

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ/DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8>

КВАЗИРЕЗОНАНСНЫЙ ИСТОЧНИК ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ

Научная статья

Катков Е.В.^{1,*}, Щербинин С.В.²

¹ ORCID : 0009-0007-3126-557X;

² ORCID : 0000-0002-7498-3623;

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

² Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (e.v.katkov[at]urfu.ru)

Аннотация

В статье представлена конструкция высоковольтного источника питания рентгеновской трубы с регулируемым выходным напряжением от 10 до 50 кВ, рассчитанного на максимальную мощность 500 Вт. Особое внимание уделено разработке высоковольтного трансформатора для работы в квазирезонансном режиме.

Рассмотрены конструктивные особенности высоковольтного трансформатора, позволяющие повысить резонансную частоту контура, следовательно, и частоту преобразования. Проведено компьютерное моделирование силового блока в программе Micro-Cap с моделью трансформатора с ферромагнитным сердечником и с моделью трансформатора в виде эквивалентной схемы с расчетной индуктивностью намагничивания, индуктивностью рассеяния и приведенной емкостью вторичной обмотки. Описана принципиальная схема высоковольтного блока, позволяющая уменьшить пульсации высокого напряжения.

Ключевые слова: источник высокого напряжения, трансформатор, резонанс, индуктивность, емкость.

QUASI-RESONANT HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY FOR X-RAY TUBE

Research article

Katkov E.V.^{1,*}, Shcherbinin S.V.²

¹ ORCID : 0009-0007-3126-557X;

² ORCID : 0000-0002-7498-3623;

^{1,2} Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

² Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (e.v.katkov[at]urfu.ru)

Abstract

The article presents the design of a high-voltage X-ray tube power supply with an adjustable output voltage from 10 to 50 kV, designed for a maximum power of 500 W. Special attention is paid to the development of a high-voltage source transformer for operation in a quasi-resonant mode.

The paper considers the design features of a high-voltage transformer, which make it possible to increase the resonant frequency of the circuit, and therefore the conversion frequency. A computer simulation of the power unit in the Micro-Cap program has been performed with a model of a transformer with a ferromagnetic core and with a transformer model in the form of an equivalent circuit with calculated magnetization inductance, scattering inductance, and reduced secondary winding capacitance. The circuit design of a high-voltage unit is described, which makes it possible to reduce high-voltage ripples.

Keywords: high voltage source, transformer, resonance, inductance, capacitance.

Введение

При работе источника высокого напряжения в рентгеновском аналитическом оборудовании требуется не только задание высокого напряжения при максимально возможном коэффициенте полезного действия (КПД), но и обеспечение высокой стабильности параметров при минимальном уровне пульсаций напряжения [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Одним из путей повышения КПД и значительного снижения пульсаций выходного напряжения является перевод источника питания в квазирезонансный режим работы, при котором существует возможность также поднять частоту преобразования [7], [8], [9], [10]. Такой подход применим и для источников высокого напряжения с учетом ограничения частоты преобразования значительной паразитной емкостью вторичной обмотки повышающего преобразователя [11], [12].

В данной работе представлена разработка полумостового преобразователя напряжения с целью объединить паразитные параметры силового повышающего трансформатора (индуктивность рассеяния первичной обмотки и емкость вторичной обмотки) в резонансный контур, позволяющий работать в квазирезонансном режиме.

Методы и принципы исследования

Модель полумостового преобразователя с резонансным контуром, образованным индуктивностью рассеяния и емкостью вторичной обмотки повышающего трансформатора, представлена на рисунке 1.

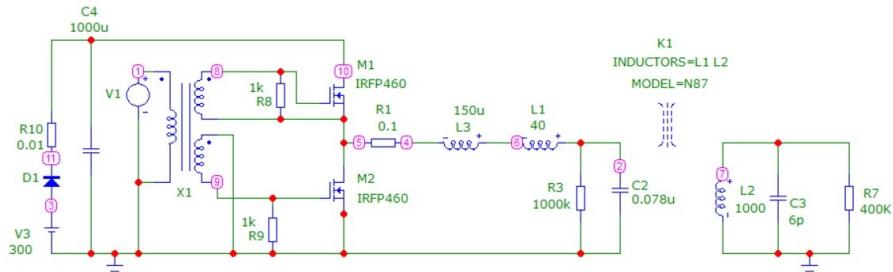


Рисунок 1 - Модель повышающего полумостового преобразователя
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8.1>

В данной модели меандр амплитудой 15 В и частотой 50 кГц от генератора V_1 поступает на затворы полевых транзисторов M_1 и M_2 с противоположными фазами. В результате транзисторы открываются поочередно, перезаряжая емкость C_2 с амплитудой 150 В от накопительного конденсатора C_4 , заряженного до 300 В от источника напряжения V_3 . Ток емкости протекает через первичную обмотку повышающего трансформатора L_1 , содержащую 40 витков, и индуктивность рассеяния трансформатора L_3 , составляющую 150 мкГн.

