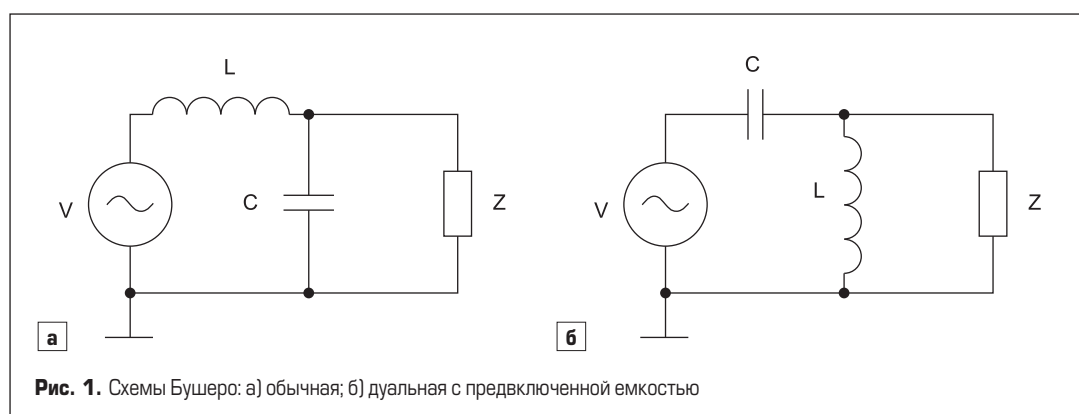
Элементы этих схем выбраны из условия:

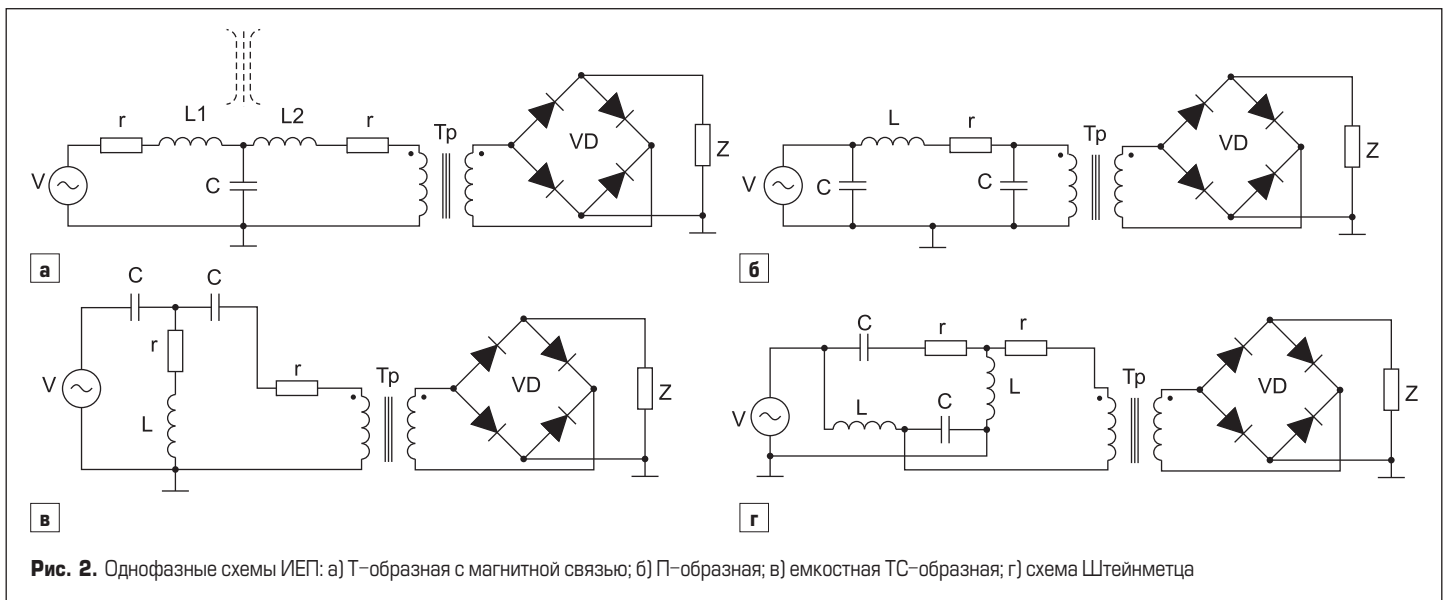
$$\omega^2 LC = 1, \quad (1)$$

где ω — круговая частота источника синусоидально-го напряжения. Ток в изменяющейся (переменной)

