

Электромагнитные процессы

в трансформаторно-емкостных источниках неизменного тока

В статье анализируются электромагнитные процессы в оригинальных схемах индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП), обеспечивающих неизменный ток нагрузки, а именно в трансформаторно-емкостных преобразователях (ТЕП). Они обладают улучшенными технико-экономическими показателями по сравнению с классическими ИЕП и могут найти широкое применение в системах питания неизменным током. В работе даются рекомендации по выбору и расчету схем ТЕП. Моделирование электромагнитных процессов производилось с использованием программных средств Micro-Cap 9.

Виктор Опре,
д. т. н., профессор

Петр Кошелев,
д. т. н., профессор

Сергей Дозоров

В [1] был произведен анализ электромагнитных процессов в ИЕП, выполненных по четырем основным каноническим схемам. В состав всех схем ИЕП входит батарея конденсаторов, дроссель и согласующий трансформатор. Хорошо известно, что основным достоинством источников тока, выполненных на основе ИЕП, является высокая надеж-

ность, определяемая надежностью самих реактивных элементов. Но ИЕП присущ существенный недостаток, ограничивающий их применение, а именно — большие массогабаритные характеристики дросселей и конденсаторов, особенно в сетях промышленной частоты. Помимо этого, в ИЕП, кроме дросселей, практически всегда присутствуют согласующие силовые трансформаторы, соизмеримые по своим габаритам с дросселями. Это существенно ухудшает технико-экономические показатели ИЕП в целом и ограничивает область их применения, особенно на подвижных объектах.

В основе всех схем ИЕП лежат две основные схемы Бушера — с предвключенной индуктивностью и с предвключенной емкостью [1]. В схеме с предвключенной емкостью нагрузка, а следовательно, и первичная обмотка согласующего трансформатора подключаются параллельно дросселю. В связи с этим можно совместить функции дросселя и сило-