Величина индуктивности рассеяния измеряется на реальном повышающем трансформаторе методом замыкания вторичной обмотки. Обмотки трансформатора наматываются на керны П-образного сердечника из феррита N87. Площадь поперечного сечения магнитопровода составляет 1,89 см², средняя длина магнитной линии — 18,8 см, толщина немагнитного зазора между П-образными половинами сердечника равна 0,1 мм.

Вторичная обмотка повышающего трансформатора содержит 1000 витков. Емкость вторичной обмотки равна 6 пФ. Нагрузкой в данной модели служит резистор R_7 , равный 400 кОм. В реальном источнике высокого напряжения нагрузкой служит умножитель напряжения, содержащий 16 секций умножения и высокоомный резистор, подключенный к выходу умножителя.

При подаче импульсов на первичную обмотку повышающего трансформатора в ней за счет индуктивности рассеяния и паразитной емкости вторичной обмотки возникают колебания высокой частоты, которые следует учитывать при проектировании и создании квазирезонансного преобразователя напряжения. Пример получения графиков в среде моделирования Micro-Cap, где предварительно перед экспериментами осуществлялись необходимые расчеты и построения, представлен на рисунке 2.

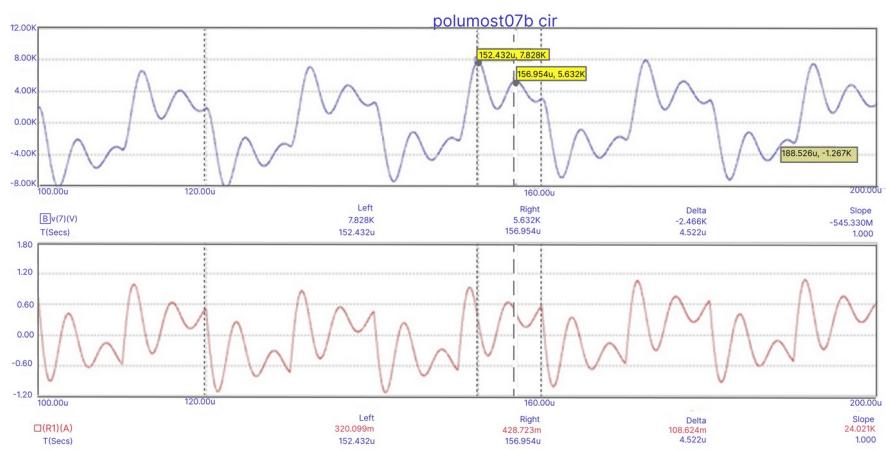


Рисунок 2 - Напряжение на вторичной обмотке (сверху) и ток через первичную обмотку трансформатора (снизу)
при величине индуктивности рассеяния 150 мкГн
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8.2>

Для возникновения резонанса необходимо, чтобы частота колебательного контура (индуктивность рассеяния первичной обмотки, паразитная емкость вторичной обмотки и емкость C_2) совпала с частотой преобразования источника.

Частоту колебаний f_0 можно определить следующим образом:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_p}}, \quad (1)$$

$$C_p = \left(\frac{1}{C_{VT}} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C'_3} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где L_s — индуктивность рассеяния, C_{VT} — емкость сток-исток полевых транзисторов, C_2 — емкость резонансного контура (рисунок 1), $C_3' = C_3 \cdot n^2$ — приведенная к первичной обмотке емкость C_3 , $n = 25$ — коэффициент трансформации, C_3 — паразитная емкость вторичной обмотки трансформатора (рисунок 1).

При величине индуктивности рассеяния 150 мГн период паразитных колебаний составляет 4,52 мкс, соответственно, резонансная частота равна 221 кГц, что согласуется с расчетной формулой. При увеличении индуктивности рассеяния амплитуда колебаний падает с 5,36 кВ до 3,56 кВ, частота также уменьшается с 221 кГц до 172 кГц, что согласуется с расчетами и позволяет оптимально выбирать частоту преобразования при изменениях индуктивности рассеяния, емкости вторичной обмотки трансформатора и емкости резонансного контура C_2 .

Методика проведения экспериментов

Для экспериментального определения частоты преобразования квазирезонансного режима, при которой произойдет коммутация мощных транзисторов при переходе тока первичной обмотки трансформатора через ноль, соберем высоковольтный блок, состоящий из двух высоковольтных трансформаторов, аналогичных модели. Полумостовая схема, использующаяся в реальном источнике высокого напряжения, представлена на рисунке 3.