нагрузке в случае идеальных реактивных элементов не зависит от сопротивления нагрузки. В [4] были рассмотрены различные схемы однофазных и трехфазных ИЕП и исследованы основные режимы их работы. В указанных публикациях даны рекомендации по выбору схем ИЕП в случае различных нагрузок, работающих как на переменном, так и на постоянном токе при наличии согласующего трансформатора и выпрямителя. На рис. 2 приведены четыре основные схемы однофазных ИЕП, рекомендуемые для практического использования. В качестве нагрузок приведены комплексные сопротивления Z . Все эти схемы, в отличие от схем Бушера, в силу своей симметрии имеют высокий коэффициент мощности [4], приближающийся к единице, и поэтому критерием выбора при их практическом использовании в первую очередь являются массо-габаритные показатели и гармонический состав сетевых токов.

Следует отметить, что возможности Micro-Cap 9 при проведении широкомасштабного численного эксперимента позволяют проектировщику определить практически любые величины электрических и энер-





гетических параметров, рассмотреть электромагнитные процессы как во временной, так и в частотной области и т. п. Однако этот мощный вычислительный инструмент имеет и свои недостатки, поскольку позволяет определить порой чрезмерно большое количество отдельных значений самых различных параметров, но при этом анализ и поиск оптимальных значений становится затруднительным для исследователя, а для инженера-практика не дает конкретного решения.

Авторы сочли необходимым предложить рекомендации и простые зависимости, требуемые для расчета параметров ИЕП при их практической реализации. Причем эти рекомендации должны быть применимы в случае нагрузок самых различных видов.

При сравнительном анализе основных четырех схем ИЕП, работающих на одинаковые нагрузки, следует учесть, что величины эквивалентных реактивных элементов L_3 и C_3 одинаковы для всех схем, кроме Т-образной схемы с магнитной связью индуктивных элементов (рис. 2а), 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 $\omega L_3 = 1/\omega C_3 = \rho$, действующее значение тока

нагрузки в случае короткого замыкания равно $I_H = U_{сет}/\omega L_3 = U_{сет} \times \omega C_3$. Из зависимости (1) следует, что произведение $L_3 C_3 = const$. Это позволяет заранее определить величины реактивных элементов L_3 и C_3 исходя из требуемой величины тока нагрузки I_H , приведенной к первичной стороне согласующего трансформатора. Для предварительной оценки параметров проектируемого ИЕП может быть использована таблица, в которой приведены величины реактивных элементов, обеспечивающие резонанс напряжений на частоте 50 Гц, даны величины эквивалентных волновых сопротивлений ИЕП ρ и ожидаемой величины токов короткого замыкания I_H . Таблица составлена для целых значений величин номиналов конденсаторов с учетом их стандартного ряда. Так как конденсаторы являются покупными изделиями, а индуктивности всегда приходится рассчитывать и изготавливать самостоятельно, их величины не обязательно должны быть кратны целым числам.

