

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ИНФРАСТРУКТУРА И ТРАНСПОРТ

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Статья поступила в редакцию: 14.08.2026

Статья принята к публикации: 20.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 621.385.6+621.372.8

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23330

**Исследование энергетической эффективности и гармонического анализа
анодного тока магнетронного генератора в установках микроволнового
нагрева с помощью программы LTSPICE**

Гулиева Аделя Адемовна

преподаватель кафедры

Электроника и энергетика, Нахчыванский Государственный Университет

Азербайджанская Республика, г. Нахчывань

ORCID ID: 0009-0004-7405-3049

E-mail: adilebeyova@gmail.com

Гардашбекова Наиля Адемовна

доц. кафедры Физика, Нахчыванский государственный университет

Азербайджанская Республика, г. Нахчывань

ORCID ID: 0000-0002-0191-9428

E-mail: naileqardashbekova@gmail.com

**Investigation of energy efficiency and harmonic analysis of the anode current of
a magnetron generator in microwave heating systems using LTSPICE**

Guliyeva Adela Ademovna

lecturer

Department of Electronics and Power Engineering, Nakhchivan State University

Azerbaijan, Nakhchivan

Gardashbekova Naila Ademovna

Associate Professor

Department of Physics, Nakhchivan State University

Azerbaijan, Nakhchivan

Аннотация

В статье исследуются энергетическая эффективность и гармонический состав анодного тока магнетронного генератора, применяемого в системах микроволнового нагрева, с использованием программной среды LTspice. Целью исследования является моделирование высоковольтной цепи питания магнетрона, анализ переходных процессов анодного напряжения и тока, а также количественная оценка гармонических искажений при изменении режима нагрузки. В рамках исследования смоделированы трансформатор, диодно-конденсаторный выпрямительный узел и цепь питания магнетрона. Для анализа спектрального состава анодного тока применен метод быстрого преобразования Фурье (БПФ), на основе которого определены основные гармонические компоненты и коэффициент суммарных гармонических искажений (THD). Результаты моделирования показали импульсный характер тока в высоковольтной цепи и наличие выраженных высших гармоник, обусловленных нелинейностью элементов схемы. Полученное значение THD составило 58,98 %, что свидетельствует о существенном уровне нелинейных искажений. Установлено, что изменение параметров нагрузки влияет на амплитуду анодного тока и гармонический состав, что может приводить к дополнительным энергетическим и тепловым потерям. Предложенный подход может быть использован для анализа, мониторинга и оптимизации режимов работы магнетронных генераторов, повышения их энергетической эффективности и обеспечения электромагнитной совместимости микроволновых установок.

Abstract

The article investigates the energy efficiency and harmonic composition of the anode current of a magnetron generator used in microwave heating systems using the LTspice simulation environment. The aim of the study is to model the high-voltage power supply circuit of the magnetron, analyze the transient processes of the anode voltage and current, and quantitatively evaluate harmonic distortions under varying load conditions. Within the framework of the study, the transformer, diode-capacitor rectifier unit, and magnetron power supply circuit were modeled. The Fast Fourier Transform (FFT) method was applied to analyze the spectral composition of the anode current, based on which the main harmonic components and the Total Harmonic Distortion (THD) were determined. The simulation results demonstrated the pulsed nature of the current in the high-voltage circuit and the presence of pronounced higher-order harmonics caused by the nonlinear characteristics of the circuit elements. The obtained THD value was 58.98 %, indicating a significant level of nonlinear distortion. It was established that variations in load parameters affect the amplitude and harmonic composition of the anode current, which may lead to additional energy and thermal losses. The proposed approach can be used for the analysis, monitoring, and optimization of magnetron generator operating modes, improving their energy efficiency, and ensuring electromagnetic compatibility in microwave heating systems.

Библиографическое описание: Гулиева А.А., Гардашбекова Н.А. Исследование энергетической эффективности и гармонического анализа анодного тока магнетронного генератора в установках микроволнового нагрева с помощью программы LTSPICE // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23330>

Ключевые слова: LTspice, магнетрон, микроволновой нагрев, анализ БПФ, гармонические искажения (THD), энергетическая эффективность, анодный ток.

Keywords: LTspice, magnetron, microwave heating, FFT analysis, harmonic distortion (THD), energy efficiency, anode current.