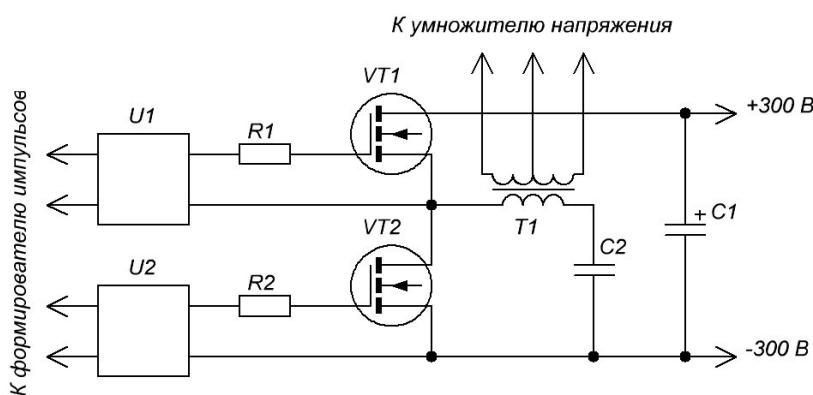


Рисунок 3 - Полумостовая схема реального высоковольтного источника, собранного в лаборатории
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8.3>

В источнике первичные обмотки трансформаторов соединим параллельно, а вторичные подключим к симметричному умножителю напряжения из 16 ступеней (рисунок 4). Трансформаторы и умножитель напряжения поместим в резервуар с трансформаторным маслом (рисунок 5). Выход умножителя напряжения подключим к сопротивлению нагрузки 20 МОм, составленному из последовательно-параллельного соединения 16 высоковольтных резисторов по 5 МОм, 10 Вт, помещенных в трансформаторное масло (рисунок 6). Отметим, что в рентгеновском оборудовании нагрузкой будет служить сама рентгеновская трубка.

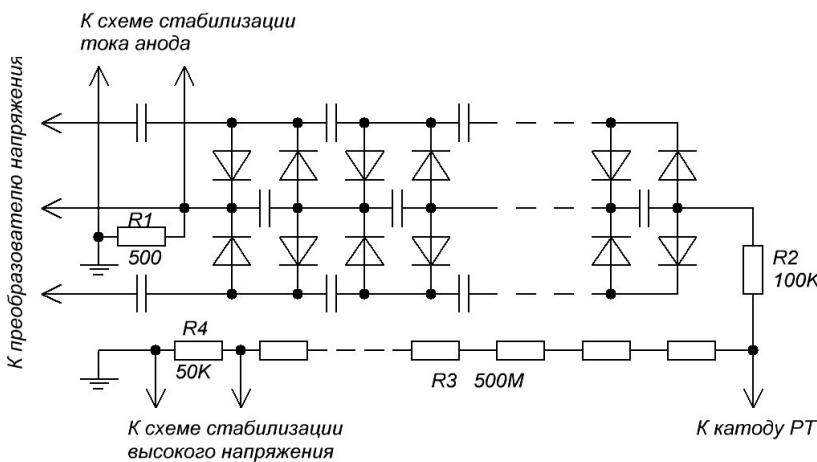


Рисунок 4 - Схема умножителя напряжения
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8.4>