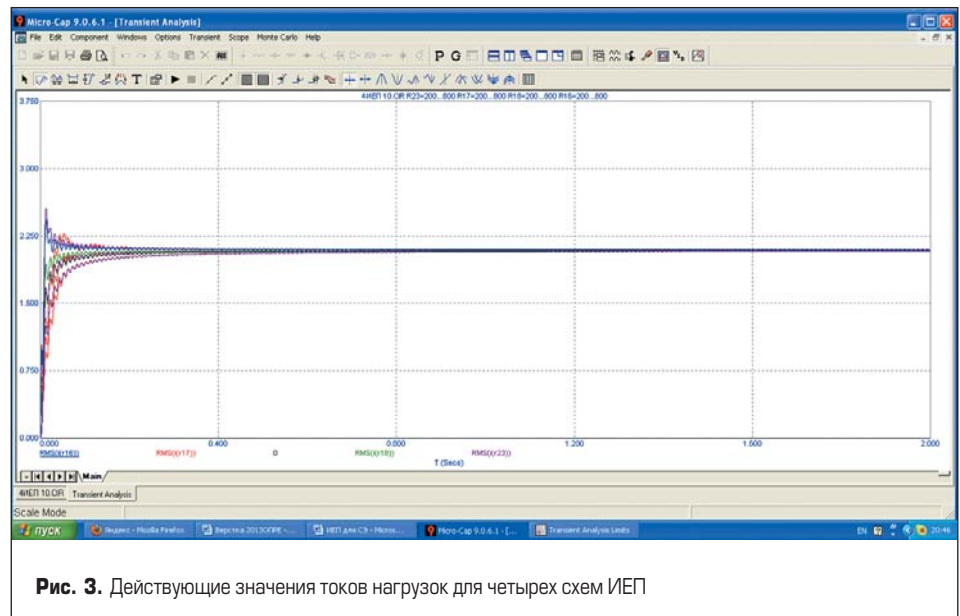
Силовые конденсаторы имеют допустимый по ГОСТ разброс параметров (обычно 5 или 10%), и перед изготовлением ИЕП необходи-

мо измерить величины емкостей конденсаторов и соответственно скорректировать величины катушек индуктивностей, поскольку чувствительность ИЕП к разбросу параметров элементов высокая.

Анализ электромагнитных процессов в программе Micro-Cap 9 проводился для четырех основных схем ИЕП (рис. 2) с согласующими трансформаторами и выпрямителями, причем в качестве нагрузок рассматривались резисторы, накопительные конденсаторы и аккумуляторные батареи. Величины реактивных элементов выбраны следующие: $L_3 = 67,6$ мГ, $C_3 = 150$ мкФ. Эквивалентное волновое сопротивление $\rho = 21,23$ Ом, ожидаемая величина тока короткого замыкания на выходе ИЕП 10,36 А. Коэффициент трансформации согласующих трансформаторов принят $K_{тр} = 5$. Величина волнового сопротивления, приведенная к вторичной стороне согласующего трансформатора, $\rho_2 = 530,7$ Ом. На рис. 3 приведены действующие значения токов нагрузок всех ИЕП при изменении величин резистивных нагрузок от 200 до 800 Ом.

Таблица. Целые значения величин номиналов конденсаторов с учетом их стандартного ряда

С, мкФ	L, мГ	ρ , Ом	I_H , А
1	10142,4	3184,7	0,069
2	5071,2	1592,36	0,138
5	2028,5	636,94	0,345
10	1014,24	318,4	0,69
50	202,8	63,6	3,46
100	101,4	31,84	6,9
150	67,6	21,23	10,36
200	50,	15,92	13,8
300	33,8	10,61	20,7
500	20,28	6,36	34,6
600	17,4	5,385	40,8
1000	10,14	3,18	69,2



Анализ электромагнитных процессов в программном средстве Micro-Cap 9 показал (рис. 3), что все эти схемы обеспечивают практически одинаковые значения действующих величин токов нагрузок и их относительную стабильность при изменении сопротивлений нагрузок в широком диапазоне (в данном случае 200–800 Ом). Коэффициент мощности этих схем близок к единице ($K_M = 1$), входные токи при резистивной нагрузке синусоидальны, $\cos\phi = 1$.

Однофазные ИЕП могут успешно применяться при зарядке и подзарядке аккумуляторных батарей (АКБ) в системах бесперебойного питания мощных газоперекачивающих станций и на других подобных объектах, где критерии надежности преобладают над остальными критериями. Но при такой нелинейной нагрузке, представляющей собой противо-ЭДС, во всех схемах, кроме П-образной, форма тока, потребляемого от сети, существенно отличается от синусоидальной формы (рис. 4). На рис. 5 приведен гармонический состав сетевых токов ИЕП. На рисунке видно, что у всех трех схем (кроме П-образной) присутствуют 3-я, 5-я, 7-я и 9-я гармоники, а у П-образной имеется только 1-я и несущественная по величине 3-я гармоника.

