

УДК 621.314

Ю.В. Руденко, канд. техн. наук¹, Т.В. Руденко, канд. техн. наук²

Динамика процессов в высоковольтном источнике питания, работающем на технологическую нагрузку

Выполнен анализ зависимости величины пульсаций выходного напряжения от внутренних параметров силового трансформатора. Проанализирована динамика процессов в выходных цепях источника питания учетом особенностей его работы на технологическое оборудование.

The analysis of output voltage ripples in dependence of the internal parameters of power transformer is provided. The dynamics of processes at the output circuits of power supply is analyzed with taking into account the particularities of its operation on the technological equipment.

Ключевые слова: высоковольтный многомодульный источник питания, электронно-лучевое технологическое оборудование

Введение

При электропитании высоковольтных потребителей электроэнергии часто используют последовательное включение по выходу однофазных либо трехфазных выпрямителей, входы которых подключены к нескольким вторичным обмоткам одного силового трансформатора [1]. Использование такого секционированного подхода при построении вторичного источника электропитания позволяет получить уровни вы-

ходного напряжения при существующей элементной базе порядка 30 кВ и выше. Такие источники могут быть использованы для электропитания различного технологического оборудования, в частности, - питания электронно-лучевых пушек [2]. Важной задачей при создании таких систем является обеспечение оптимальных показателей параметров электроэнергии на входе и выходе устройства, обеспечение энергосберегающих характеристик устройства. В работе [3] рассмотрены вопросы исследования гармонического состава потребляемого тока системы электропитания, коэффициента гармоник потребляемого тока, коэффициента мощности, крутизны нагрузочной характеристики в зависимости внутренних параметров силового трансформатора. Однако интерес также представляет анализ пульсаций выходного напряжения, анализ динамики процессов во внутренних цепях источника питания при его работе на технологическое оборудование, что и явилось целью данной работы.

Динамика процессов в источнике питания, работающем на технологическую нагрузку

Структура высоковольтного источника питания [2] изображена на рис. 1.

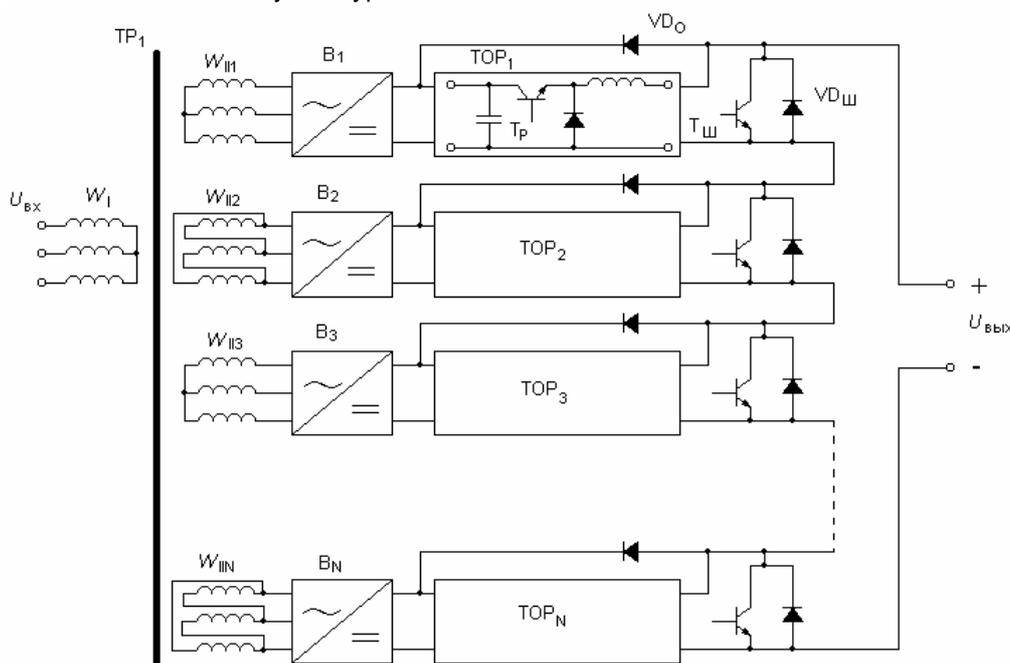


Рис.1. Структурная схема высоковольтного источника

Источник содержит секционированный трансформатор TP1. Особенностью такого трансформатора является то, что его вторичная сторона выполнена в виде N числа вторичных обмоток, половина из которых соединена в «звезду», а вторая половина – в «треугольник». В данной системе питания на выходах вторичных обмоток трансформатора используются выходные выпрямители (B1 – BN) и узлы токоограничения (TOP1 – TOPN) на основе высокочастотных импульсных регуляторов. Эти импульсные регуляторы работают в релейном режиме токоограничения на высокой частоте только при перегрузках, в стационарных режимах они находятся полностью в открытом состоянии и поэтому дополнительных потерь в таких режимах не создают.