1. Введение

Технология микроволнового нагрева в последние годы нашла широкое применение в различных производственных областях, например таких, как пищевая промышленность, медицина, химия и материаловедение. Основными преимуществами этой технологии являются высокая эффективность преобразования энергии, равномерный нагрев материала по всему объему и точное управление процессом [10]. Для надежной и эффективной работы магнетронного генератора, являющегося основным источником микроволновой энергии, критически важно правильное построение его высоковольтной системы питания и оптимальное согласование с параметрами нагрузки. Изменение режима нагрузки может повлиять на электрические параметры цепи питания, приводя к снижению выходной мощности генератора, росту гармонических искажений и возникновению дополнительных потерь энергии.

В современных инженерных исследованиях наряду с экспериментальными методами широкое применение находят компьютерное моделирование и методы симуляции. В частности, программные пакеты на базе SPICE, включая LTspice, считаются надежными инструментами для моделирования силовой электроники и нелинейных электрических цепей, а также для анализа переходных процессов и гармонического состава. LTspice позволяет исследовать различные режимы работы сложных электрических цепей за короткое время и с высокой точностью, а также снизить объем и стоимость лабораторных испытаний [8].

В существующих исследованиях особенности высоковольтных систем питания магнетронных генераторов изучались преимущественно экспериментальными методами. Тем не менее количество работ, посвященных комплексной оценке в программной среде LTspice переходных процессов цепи питания, гармонического состава анодного тока и энергетической эффективности при различных режимах нагрузки, ограничено [1]. В связи с этим изучение гармонических характеристик и энергетических показателей цепи питания на основе компьютерного моделирования представляется актуальным как с научной, так и с практической точек зрения [9].

Научная новизна данного исследования заключается в том, что высоковольтная цепь питания магнетронного генератора, применяемого в системах микроволнового нагрева, была комплексно смоделирована в среде LTspice, а переходные процессы и гармонический состав анодного тока оценены посредством анализа БПФ [12]. Впервые на основе единой модели симуляции проанализировано влияние изменения параметров нагрузки на коэффициент гармонических искажений (THD) и энергетическую эффективность, а полученные результаты оценены с точки зрения оптимизации режима работы магнетронного генератора и снижения потерь энергии.

Основная цель состоит в моделировании высоковольтной схемы питания магнетронного генератора в среде LTspice, анализе переходных процессов, оценке гармонического состава анодного тока с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) и определении влияния изменения параметров нагрузки на энергетическую эффективность. Результаты исследования имеют практическую значимость с точки зрения оптимизации режимов работы магнетронных генераторов в системах микроволнового нагрева, снижения гармонических искажений и повышения энергетической эффективности [13].

2. Материалы и методы

Магнетрон представляет собой вакуумный электронный прибор, генерирующий высокочастотные электромагнитные волны, и считается основным источником энергии в системах микроволнового нагрева [4]. Он преобразует электрическую энергию в микроволновое излучение с частотой около 2,45 ГГц, которое используется в различных промышленных и бытовых применениях. Поскольку эта частота относится к диапазону промышленных, научных и медицинских (ISM) применений, она широко используется в установках микроволнового нагрева [18].

К основным конструктивным элементам магнетрона относятся катод, анод, резонаторные полости, постоянный магнит и антенна [6]. При нагреве катода за счет термоэлектронной эмиссии испускаются электроны. Высокое напряжение, создаваемое между анодом и катодом, обеспечивает движение электронов в направлении анода. В то же время магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом, искривляет траекторию электронов, способствуя их спиралевидному движению. В результате взаимодействия электронов с резонаторными полостями возникают высокочастотные электромагнитные колебания, и эта энергия через антенну передается в волновод или микроволновую камеру [15].

Для обеспечения нормального режима работы магнетрона на анодную цепь обычно подается высокое постоянное напряжение порядка 3–4 кВ. Во время работы анодный ток в зависимости от типа магнетрона и условий нагрузки изменяется в интервале примерно 300–500 мА. Эти параметры считаются ключевыми показателями, определяющими выходную мощность генератора и эффективность преобразования энергии [17].

Выходная мощность магнетрона в зависимости от анодного напряжения, анодного тока и коэффициента полезного действия выражается следующей формулой:

$$P_{out} = \eta U_A I_A$$

где:

P_{out} — выходная мощность магнетрона, Вт;

U_A — анодное напряжение, В;

I_A — анодный ток, А;

η — коэффициент полезного действия магнетрона.