При заряде больших емкостных накопителей мощность, потребляемая от сети в процессе заряда, и сетевой ток растут при линейном росте напряжения заряда (рис. 6). При этом в процессе заряда форма токов сети у всех схем, кроме П-образной, также существенно отличается от синусоидальной (рис. 7), поскольку нагрузка представляет собой противо-ЭДС, величина которой растет линейно во времени.

Критерии, позволяющие произвести сравнение этих схем, могут быть различными и зависеть от самых разнообразных факторов и предпочтений разработчиков. Одним из критериев может быть выбор схем с наименьшими массо-габаритными показателями. Следует отметить, что в эквивалентных схемах конденсаторы и трансформаторы могут применяться однотипные. В этом случае следует выбирать схему с минимальными массо-габаритными показателями катушек индуктивностей. Чтобы избежать сложных и длительных конструктивных расчетов линейных индуктивностей с магнитопроводом, можно принять в качестве критерия конструктивный параметр LI , где I — действующее значение тока катушки [5]. В результате численного анализа в системе Micro-Cap 9 получены относительные величины параметра LI для катушек индуктивностей при согласованном режиме работы, когда $R_H = \rho$. В силу линейности исследуемых цепей расчет и сравнение этих величин были произведены в относительных единицах. За базисные величины были приняты значения $L_3 = 1$, $C_3 = 1$, $\omega = 1$. В этом случае для Т-образной схемы $LI_1 = LI_2 = I_H$, для схемы Штейнметца $LI_1 = LI_2 = \sqrt{0,5}I_H$,

для емкостной Т-образной и П-образной схем $LI = \sqrt{2}I_H$. При этом суммарные относительные величины LI^2 для Т-образной

схемы и схемы Штейнметца $LI^2 = 1$, а для П-образной и ТС-схем величины $LI^2 = 2$. Отсюда можно сделать предварительный

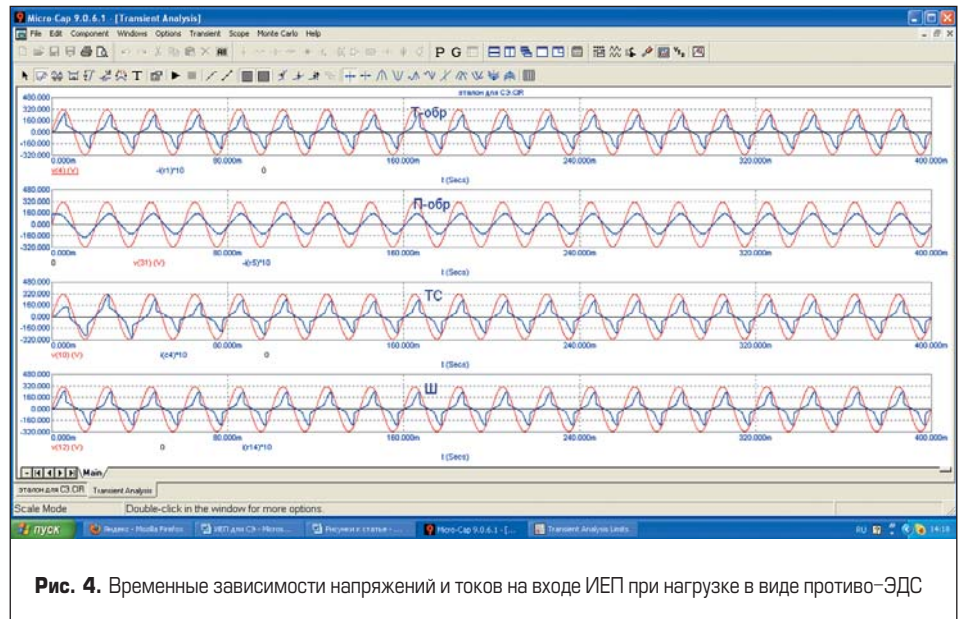


Рис. 4. Временные зависимости напряжений и токов на входе ИЕП при нагрузке в виде противо-ЭДС