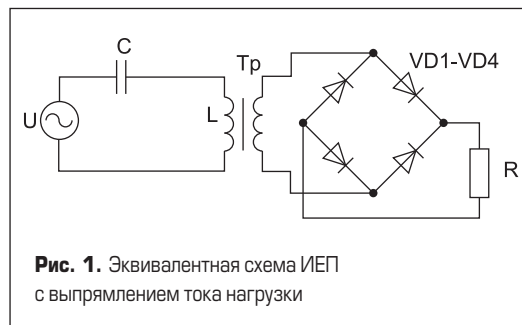


Рис. 1. Эквивалентная схема ИЕП с выпрямлением тока нагрузки

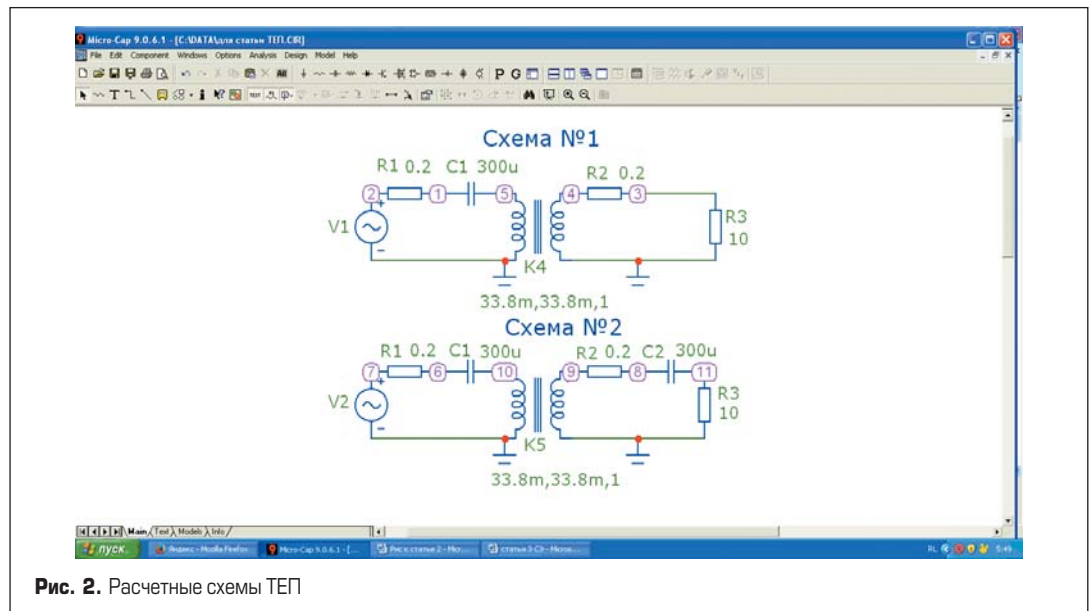


Рис. 2. Расчетные схемы ТЕП

вого трансформатора в одном устройстве — трансформаторе с предварительно заданными величинами индуктивностей намагничивания и рассеяния (рис. 1) [2]. В данном случае колебательный контур, настроенный на круговую частоту питающей сети ω , образуют конденсатор C и индуктивность L , являющаяся суммой индуктивности намагничивания L_μ и индуктивности рассеяния L_S первичной обмотки трансформатора, то есть $L = L_S + L_\mu$, и условие резонанса имеет обычный вид: $\omega L = 1/\omega C$.

На рис. 2 приведены две расчетные схемы ТЕР, учитывающие потери в обмотках трансформатора. Схема № 1 содержит единственный конденсатор резонансного контура, обеспечивает хорошую стабилизацию тока нагрузки, но при этом имеет сравнительно низкий коэффициент мощности при емкостной реакции входной цепи. Поскольку наилучшими энергетическими характеристиками обладают симметричные схемы ИЕРП [3], предложенная схема ТЕР может быть улучшена посредством включения последовательно во вторичную обмотку трансформатора дополнительного конденсатора C_2 (рис. 2, схема № 2), емкость которого определяется коэффициентом трансформации $K_{тр} = U_2/U_1$, где U_2 и U_1 — действующие значения напряжений вторичной и первичной обмоток соответственно: $C_2 = C_1/K_{тр}^2$. При установке дополнительного конденсатора коэффициент мощности схемы становится близким к единице, но при этом возрастают напряжения обмоток трансформатора.

В расчетных схемах ТЕР были приняты значения номиналов конденсаторов $C_1 = C_2 = 300$ мкФ, а величины индуктивностей обмоток трансформатора $L_1 = L_2 = 33,8$ мГн, что соответствует параметрам ИЕРП, входящим в состав источников питания твердотельных лазеров серии «Квант». Волновое сопротивление резонансного контура $\rho = 10,6$ Ом, ток короткого замыкания и нагрузки равен $I_{кз} = U_{сет}/\rho = 20,75$ А, где $\rho = \sqrt{L_1/C_1}$.

На рис. 3 приведены действующие значения токов резистивной нагрузки при изменении сопротивления нагрузки от 5 до 20 Ом. Точность стабилизации этих двух схем одинакова, но, как показано на рис. 4, фазовый сдвиг входных напряжений и токов существенно отличается. В схеме № 1 входной ток опережает напряжение сети, а в схеме № 2 фазы напряжения и тока совпадают. Из рис. 5 следует, что коэффициент мощности ТЕР с дополнительным конденсатором (схема № 2) постоянен и равен единице при изменении нагрузки от 5 до 20 Ом, а в схеме № 1 зависимость коэффициента мощности от нагрузки существенна.