В магнетронах бытового и промышленного назначения коэффициент полезного действия изменяется в пределах примерно 0,65–0,75 (65–75 %). Это означает, что 65–75 % электрической энергии, получаемой от источника питания, преобразуется в микроволновую энергию, а оставшаяся часть теряется в виде тепловых потерь и других внутренних энергозатрат [19].

3. Результаты и обсуждение

Энергетическая эффективность магнетрона зависит не только от напряжения питания, но и от согласования нагрузки и уровня отражения микроволновой энергии [18]. Неправильное согласование нагрузки приводит к увеличению отраженной мощности, изменению формы анодного тока, повышению уровня гармоник и, как следствие, к снижению коэффициента полезного действия генератора. По этой причине мониторинг режима работы магнетрона на основе анодного тока и напряжения имеет важное значение для надежной и эффективной эксплуатации промышленных установок микроволнового нагрева [12].

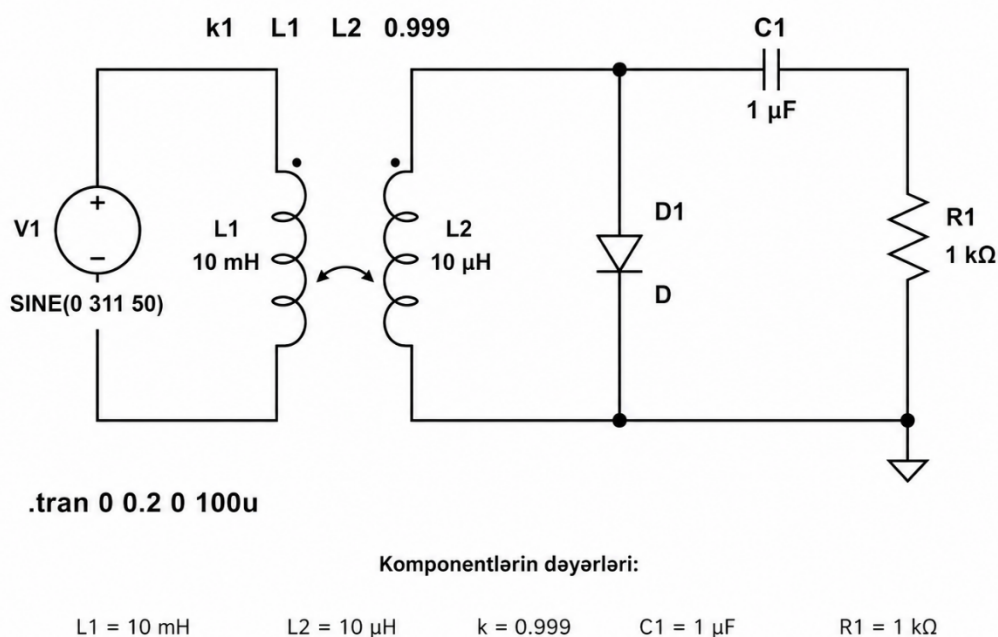


Рисунок 1. Общая схематическая модель высоковольтной цепи питания магнетрона в программной среде LTspice