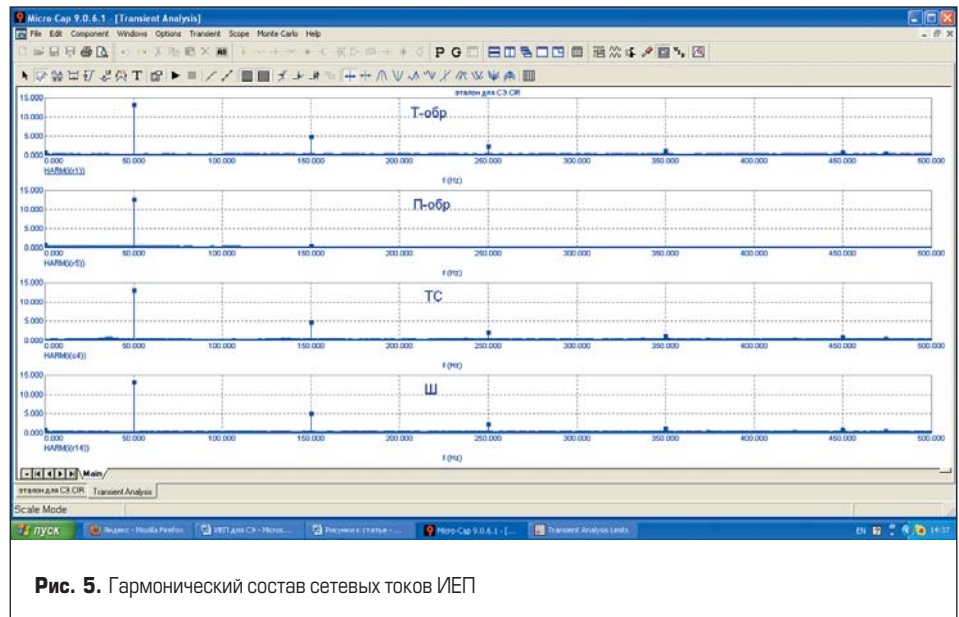


Рис. 5. Гармонический состав сетевых токов ИЕП

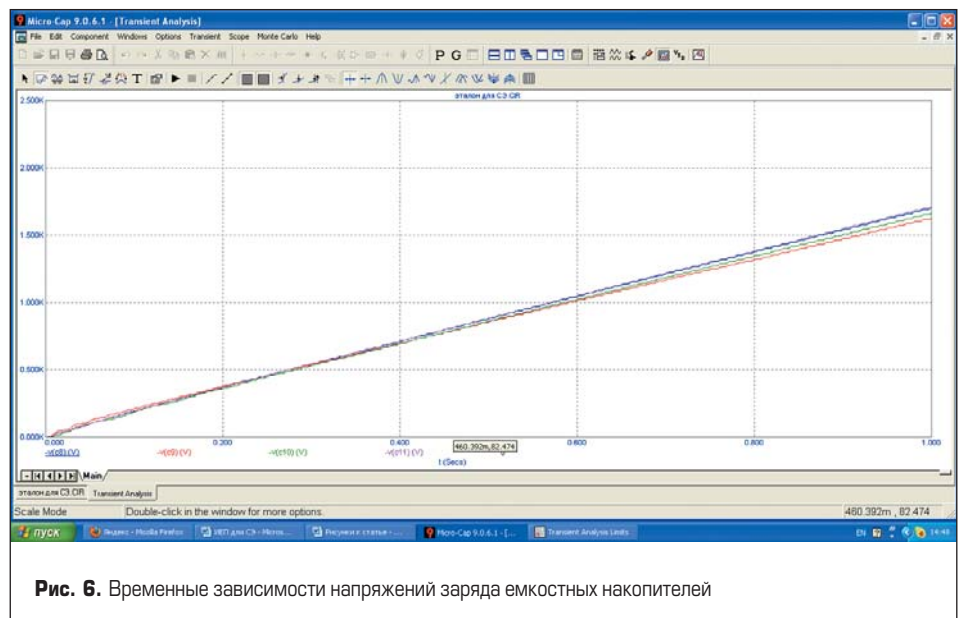


Рис. 6. Временные зависимости напряжений заряда емкостных накопителей

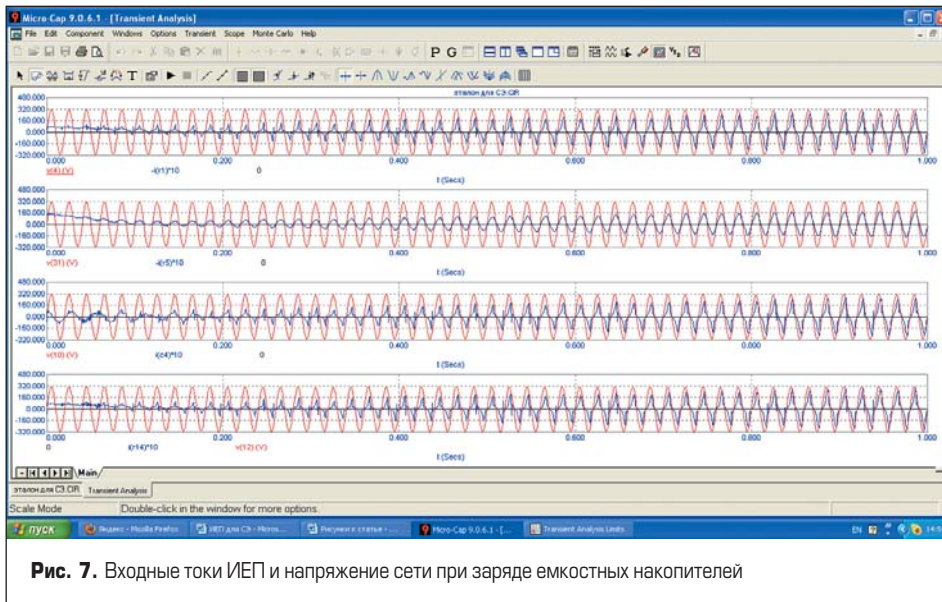


Рис. 7. Входные токи ИЕП и напряжение сети при заряде емкостных накопителей

вывод, что Т-образная схема с магнитной связью и схема Штейнметца обладают лучшими массо-габаритными показателями, но требуют изготовления двух индуктивностей, причем в первом случае размещенных на общем магнитопроводе. Окончательный выбор схемы ИЕП может быть сделан в результате конструктивных расчетов дросселей.

На рис. 8 и 9 приведены результаты экспериментальной проверки расчетов, произведенных в среде Micro-Cap 9. Сравнивались Т-образная и П-образная схемы, и эксперимент полностью подтвердил адекватность результатов численного анализа. В качестве реактивных элементов использовались конденсаторы и линейные дроссели ИЕП, входящие в состав зарядного устройства серийных твердотельных лазеров Квант-15.

На осциллограмме видны существенные искажения входного тока Т-образного ИЕП (рис. 8), которые отсутствуют у П-образного ИЕП (рис. 9).

В связи с этим авторы считают возможным рекомендовать при практическом использовании ИЕП П-образную схему, обеспечивающую синусоидальный входной ток при работе на нелинейные нагрузки.

Для конкретизации инженерных расчетов любой из схем однофазных ИЕП ав-

торы предлагают ввести ограничение, при котором максимальное напряжение на первичной обмотке согласующего трансформатора U_1 , соответствующее максимальному напряжению на переменной нагрузке U_{max} , не должно превышать стандартной величины 220 В. Для резистивных нагрузок $U_{max} = I_n R_{max}$, для аккумуляторных батарей $U_{max} = U_{зар}$ (напряжение батареи), для емкостных накопителей это максимальное напряжение заряда U_{max} . Величины этих напряжений должны быть приведены к первичной обмотке с учетом коэффициента трансформации $K_{тр}$, т. е. $U_1 = U_{max}/K_{тр}$ 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.