В основу анализа положены процессы, протекающие в одной паре секций, где к выпрямителю и регулятору одной из секций C1 подключены вторичные обмотки силового трансформатора TP1, соединенные в «звезду», а к выпрямителю и регулятору второй секции C2 – вторичные обмотки, соединенные в «треугольник» (рис. 2).

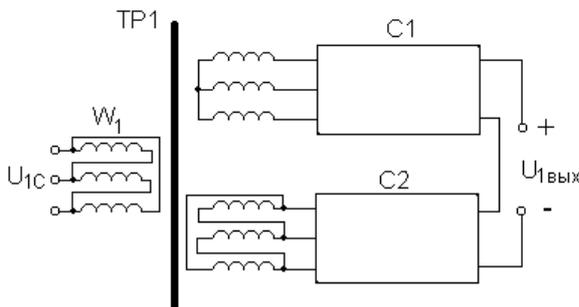


Рис.2. Структура модели для анализа

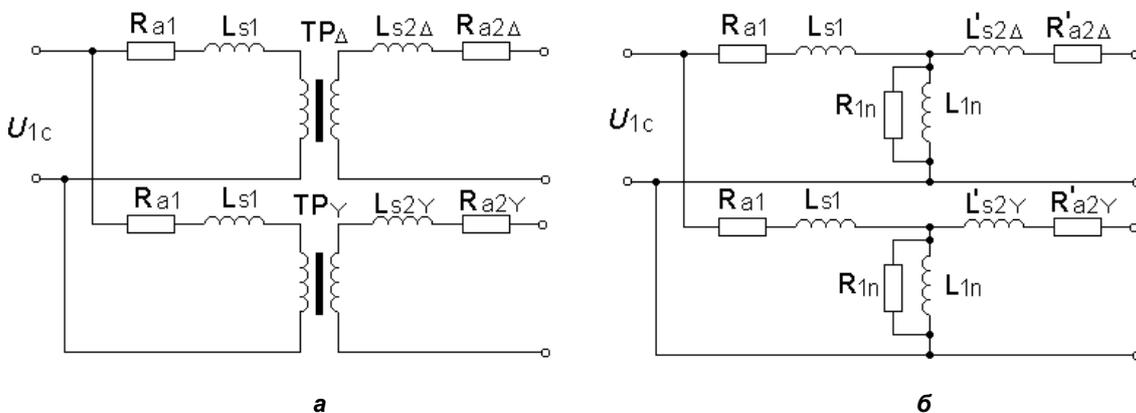


Рис.3. Эквивалентные схемы замещения: а – иллюстрация на основе реальных однофазных трансформаторов; б – схема замещения на основе идеальных трансформаторов

В данной модели обмотка w_1 соответствует такому количеству витков первичной обмотки трансформатора TP1, при котором на ней формируется напряжение равное

$$U_{C1} = \frac{2U_C}{N},$$

где $U_C = 10\text{kV}$ – общее сетевое напряжение на входе источника, N – количество секций источника.

Для одной из фаз трансформатора физические процессы, протекающие в нем, можно проиллюстрировать с помощью однофазных трансформаторов, первичные обмотки которых включены параллельно (рис. 3, а).

Рис. 3. Эквивалентные схемы замещения: а – иллюстрация на основе реальных однофазных трансформаторов; б – схема замещения на основе идеальных трансформаторов

В данной схеме (рис. 3, а) введены элементы, определяющие активные потери $R_{a1}, R_{a2\Delta}, R_{a2\gamma}$ в обмотках трансформаторов и индуктивности рассеяния $L_{S1}, L_{S2\Delta}, L_{S2\gamma}$, характеризующие магнитную связь между обмотками (символ Δ и γ обозначает принадлежность элемента к обмотке, соединенной в «треугольник» и «звезду» соответственно).