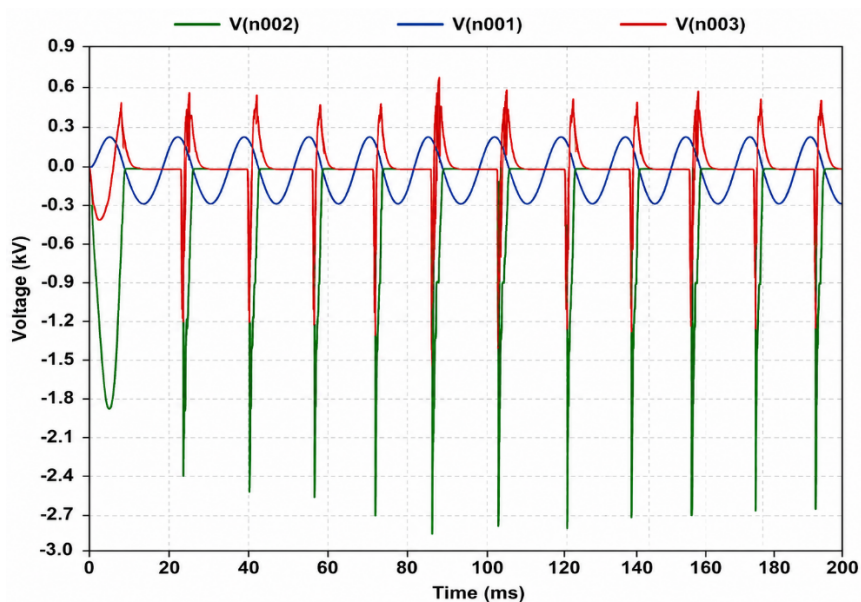


Рисунок 2. Схема замещения входных и выходных элементов трансформатора и блока питания

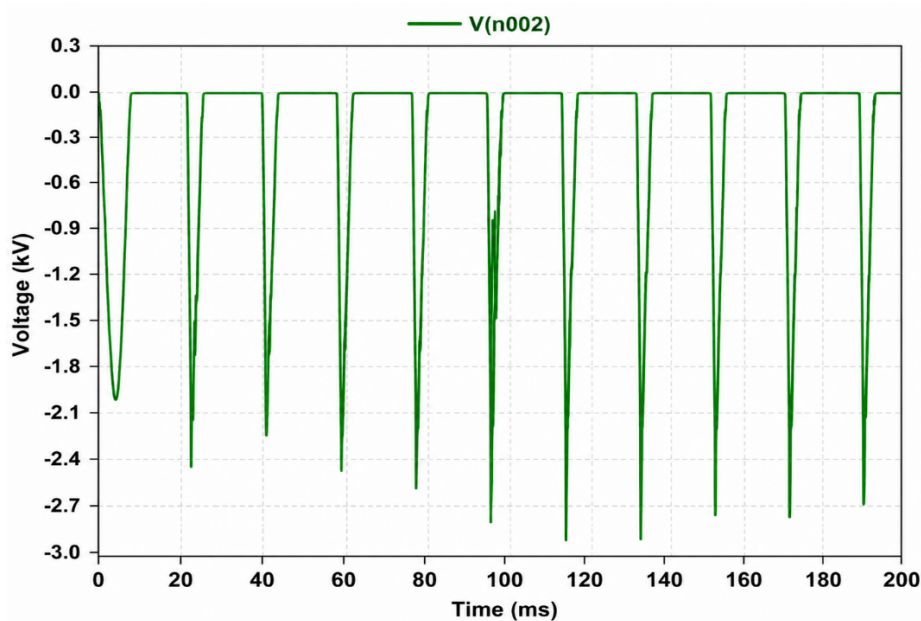


Рисунок 3. Общий графический вид переходных процессов цепи питания в программе LTspice. (Результаты симуляции переходного процесса высоковольтной цепи питания магнетрона в программе LTspice: синий — переменное выходное напряжение трансформатора; красный и зеленый — импульсы напряжения, возникающие под действием диода и конденсатора)