При работе ТЕР на нелинейные нагрузки, например в зарядных устройствах емкостных накопителей или аккумуляторных батарей (АКБ), в системах питания плазменных или дуговых установок, выход преобразователей подключается к нагрузке через выпрямитель (рис. 1). В случае работы ТЕР на нелинейную нагрузку в виде противо-ЭДС (причем при заряде емкостных накопителей величина

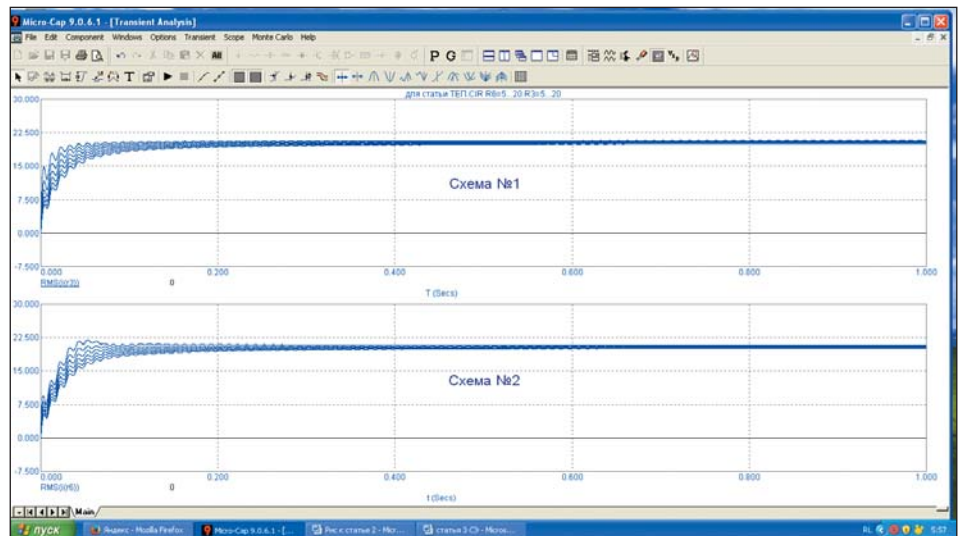


Рис. 3. Стабилизация токов нагрузки (действующие значения)

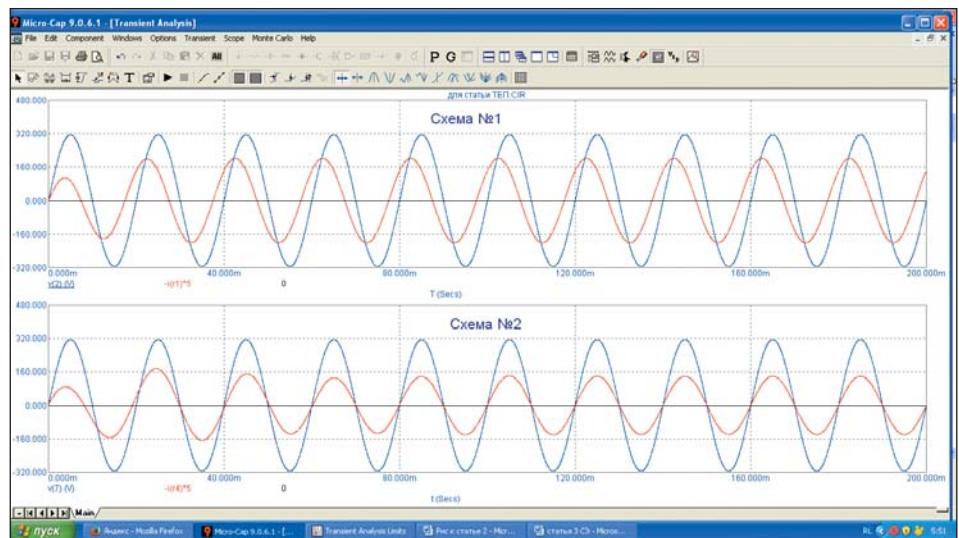


Рис. 4. Временные зависимости входных напряжений и токов двух схем ТЕР

противо-ЭДС растет во времени) гармонический состав входных токов ТЕР существенно отличается от случая резистивной нагрузки.