На рис. 3, б представлена модель с учетом схем замещения трансформаторов и с учетом параметров, приведенных к первичной стороне:

$$R'_{a2\Delta} = R_{a2\gamma} k_{TP\Delta}^2, \quad L'_{S2\Delta} = L_{S2\gamma} k_{TP\Delta}^2,$$

$$R'_{a2\gamma} = R_{a2\gamma} k_{TP\gamma}^2, \quad L'_{S2\gamma} = L_{S2\gamma} k_{TP\gamma}^2,$$

где $k_{TP\Delta}, k_{TP\gamma}$ – коэффициенты трансформации между секцией первичной обмотки и вторичной обмоткой, соединенной в «треугольник» и, соответственно, между секцией первичной обмотки и вторичной обмоткой, соединенной в «звезду».

Введенные таким образом элементы позволяют учесть внутренние параметры трансформатора при анализе процессов в источнике. Для анализа процессов в источнике использованы справочные данные реального силового трансформатора ТСЗЛ – 630/10 [4]. Для этого типа трансформатора величина тока холостого хода составляет 1.4% от номинального значения, напряжение короткого замыкания – 5.5% от номинального значения, потери холостого хода – 1.65 кВт, потери короткого замыкания – 6.8 кВт. Исходя из этих данных в работе [3] определены активные потери обмоток трансформатора и индуктивности рассеяния, входящие в эквивалентные схемы замещения трансформаторов.

На основании этих данных с помощью численных методов проведено моделирование процессов и рассчитано изменение величины пульсаций выходного напряжения секционированного источника питания при изменении тока нагрузки и внутренних параметров трансформатора, которые выражаются в величине напряжения короткого замыкания. На рис. 4 изображены графики изменения величины пульсации выходного напряжения ΔU_H и коэффициента пульсаций выходного напряжения K_p при изменении тока нагрузки I_H и значениях напряжения короткого замыкания $U_{кз} = 2\%, 4\%, 6\%, 8\%, 10\%$.

Как видно из рис. 4, во всем диапазоне изменения тока нагрузки уровень пульсаций и коэффициент пульсаций выходного напряжения существенно зависит от величины внутренних параметров трансформатора – активных потерь в обмотках и индуктивности рассеяния. С ростом величины активных потерь в обмотках и индуктивности рассеяния при рассчитанных параметрах трансформатора коэффициент пульсаций выходного напряжения уменьшается в три раза.

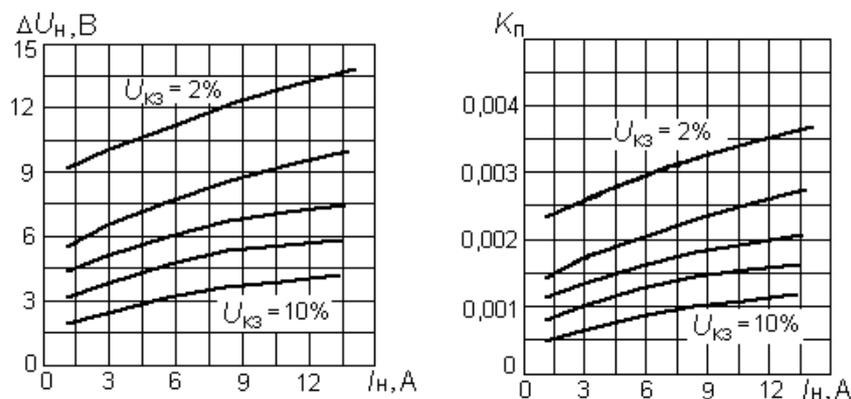


Рис. 4. Зависимость пульсаций выходного напряжения ΔU_H и коэффициента пульсаций K_p от тока нагрузки при различных значениях напряжения короткого замыкания $U_{кз}$

Особенностью работы источников питания электронно-лучевого оборудования является необходимость реагировать на дугообразование в пушке таким образом, чтобы предотвращать и не допускать его развитие. Для этой цели в источнике [2] используются шунтирующие транзисторы ТШ (ШТ), которые включены параллельно выходу каждого регулятора. Алгоритм системы управления источником выбран таким, что при возникновении дуги в пушке шунтирующие транзисторы открываются, а транзисторы регулятора ТР закрываются, что изолирует источник энергии для поддержания дуги и происходит ее гашение. Так как в процессе шунтирования выходного напряжения источника питания участвуют все N шунтирующих транзисторов в регуляторах, то возникает вопрос, как распределится выходное напряжение в случае несинхронности срабатывания этих транзисторов при их включении/выключении. Не приведет ли это к формированию избыточных напряжений на неоткрывшихся транзисторах и выходу их строя?