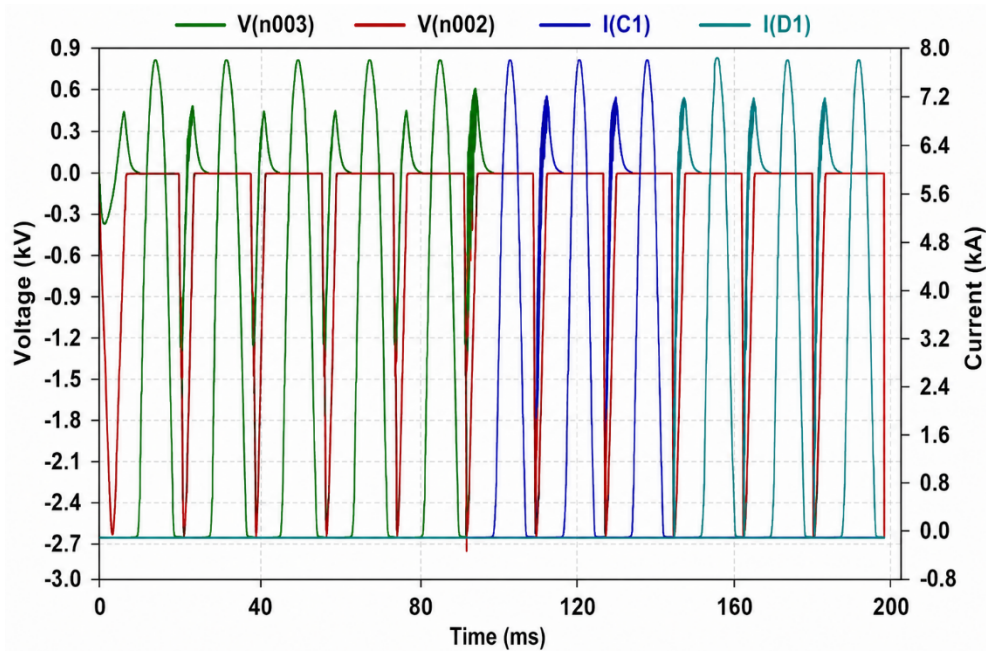


Рисунок 4. График изменения переменного напряжения второй обмотки трансформатора во времени

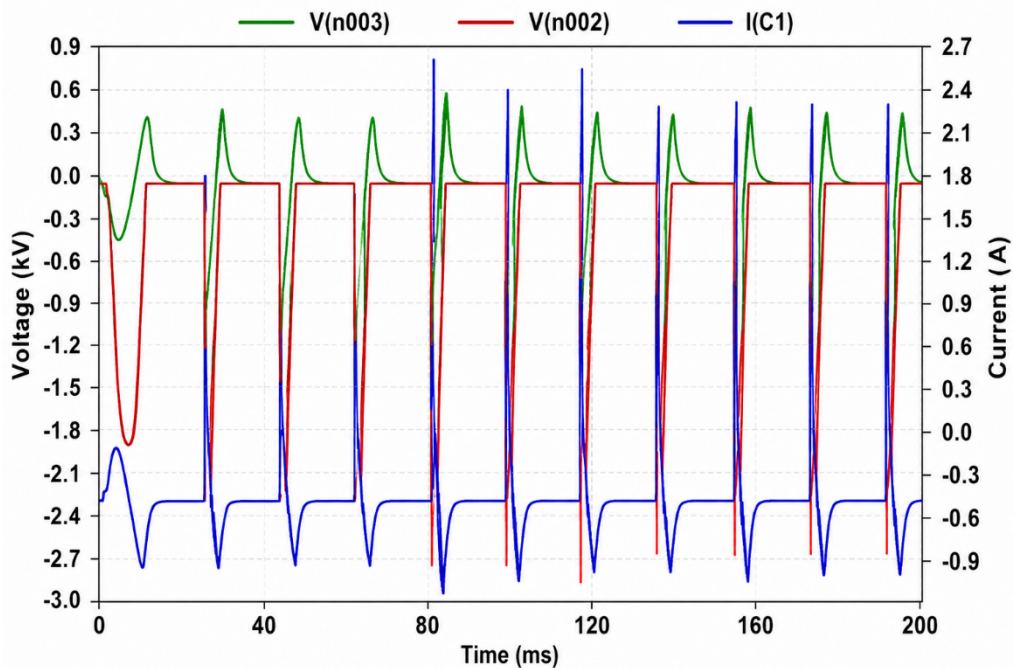


Рисунок 5. Динамика формирования напряжения в диодно-конденсаторном узле

Рассматривая результаты симуляции переходных процессов высоковольтной цепи питания магнетрона в программе LTspice, на рисунке показаны напряжение второй обмотки трансформатора (зеленый), высокое напряжение, образующееся в диодно-конденсаторном узле (красный), и ток через конденсатор (синий). Согласно результатам симуляции, конденсатор заряжается только тогда, когда диод находится в проводящем состоянии, и в этот момент возникают кратковременные импульсы тока. Максимальное отрицательное напряжение в цепи составляет около -2.7 кВ , что согласуется с принципом высоковольтного питания магнетрона [19].

В то же время результаты проведенной симуляции показывают, что во второй обмотке трансформатора возникает высокое напряжение, а диод и конденсатор совместно обеспечивают формирование напряжения. Токи диода и конденсатора протекают только в виде кратковременных импульсов, что указывает на периодический процесс заряда и разряда конденсатора [13]. Полученные результаты подтверждают принцип работы высоковольтной цепи питания магнетрона и согласуются с теоретическими знаниями.