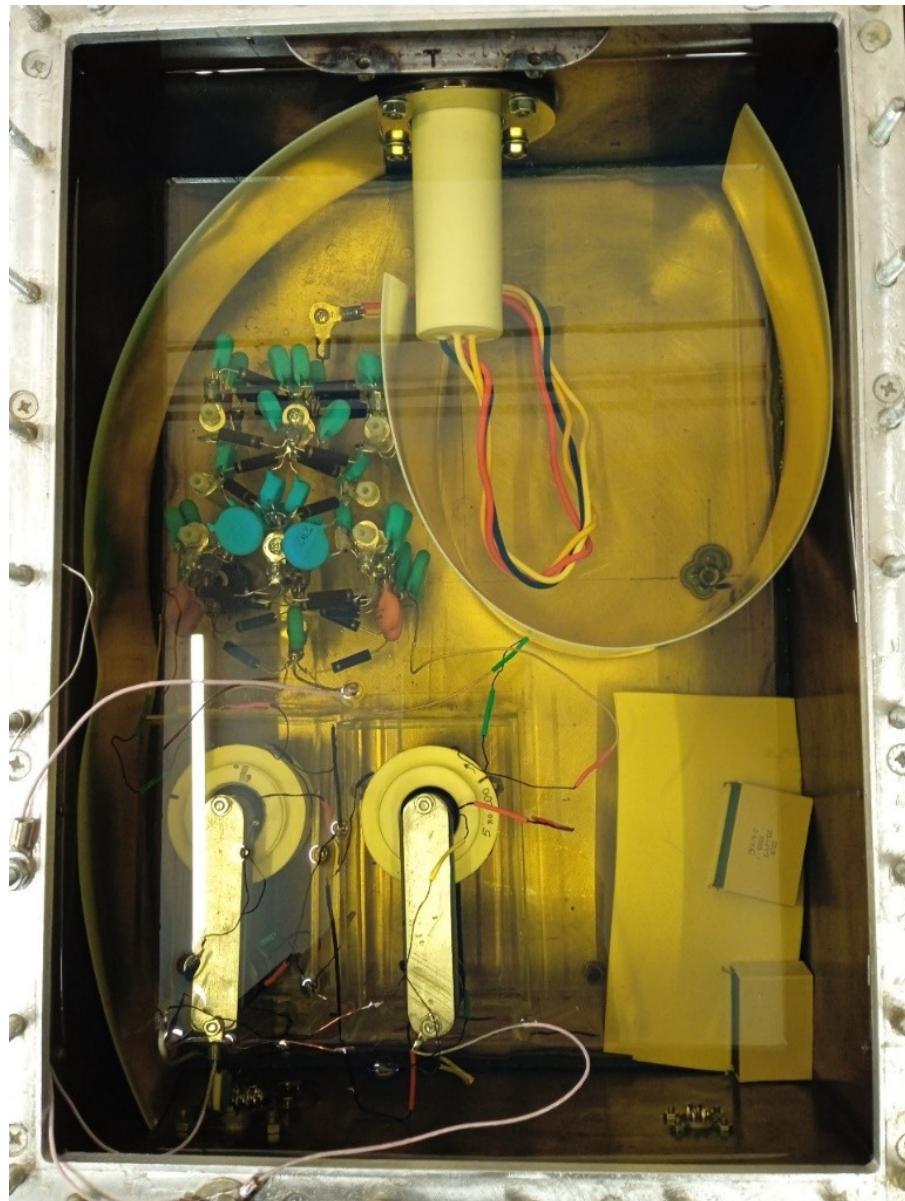


Рисунок 5 - Трансформаторы и умножитель напряжения в реальном источнике
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8.5>



Рисунок 6 - Высоковольтные резисторы в качестве нагрузки в реальном источнике
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8.6>

Регистрацию тока первичной обмотки высоковольтного трансформатора осуществим с помощью трансформатора тока PE-51867NL, соединенного с осциллографом Tektronix TDS1012 (рисунок 7), а измерение высокого напряжения — с помощью цифрового вольтметра В7-40/4 с выносным делителем напряжения, помещенным в трансформаторное масло. Для вычисления КПД входной ток сети определим с помощью стрелочного амперметра переменного тока Э8030-М1.

Отметим, что индуктивность рассеяния первичной обмотки высоковольтного трансформатора в ходе экспериментов изменяется благодаря использованию частей первичной обмотки, намотанных на разные керны сердечника (рисунок 8).

Рисунок 7 - Осциллограф (сверху) и киловольтметр (снизу), использующиеся в экспериментах
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8.7>