Для этой цели был проведен расчет электромагнитных процессов в выходных цепях источника питания с помощью численных методов моделирования пакета OrCad для случая, когда число секций $N = 3$. Напряжение на входе каждого регулятора принималось равным 2 кВ, индуктивность дросселя равной 5 мГн. Номинальный выходной ток источника – 15 А. При расчетах учитывалось наличие кабельной связи между источником и пушкой как линии со следующими распределенными параметрами: погонная индуктивность – 2 мкГн/м, погонная емкость – 500 пФ/м, погонная проводимость – 10^{-7} Сим/м, погонное сопротивление – 0,001 Ом/м, длина кабеля – 50 м.

На рис. 5, а показаны результаты моделирования в виде временных диаграмм изменения выходного тока $I_{\text{вых}}$, тока дросселя $I_{\text{др}}$ и выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ при синхронном включении шунтирующих транзисторов. Период дугообразования моделировался состоянием короткого замыкания в нагрузке с момента времени $t = 500$ мкс по $t = 700$ мкс. Как видно из диаграмм, начало периода дугообразования сопровождается прохождением так называемой обратной волны выходного тока, что характерно при скачкообразном протекании процессов в длинной линии [5]. Ток дросселя в период дугообразования меняется в заданных пределах токоограничения, выходное напряжение падает до уровня горения дуги (порядка 60 В). В период включенного состояния шунтирующих транзисторов на интервале текущего времени от 600 мкс до 800 мкс ток нагрузки становится равным нулю. С момента $t = 800$ мкс шунтирующие транзисторы закрыты и начинается экспоненциальное возрастание выходного напряжения. Расчеты показывают, что в форме выходного напряжения на этапе роста имеет место небольшое перерегулирование до уровня 6,2 кВ, что на 5% превышает номинальный уровень и может

нести угрозу приближением к уровню пробивного напряжения шунтирующих транзисторов. Исключить подобный эффект позволяет введение в схему регуляторов обратных диодов VD_O .

В таком случае создается контур протекания тока через обратный диод в конденсатор на входе регулятора, который при достаточной его энергоемкости и краткосрочности протекаемого процесса способен ограничить напряжение в том числе и на выходе регулятора. На рис. 5, б показаны диаграммы при наличии обратных диодов в регуляторах. Как видно из диаграмм, в момент времени $t = 834$ мкс, когда выходное напряжение после выключения шунтирующих транзисторов достигает номинального, открываются обратные диоды. Так как при этом ток нагрузки восстановился на номинальном уровне, а ток дросселя на этом интервале не снизился до уровня тока нагрузки, то величина тока, равная разности указанных двух токов, имеет контур для протекания через обратный диод во входной конденсатор. Соответственно, это не вызывает превышения выходного напряжения выше номинального и создает безопасный режим работы шунтирующих транзисторов после их выключения.