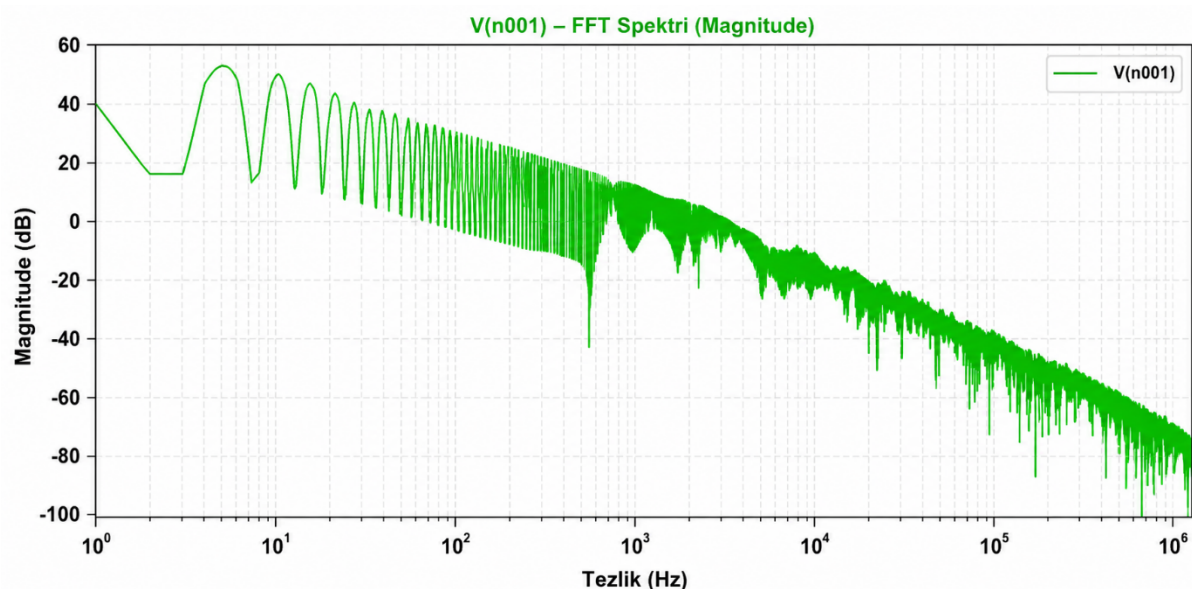


Рисунок 6. График изменения тока диода $I(D1)$ во временной области, имеющий импульсный характер