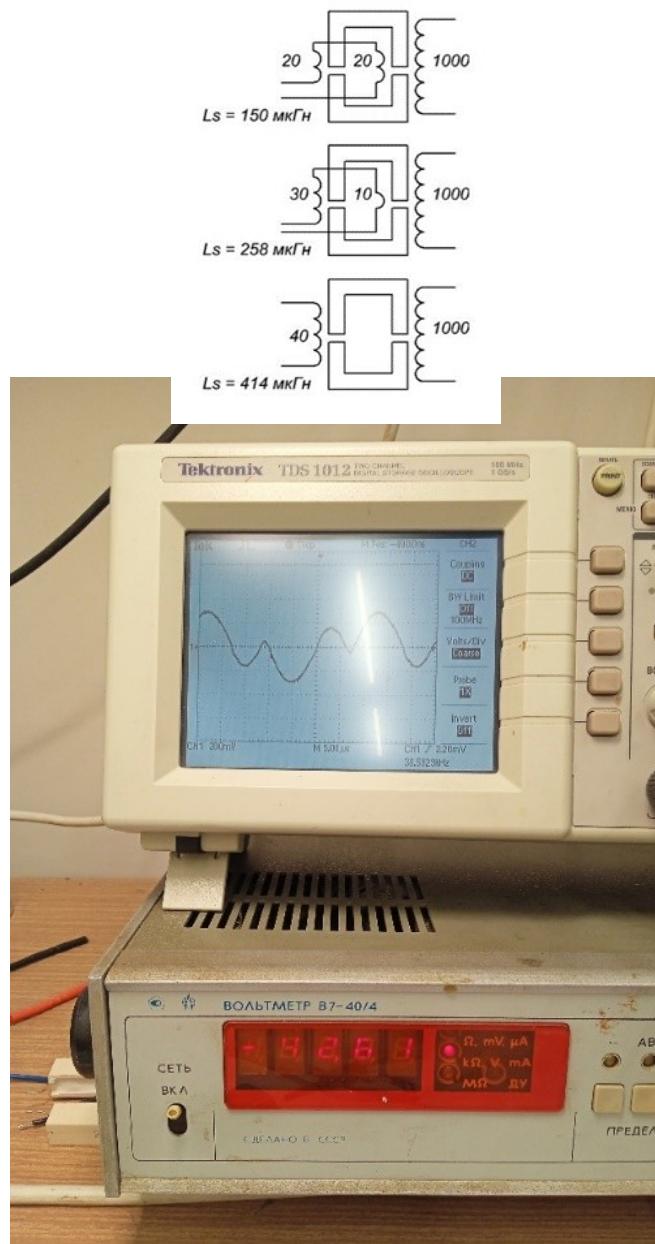


Рисунок 8 - Изменение индуктивности рассеяния первичной обмотки трансформатора
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8.8>

При намотке 40 витков на один керн сердечника трансформатора индуктивность рассеяния составляет 414 мГн. При намотке 30 витков на один керн и 10 витков на другой индуктивность рассеяния составляет 258 мГн. При намотке 20 витков на один керн и 20 витков на другой индуктивность рассеяния составляет 150 мГн. Соотношение между количеством витков первичной и вторичной обмоток всегда остается постоянным, то есть 1:25.

Основные результаты

В ходе экспериментов обнаружено, что оптимальная величина индуктивности рассеяния составляет 150 мГн, поскольку при меньших величинах резонансная частота становится слишком высокой для данного метода, а при больших величинах индуктивности рассеяния максимальное выходное напряжение источника падает значительно ниже 50 кВ.

Кроме этого, установлено, что на частотах ниже 20 кГц высоковольтный блок обладает приемлемым коэффициентом полезного действия, но работает в режиме жесткого переключения мощных транзисторов полумостовой схемы, сопровождаемого бросками напряжения, которые создают значительные помехи при применении высоковольтного источника для питания рентгеновской трубы в аналитическом оборудовании.

Повышение частоты преобразования до 221 кГц или до 172 кГц невозможно из-за потерь в паразитной емкости вторичной обмотки высоковольтного трансформатора.

Однако возможно повышение рабочей частоты практически в два раза по сравнению с обычной полумостовой схемой преобразователя, где переключение транзисторов происходит независимо от фазы тока и частота преобразования чаще всего составляет 20 кГц.

Итак, в нашем источнике высокого напряжения резонанс наблюдается на частотах 40 кГц или 42 кГц в зависимости от емкости резонансного контура C_2 . Результаты экспериментов при емкости резонансного контура $C_2 = 0,078 \text{ мкФ}$, образованной двумя параллельно соединенными конденсаторами, представлены на рисунке 9. Результаты экспериментов при суммарной емкости трех конденсаторов $C_2 = 0,117 \text{ мкФ}$ — на рисунке 10.

На графиках (рисунки 9, 10) представлены зависимости выходного напряжения высоковольтного источника от частоты преобразования при значениях рабочего цикла 1/10 (кривая 1), 1/7 (кривая 2) и 1/5 (кривая 3). При значении рабочего цикла 1/5 мощность, рассеиваемая в сопротивлении нагрузки, наибольшая из рассматриваемых, поэтому график КПД (кривая 4) относится к рабочему циклу, равному 1/5. Отметим, что значение рабочего цикла регулируется с помощью генератора на микроконтроллере ATMega16.

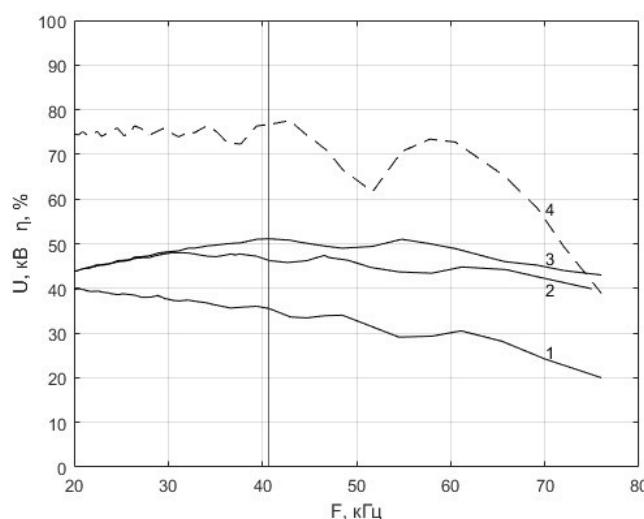


Рисунок 9 - Зависимость выходного напряжения (кривые 1, 2, 3) и КПД (4) от частоты преобразования при $C_2 = 0,078 \text{ мкФ}$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8.9>