На рис. 6 приведены полученные в среде Micro-Cap 9 временные зависимости входных токов и напряжений двух схем ТЕР при

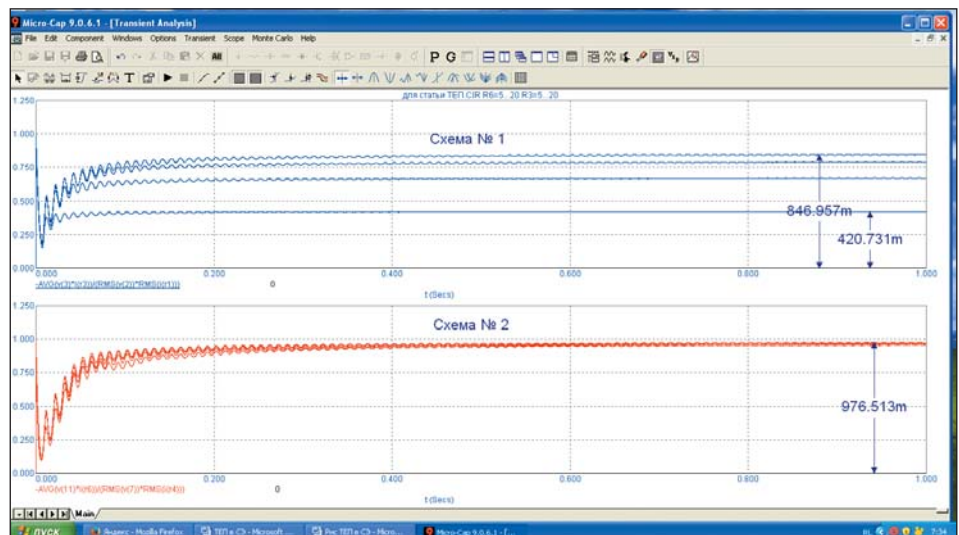


Рис. 5. Коэффициенты мощности ТЕР при изменении нагрузки от 5 до 20 Ом

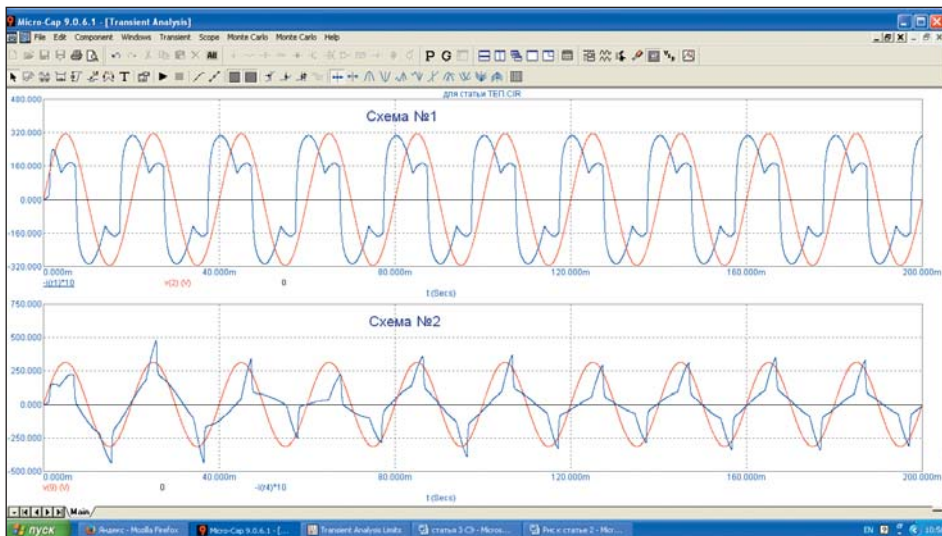


Рис. 6. Входные токи и напряжения ТЭП при заряде АКБ

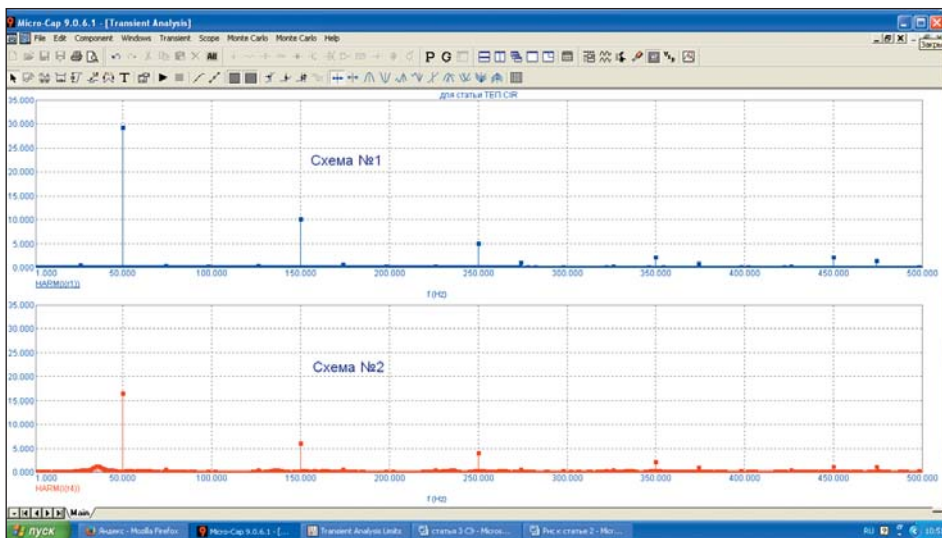


Рис. 7. Гармонический состав входных токов ТЭП при заряде АКБ

заряде АКБ, а на рис. 7 представлен гармонический состав этих токов.

На рис. 8 и 9 приведены результаты экспериментальной проверки расчетов, произведенных в среде Micro-Cap 9. Сравнивались две