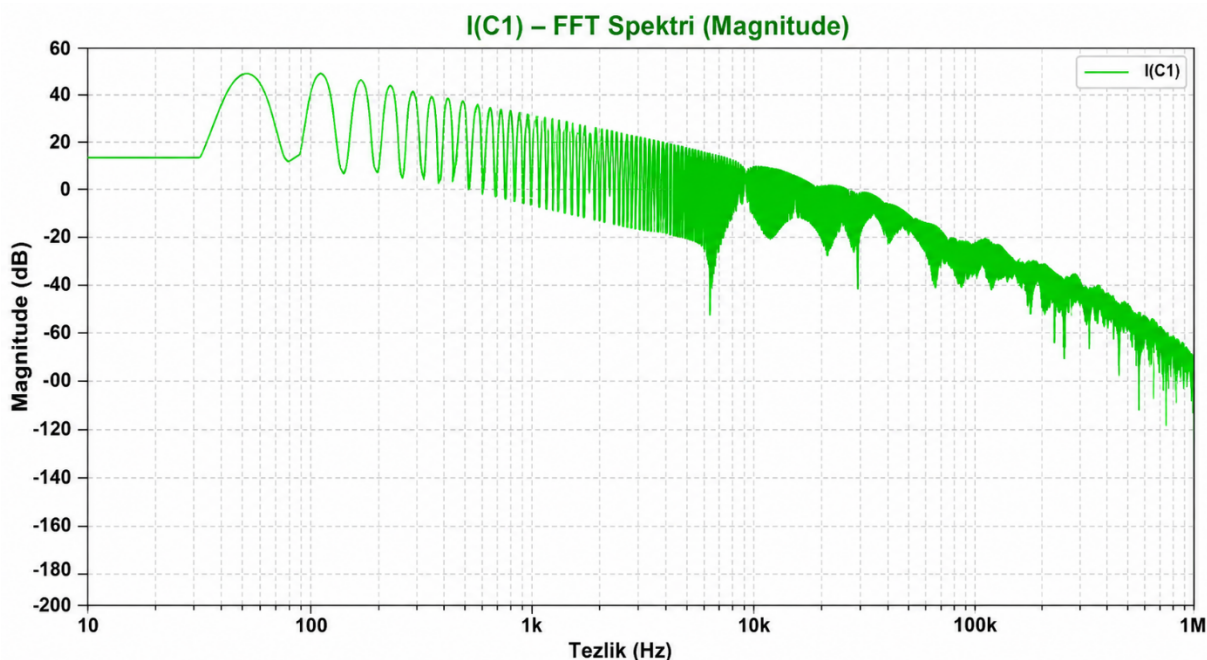


Рисунок 7. Сравнение синфазного изменения временных диаграмм токов диода и конденсатора

Анализ БПФ показывает, что основные энергетические компоненты сигнала сосредоточены в области низких частот [17]. С ростом частоты амплитуда гармоник постепенно уменьшается, что свидетельствует об ослаблении высокочастотных компонентов сигнала. Гармоники, наблюдаемые в спектре, отражают влияние нелинейных элементов в цепи [5].

Результаты симуляции показывают, что временные диаграммы токов диода и конденсатора изменяются синфазно. Это обусловлено последовательной структурой соединения цепи: поскольку процесс заряда конденсатора ограничен интервалом проводимости диода, протекание тока для обоих элементов происходит одновременно. Это играет решающую роль в формировании импульсного характера тока, необходимого для высоковольтного питания магнетрона [7].

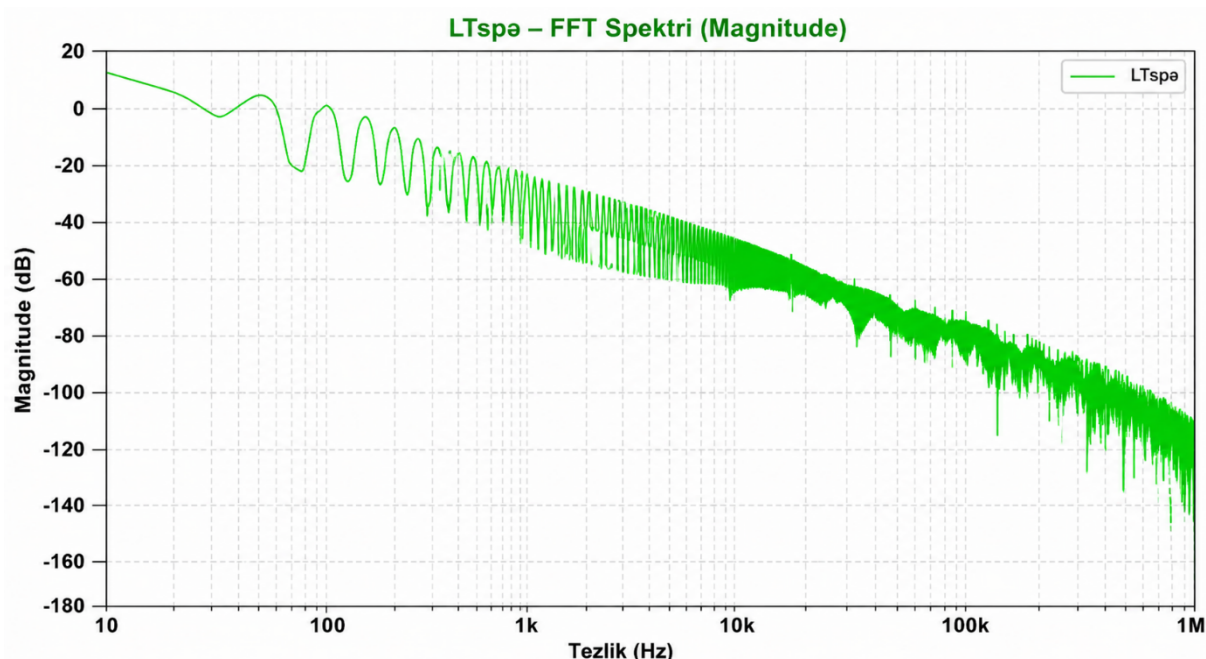


Рисунок 8. График спектра БПФ магнитного потока во второй обмотке трансформатора ($L2 : flux$)