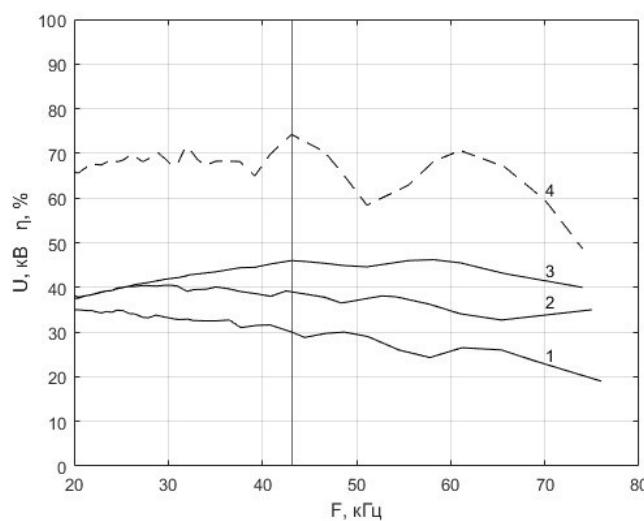


Рисунок 10 - Зависимость выходного напряжения (кривые 1, 2, 3) и КПД (4) от частоты преобразования при $C_2 = 0,117 \text{ мкФ}$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8.10>

На графиках отчетливо прослеживается резонансное повышение КПД до 75% и выходного напряжения на частотах преобразования около 40 кГц (рисунок 9) и 42 кГц (рисунок 10) за счет квазирезонансного режима работы преобразователя высокого напряжения.

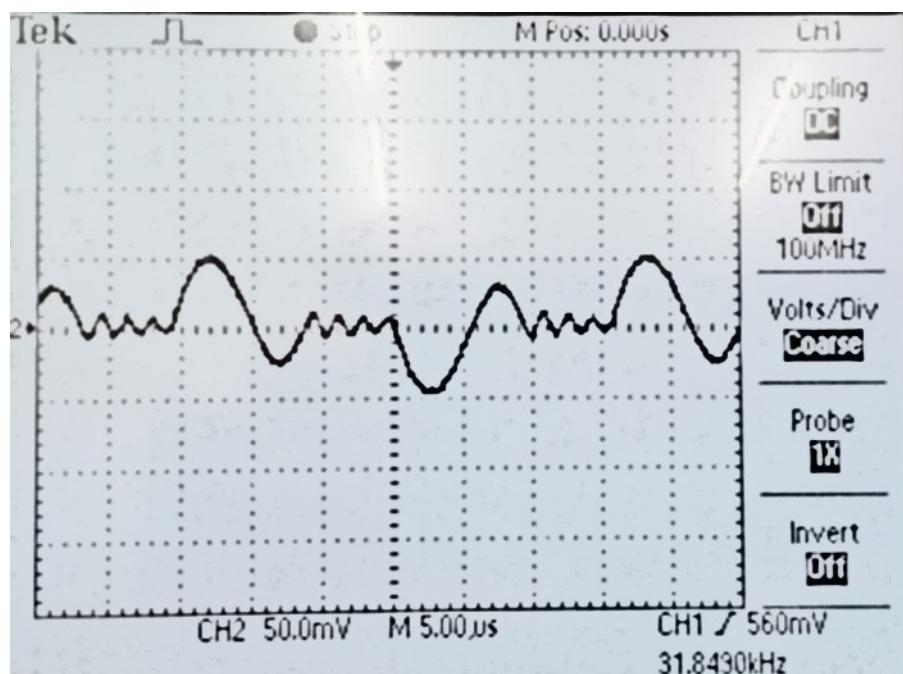


Рисунок 11 - Осциллограммы тока через первичную обмотку высоковольтного трансформатора при $C_2 = 0,078 \text{ мкФ}$ и $F = 31,8 \text{ кГц}$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8.11>