схемы (№ 1 и № 2), и эксперимент подтвердил адекватность результатов численного анализа. В эксперименте был использован серийный трансформатор ОСМ-2,5 с коэффициентом трансформации $K_{тр} = 1$, в магнитопровод

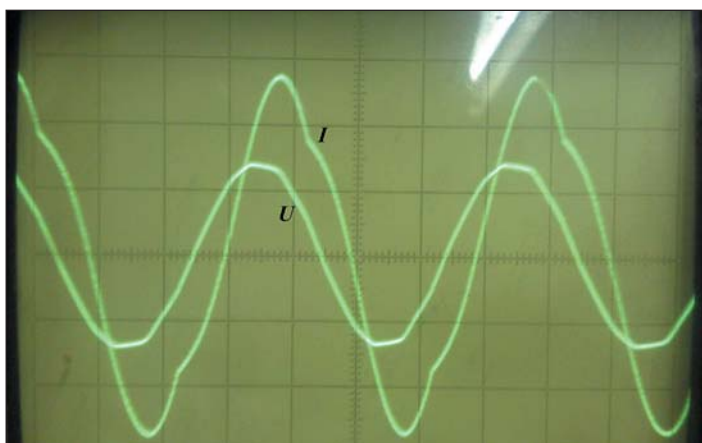


Рис. 8. Осциллограмма входных тока и напряжения ТЭП (схема № 1) при заряде АКБ

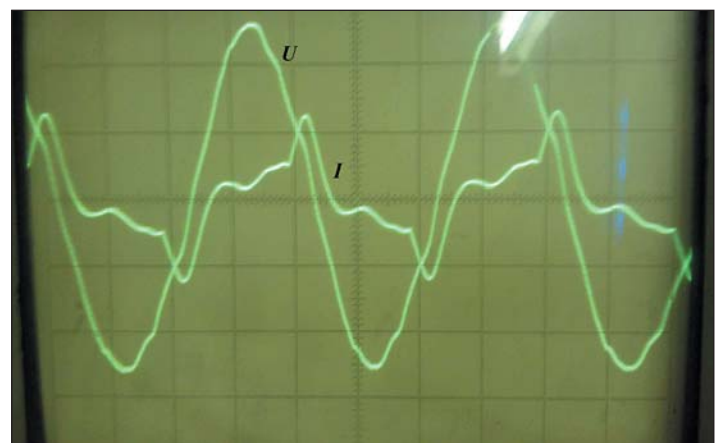


Рис. 9. Осциллограмма входных тока и напряжения ТЭП (схема № 2) при заряде АКБ

которого был введен зазор, обеспечивший требуемую величину индуктивности намагничивания. Номинал конденсаторов составил 300 мкФ.