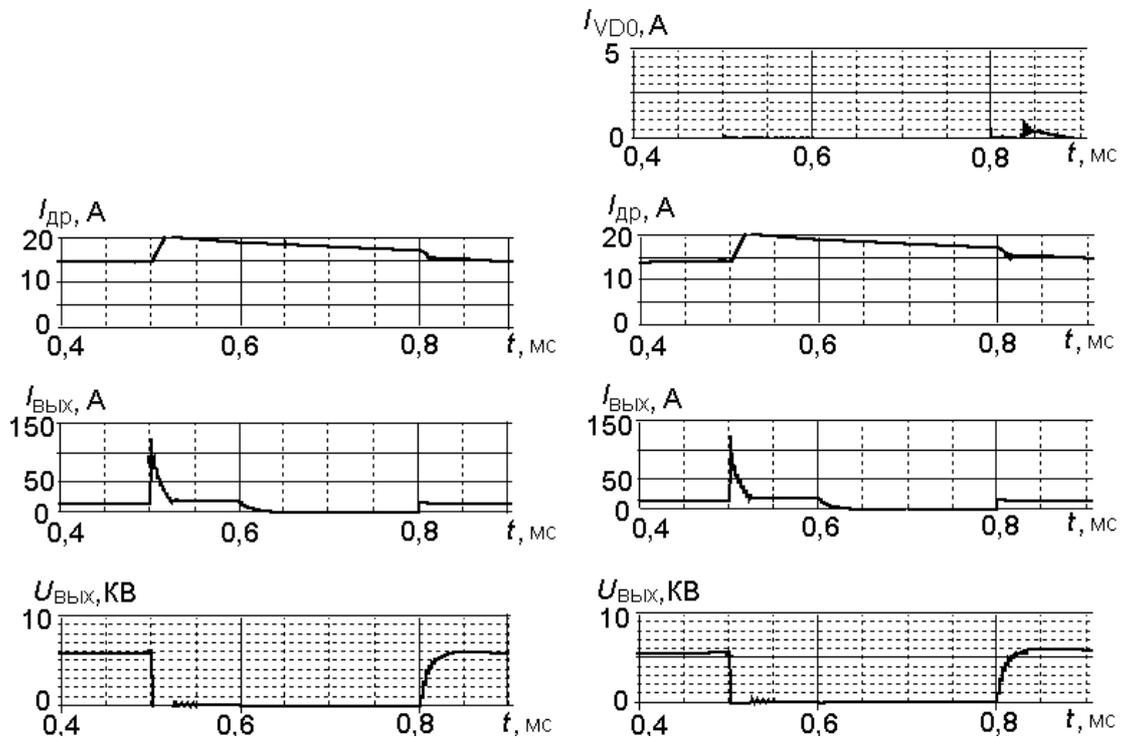


Рис. 5. Временные диаграммы процессов в выходных цепях источника при синхронном включении шунтирующих транзисторов: а – при отсутствии обратных диодов; б – при наличии обратных диодов

Рассмотрим теперь процессы, протекающие в начале интервала дугообразования. При более крупном масштабе рассмотрения (рис. 6, а) видно, что паразитные параметры кабеля задают некоторое время задержки $t_{зад} = 1,61 \mu\text{с}$ между началом дугообразования и возникновением обратной волны выходного тока. При этом, выходное напряжение источника благодаря энергии запасенной в кабеле поддерживается на номинальном уровне в течение указанного времени задержки. Какова будет ситуация, если в случае отсутствия обратных диодов в регуляторах шунтирующие транзисторы открываются в момент интервала задержки $t_{зад}$, т.е. между началом дугообразования и возникновением обратной волны выходного тока, причем - несинхронно? На рис. 6, б показаны результаты моделирования данной ситуации. В данном случае моменты включения шунтирующих транзисторов в двух регуляторах задавались равными 501 мкс, а в третьем регуляторе – 501.5 мкс. Как видно из диаграмм, выходное напряжение именно в этот период, когда третий транзистор еще не открыт, составляет величину в два раза превышающую рабочее напряжение на нем, что однозначно может вести к пробое

транзистора. Тот же алгоритм выключения шунтирующих транзисторов, как и в предыдущем случае, но при наличии обратных диодов в регуляторах, показан на диаграммах рис. 6, в. Даже при несинхронности включения шунтирующих транзисторов, выходное напряжение регулятора с более поздним включением этого транзистора не превышает номинального значения. Данный эффект наблюдается опять таки благодаря наличию контура для протекания тока через обратные диоды в конденсатор на входе регулятора, который ограничивает выходное напряжение данного регулятора. Характерный импульс тока через обратный диод виден на диаграмме рис.6,в в момент времени 501 мкс - включения шунтирующего транзистора в двух из трех регуляторов. На диаграммах также представлен идеальный вариант расчетов при наличии обратных диодов, когда шунтирующие транзисторы во всех трех регуляторах включаются синхронно в момент времени 501 мкс. – рис. 6, г. После синхронного включения всех указанных транзисторов выходное напряжение уменьшается до величины, равной падению напряжения на всех открытых шунтирующих транзисторах.