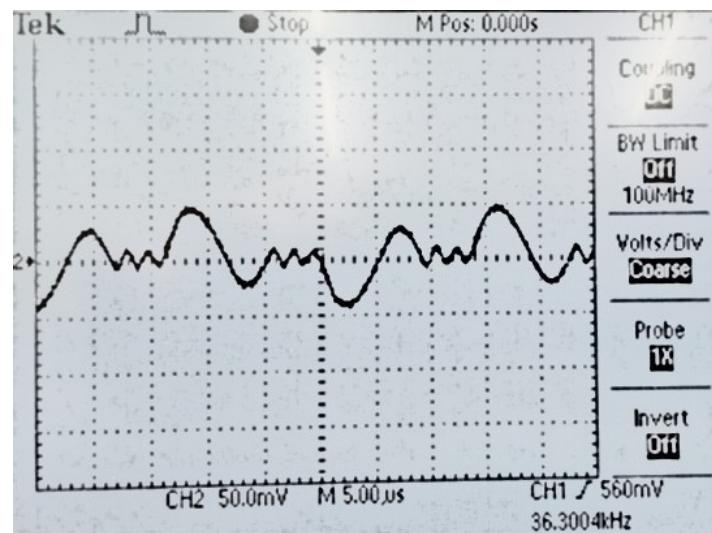


Рисунок 12 - Осциллографмы тока через первичную обмотку высоковольтного трансформатора при $C_2 = 0,078 \text{ мкФ}$ и $F = 36,3 \text{ кГц}$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8.12>

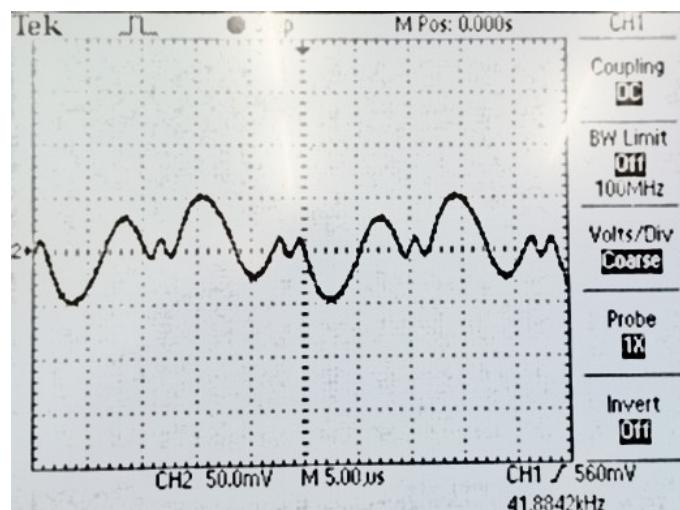


Рисунок 13 - Осциллографмы тока через первичную обмотку высоковольтного трансформатора при $C_2 = 0,078 \text{ мкФ}$ и $F = 41,9 \text{ кГц}$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8.13>

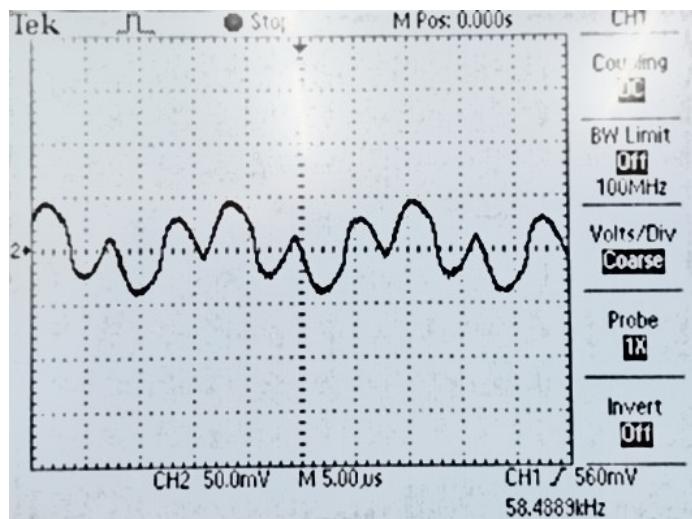


Рисунок 14 - Осциллографмы тока через первичную обмотку высоковольтного трансформатора при $C_2 = 0,078 \text{ мкФ}$ и $F = 58,5 \text{ кГц}$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.8.14>

Для демонстрации на рисунках 11–14 представлены осциллографмы тока через первичную обмотку высоковольтного трансформатора на частотах, при которых преобразователь работает в квазирезонансном режиме ($C_2 = 0,078 \text{ мкФ}$).

Важно, что транзисторы преобразователя переключаются при нулевом токе, а сама форма тока стремится к синусоидальной. Благодаря этому потери при коммутации транзисторов и закрывании обратных диодов уменьшаются, следовательно, уменьшаются помехи на выходе и обеспечивается минимальный уровень пульсаций выходного напряжения.

Отметим, что колебания в контуре затухают за счет передачи энергии в нагрузку и за счет несущественных потерь. В квазирезонансном режиме получается осуществить переключение транзисторов при переходе тока через ноль уже при затухающих колебаниях гораздо меньшей амплитуды. Источник питания отдает часть энергии в нагрузку, а колебательный контур всегда оказывается нагружен.

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что работа полумостового преобразователя высокого напряжения в квазирезонансном режиме позволяет:

- повысить частоту преобразования практически в 2 раза по сравнению с обычной полумостовой схемой;
- увеличить КПД источника высокого напряжения до 75%;
- снизить уровень пульсаций выходного напряжения.