Особенностью проектирования источников неизменного тока на основе ТЭП является расчет трансформатора с заданной величиной индуктивностей намагничивания и рассеяния, коэффициента трансформации и величинами токов и напряжений обмоток. Расчет может быть произведен операторным методом с использованием программы символьных преобразований MAPLE 9.5 с последующим экспортом данных в пакет MATLAB [4]. Комплект таких программ, позволяющий пользователю оперативно решать задачи проектирования ТЭП, был разработан на кафедре «Электротехнологическая и преобразовательная техника» СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и успешно применяется на практике.

На основе однофазных ТЭП также могут быть созданы мощные трехфазные системы питания постоянным и неизменным током [5]. На рис. 10 приведена схема трехфазного симметричного ТЭП с коэффициентом трансформации $K_{тр} = 4$. В этом случае входы трех однофазных ТЭП включены в фазы питающей сети, а к их выходам подключен трехфазный выпрямитель.

Следует отметить, что применение в трехфазных ТЭП серийных трехфазных трансформаторов в качестве согласующих невозможно. Это объясняется тем, что трехфазные трансформаторы представляют собой принципиально несимметричные системы, имеющие различные величины индуктивностей намагничивания центральной и крайних обмоток. В силу этого в трехфазных ТЭП следует использовать три одинаковых однофазных трансформатора индивидуального изготовления.

На основе результатов анализа электромагнитных процессов можно предложить методику расчета однофазных ТЭП для заданного диапазона изменений величины нагрузки и определить основные электрические параметры, необходимые для проектирования согласующего трансформатора.