В конечном итоге можно рекомендовать следующий алгоритм расчета ИЕП:

- Для резистивной нагрузки задаются величины действующего значения тока нагрузки I_n , сопротивления нагрузки R и диапазон изменения нагрузки $\Delta R = R_{max} - R_{min}$. Для нагрузки в виде емкостных накопителей и АКБ задается среднее значение тока нагрузки I_{cp} .

- Находится действующее значение напряжения на резистивной нагрузке $U_d = I_n R_{max}$, напряжение вторичной обмотки трансформатора принимается равным $U_2 = U_d/0,9$.
- Определяется коэффициент трансформации $K_{тр} = U_2/U_1$, где U_1 — напряжение первичной обмотки трансформатора. При использовании стандартных серийных трансформаторов напряжение U_1 принимается равным 220 В. Тогда $K_{тр} = U_2/220$.
- Мощность трансформатора в предварительных оценках $P_{тр} = U_1 I_1$, где I_1 — ток первичной обмотки. Для резистивной нагрузки можно принять величину $I_1 = I_n/K_{тр}$.
- Определяется максимальная величина сопротивления нагрузки ИЕП, приведенная к первичной обмотке трансформатора $R_{1max} = R_{max}/K_{тр}^2$.
- Для конкретной схемы ИЕП находятся номиналы реактивных элементов, которые определяют величину тока короткого замыкания. Поскольку $\omega L = 1/\omega C = U_1/I_1 = 220/I_1$, то величины реактивных элементов могут быть определены по эмпирическим зависимостям: $L = 0,7/I_1$ Гн и $C = 14,48 I_1$ мкФ.
- Величина эквивалентного волнового сопротивления $\rho = \sqrt{L/C} = 219,86/I_1$.
- Для резистивной нагрузки $U_2 = U_d$, при заряде емкостного накопителя максимальная величина действующего значения $U_{2max} = U_{Cmax}/\sqrt{2}$, при заряде АКБ $U_2 = 0,9 U_d = const$.
- При необходимости результаты расчета следует проверить с помощью программного средства Micro-Cap 9.

Литература

1. Boucherot P. Calcul des alternateurs, Transformateurs et alternomoteurs. Paris. 1910.
2. Steinmetz. Theory and Calculation of Electric Circuits. McGraw Hill. 1917.
3. Pieplow H/ Zur Theori der Transformation von konstantem Strom auf konstante Spannung // Arch.-Electrotechn. 1937.31.1.
4. Миях А. Н., Кубышин Б. Е., Волков И. В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. Киев: Наукова думка. 1974.
5. Белопольский И. И. и др. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия. 1973.

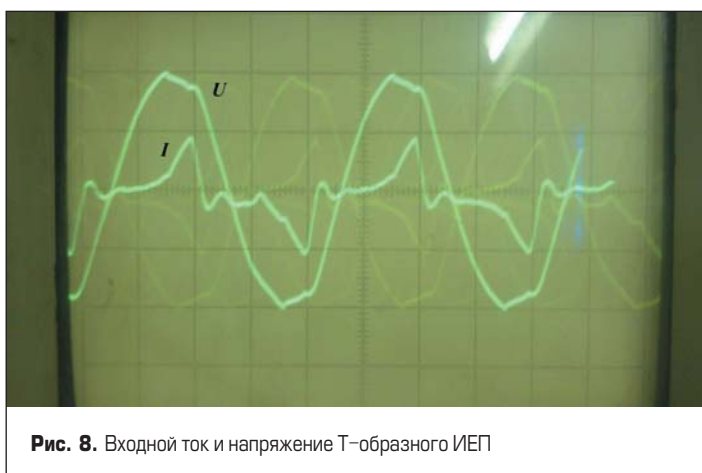


Рис. 8. Входной ток и напряжение Т-образного ИЕП



Рис. 9. Входной ток и напряжение П-образного ИЕП