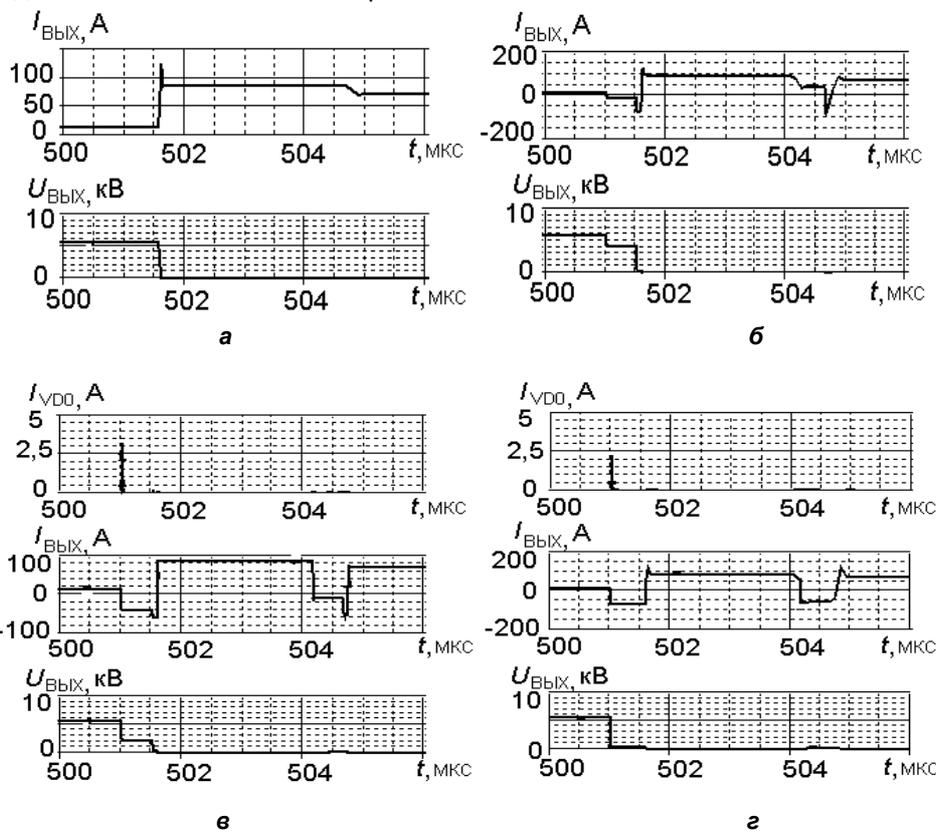


Рис. 6. Временные диаграммы процессов в выходных цепях источника в начале интервала дугообразования в нагрузке: а – вариант включения ШТ позднее интервала времени задержки $t_{зад}$; б – вариант несинхронного срабатывания ШТ в период интервала $t_{зад}$ при отсутствия обратных диодов; в – вариант несинхронного срабатывания ШТ в период интервала $t_{зад}$ при наличии обратных диодов; г - вариант синхронного срабатывания ШТ в период интервала $t_{зад}$ при наличии обратных диодов

Таким образом, как показало моделирование процессов в выходных цепях источника питания, даже при сохранении за счет накопленной энергии в кабеле выходного напряжения на исходном уровне на некоторое время задержки после загорания дуги в нагрузке, несинхронное включение шунтирующих транзисторов в регуляторах в течении этого времени при наличии обратных диодов не ведет к перенапряжениям на еще закрытых транзисторах.

Выводы

1. Наличие обратных диодов в регуляторах рассматриваемой структуры источника питания играют основную роль в предотвращении перенапряжений на шунтирующих транзисторах при срабатывании системы защиты от дугообразования в нагрузке.

2. При выборе параметров емкости конденсатора на входе регуляторов необходимо учитывать, что данный конденсатор должен обеспечивать как необходимый уровень пульсаций напряжения, так и возможность запастись достаточный уровень энергии для ограничения номинального напряжения на выходе каждой секции при дугообразовании.

3. Так как уровень пульсаций напряжения на входе регуляторов зависит от внутренних паразитных параметров трансформатора, то необходимо учитывать особенности конструкции обмоток трансформатора, способствующие уменьшению влияния этих параметров трансформатора.

Литература

1. А.С. СССР №944020. Преобразователь переменного напряжения в постоянное. Дробович Ю.И., Пономарев И.Г., Чарута В.В., Криштафович И.А., - БИ №26, - 1982.
2. Патент України № 85316. Високовольтне джерело живлення для електронно-променевого обладнання. Комаров М.С., Руденко Ю.В. – БВ №1, - 2009 .
3. Руденко Ю.В. Показатели качества электроэнергии на входе и выходе секционированного высоковольтного источника электропитания для электротехнологий // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2008. – Вип. 19. – С.99-105.
4. Трансформаторы силовые общего назначения напряжением до 35 кВ включительно / Технический справочник, часть 2, - М.: ВНИИ Стандартэлектро, 1990. – 144с.
5. Ткачев Л.Г., Батов Н.Г., Лебедев А.В., Шинкарев В.Ф. Волновые процессы в технологических установках с электронно-лучевым нагревом // Электротехника, – 1995. – № 9. – С.39–40.

¹Институт Электродинамики НАН Украины, г.Киев

²Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»