- Для резистивной нагрузки задаются величины действующего значения тока нагруз-

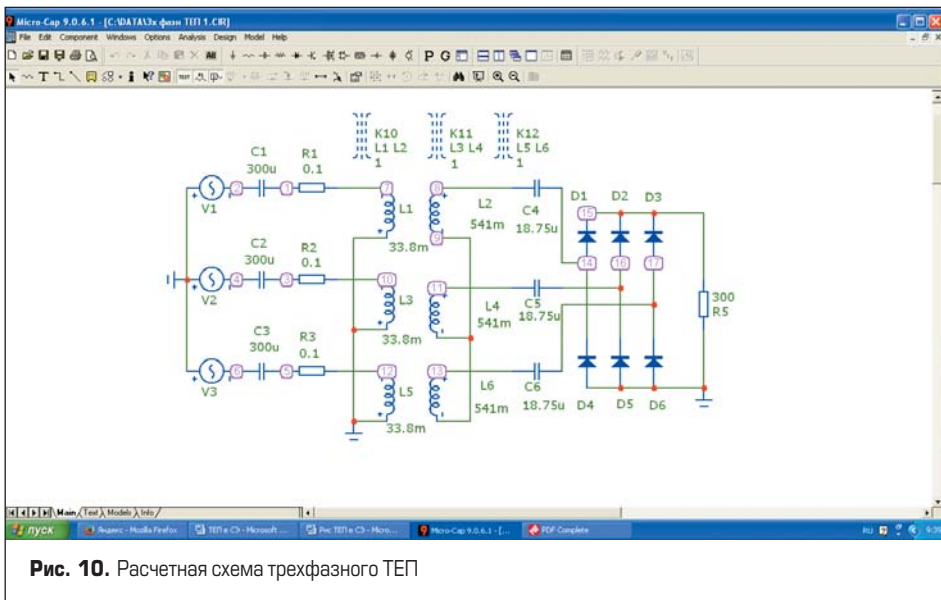


Рис. 10. Расчетная схема трехфазного ТЕП

мы неизменного тока на основе ТЕП могут найти применение на подвижных объектах, поскольку в бортовых системах обычно имеется силовая сеть с частотой 400 Гц, т. е. массогабаритные показатели преобразователей будут существенно меньше, чем на промышленной частоте. Помимо этого преимущества ТЕП и ИЕП, по сравнению с полупроводниковыми преобразователями, особенно ярко проявляются при работе в условиях повышенной радиации для обеспечения максимальной высокой надежности систем питания неизменным током.

Литература

1. Опре В., Дозоров С. Сравнительный анализ электромагнитных процессов в однофазных индуктивно-емкостных преобразователях. // Силовая электроника. 2013. № 3.
2. Пат. 77517 (РФ) МПК Н02М 5/06. Индуктивно-емкостный преобразователь / С. А. Дозоров, В. М. Опре, И. В. Саенко, А. А. Новик, П. А. Кошелев, С. В. Парамонов // Бюл. № 29. 2008.
3. Миях А. Н., Кубышин Б. Е., Волков И. В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. Киев: Наукова думка. 1974.
4. Дозоров С. А., Кошелев П. А., Опре В. М., Парамонов С. В., Терещенко В. Н. Трансформаторно-емкостный стабилизатор тока // Вестник Саратовского государственного университета. 2012. № 2 (66). Вып. 2.
5. Опре В., Дозоров С., Темников А. Электромагнитные процессы в трехфазных индуктивно-емкостных преобразователях // Силовая электроника. 2014. № 1.
6. Полупроводниковые выпрямители. Под. ред. Ф. И. Ковалева и Г. П. Мостковой. М.: «Энергия». 1967.

ки I_{cp} , сопротивления нагрузки R и диапазон изменения нагрузки $\Delta R = R_{max} - R_{min}$. Для нагрузки в виде емкостных накопителей и аккумуляторных батарей (АКБ) задается среднее значение тока нагрузки I_{cp} и максимальная величина действующего значения напряжения U_d .

- Находится величина действующего значения напряжения на резистивной нагрузке $U_d = I_{cp} R_{max}$, напряжение вторичной обмотки трансформатора равно $U_2 = U_d$ для схемы № 1, а для схемы № 2 — $U_2 = \sqrt{2} U_d$.
- Определяется коэффициент трансформации $K_{тр} = U_2 / U_1$, где $U_1 = U_{сети}$ — т. е. для схемы № 1 напряжение первичной обмотки трансформатора принимается равным напряжению сети, а для схемы № 2 — $U_1 = \sqrt{2} U_{сети}$.
- Определяется максимальная величина сопротивления нагрузки ТЕП, приведенная

к первичной обмотке трансформатора $R_{1max} = R_{max} / K_{тр}^2$.

- Определяется величина эквивалентного волнового сопротивления $\rho = \sqrt{L_1 / C_1} = R_{1max}$, величина емкости $C_1 = I_1 / \omega U_{сети}$, величина суммарной индуктивности первичной обмотки трансформатора $L_1 = 1 / \omega^2 C_1$.
- Для проектирования трансформатора в схеме № 1 следует принять значения напряжений $U_1 = U_2 = U_{сети}$, значения токов $I_2 = I_{cp}$, $I_1 = I_2 \sqrt{2}$. В схеме № 2 следует принять значения напряжений $U_1 = U_2 = \sqrt{2} U_{сети}$, значения токов $I_1 = I_2 = I_{cp}$.
- Для трехфазной системы ток нагрузки и ток вторичной обмотки соотносятся как $I_{cp} = \sqrt{1,5} I_2$, напряжение вторичной обмотки $U_2 = U_{cp} / 2,34$ [6].

В заключение следует отметить, что, благодаря своей простоте и надежности, систе-