Полученные результаты будут крайне полезны в источниках для получения рентгеновского излучения.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Блохин М.А. Физика рентгеновских лучей / М.А. Блохин. — Москва: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1957. — 518 с.
2. Вольдсет Р. Прикладная спектрометрия рентгеновского излучения / Р. Вольдсет. — Москва: Атомиздат, 1977. — 192 с.
3. Румянцев С.В. Радиационная дефектоскопия / С.В. Румянцев. — Санкт-Петербург: Атомиздат, 1974. — 512 с.
4. Рентгенотехника: справочник: в 2 кн. / под общ. ред. В.В. Клюева. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Машиностроение, 1992.
5. Блинов Н.Н. Рентгеновские питающие устройства / Н.Н. Блинов. — Москва: Энергия, 1980. — 200 с.
6. Блинов Н.Н. Рентгеновские диагностические аппараты: в 2 т.; / Н.Н. Блинов, Б.И. Леонов. — Москва: ВНИИИМТ : Экран, 2001. — Т. 1. — 220 с.
7. Lee F.C. High-frequency quasi-resonant converter technologies. / F.C. Lee // Proceedings of the IEEE. — 1988. — Vol. 76, №4. — P. 377–390. — DOI: 10.1109/5.4424

8. Steigerwald R.L. A comparison of half-bridge resonant converter topologies. / R.L. Steigerwald // IEEE Transactions on Power Electronics. — 1988. — Vol. 3, №2. — P. 174–182. — DOI: 10.1109/APEC.1987.7067142
9. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование / М. Браун ; пер. с англ. С.Л. Попова. — Киев: МК-Пресс, 2007. — 288 с.
10. Mohan N. Power Electronics. Converters, Applications, and Design / N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins. — 3rd edition. — Hoboken: NJ : John Wiley & Sons, 2003. — 802 p.
11. Бал'ян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники / Р.Х. Бал'ян. — Москва: Советское радио, 1971. — 720 с.
12. Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов / С.С. Вдовин. — Ленинград: Энергия, 1971. — 148 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Blokhin M.A. Fizika rentgenovskikh luchei [Physics of X-rays] / M.A. Blokhin. — Moscow: State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1957. — 518 p. [in Russian]
2. Vol'dset R. Prikladnaya spektrometriya rentgenovskogo izlucheniya [Applied X-ray spectrometry] / R. Vol'dset. — Moscow: Atomizdat, 1977. — 192 p. [in Russian]
3. Rumyancev S.V. Radiacionnaya defektoskopiya [Radiation flaw detection] / S.V. Rumyancev. — Saint Petersburg: Atomizdat, 1974. — 512 p. [in Russian]
4. Rentgenotekhnika: spravochnik: v 2 kn. [X-ray engineering: a reference book: in 2 vol.] / edited by V.V. Klyuev. — 2nd. edition, revised and add. — Moscow: Mashinostroenie, 1992. [in Russian]
5. Blinov N.N. Rentgenovskie pitayushchie ustrojstva [X-ray feeding devices] / N.N. Blinov. — Moscow: Energiya, 1980. — 200 p. [in Russian]
6. Blinov N.N. Rentgenovskie diagnosticheskie apparaty' [X-ray diagnostic devices]: in 2 vol.; / N.N. Blinov, B.I. Leonov. — Moscow: VNIIIMT : E'kran, 2001. — Vol. 1. — 220 p. [in Russian]
7. Lee F.C. High-frequency quasi-resonant converter technologies. / F.C. Lee // Proceedings of the IEEE. — 1988. — Vol. 76, №4. — P. 377–390. — DOI: 10.1109/5.4424
8. Steigerwald R.L. A comparison of half-bridge resonant converter topologies. / R.L. Steigerwald // IEEE Transactions on Power Electronics. — 1988. — Vol. 3, №2. — P. 174–182. — DOI: 10.1109/APEC.1987.7067142
9. Brown M. Power sources. Calculation and construction / M. Brown ; translated from english by S.L. Popov. — Kiev: MK-Press, 2007. — 288 p. [in Russian]
10. Mohan N. Power Electronics. Converters, Applications, and Design / N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins. — 3rd edition. — Hoboken: NJ : John Wiley & Sons, 2003. — 802 p.
11. Bal'yan R.X. Transformatory' dlya radioelektroniki [Transformers for radio electronics] / R.X. Bal'yan. — Moscow: Sovetskoe radio, 1971. — 720 p. [in Russian]
12. Vdovin S.S. Proektirovanie impul'snyx transformatorov [Design of pulse transformers] / S.S. Vdovin. — Leningrad: Energiya, 1971. — 148 p. [in Russian]