Анализ БПФ магнитного потока во второй обмотке трансформатора ($L2 : flux$) отражает спектральный состав гармонических компонентов, возникающих при преобразовании энергии в магнитное поле. Результаты БПФ показывают, что хотя основной энергетический компонент сосредоточен на фундаментальной частоте, в результате импульсного характера питания формируются высокочастотные гармоники. Спектральное распределение магнитного потока напрямую связано с формой напряжения питания и импульсным характером тока, возникающего в диодно-конденсаторном узле [4]. Компоненты высокой амплитуды, наблюдаемые в низкочастотной области спектра, отражают нелинейные характеристики магнитного сердечника трансформатора и считаются одним из основных факторов, влияющих на эффективность преобразования энергии [11].

Рост гармоник приводит к возникновению дополнительных потерь в магнитном сердечнике трансформатора, повышению тепловой нагрузки на диод и ухудшению электромагнитной совместимости (ЭМС) [8]. Согласно результатам симуляции, значение коэффициента суммарных гармонических искажений (THD_I), составляющее 58.98 %,

указывает на преобладание нелинейных процессов в цепи питания. Данная ситуация может привести к росту потерь энергии вследствие неполного согласования нагрузки с магнетроном, снижению коэффициента полезного действия и негативно повлиять на долговечность надежной эксплуатации установки.

С целью количественной оценки гармонического состава анодного тока использовался модуль Fourier Analysis программы LTspice. Коэффициент гармонических искажений определяется следующим выражением:

$$THD_1 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_n^2}}{i_1} \times 100\%$$

где I_1 — амплитуда компоненты основной частоты, а I_n — амплитуда высших гармоник n -го порядка [14]. Этот показатель характеризует качество сигнала в системе: чем ниже коэффициент THD_I , тем эффективнее работает преобразование энергии магнетроном и тем ниже уровень электромагнитных помех (ЕМИ). Результаты симуляции показывают, что при отклонении сопротивления нагрузки от номинального значения наблюдается рост показателя THD_I [2]. Это, в свою очередь, обуславливает дополнительные тепловые потери, которые могут привести к уменьшению коэффициента полезного действия (КПД) магнетрона и сокращению срока службы прибора.

С целью количественной оценки гармонических искажений был использован модуль анализа Фурье программы LTspice, а полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты анализа Фурье по току в программе LTspice

Номер гармоники	Частота (Гц)	Компонента Фурье	Нормированная компонента	Фаза (°)	Нормированная фаза (°)
DC (Постоянная составляющая)	—	4295.16 мА	—	—	—
1	1.000×10^2	3.508×10^3	1.000	-94.60°	0.00°
2	2.000×10^2	1.339×10^3	0.3816	-92.30°	$+2.29^\circ$
3	3.000×10^2	8.529×10^2	0.2431	-91.54°	$+3.06^\circ$
4	4.000×10^2	6.298×10^2	0.1795	-91.15°	$+3.44^\circ$
5	5.000×10^2	5.002×10^2	0.1426	-90.92°	$+3.67^\circ$
6	6.000×10^2	4.153×10^2	0.1184	-90.77°	$+3.83^\circ$
7	7.000×10^2	3.551×10^2	0.1012	-90.66°	$+3.94^\circ$
8	8.000×10^2	3.103×10^2	0.08845	-90.58°	$+4.02^\circ$
9	9.000×10^2	2.755×10^2	0.07854	-90.52°	$+4.08^\circ$

Примечание: частичные гармонические искажения (Partial Harmonic Distortion) = 54.37 %, суммарные гармонические искажения (THD_I) = 58.98 %.

Заключение

В результате проведенного исследования была комплексно проанализирована высоковольтная схема питания магнетронного генератора, используемого в системах микроволнового нагрева, и определены основные факторы, влияющие на его электрические и энергетические показатели. Из показателей, полученных в итоге анализа, следует, что переходные процессы в цепи питания, импульсный характер анодного напряжения и тока, а также влияние нелинейных элементов напрямую воздействуют на общий режим работы системы и эффективность преобразования энергии. В результате гармонического анализа установлено наличие высокочастотных гармоник и рост гармонических искажений при изменении параметров нагрузки, что, как показано, приводит к снижению коэффициента полезного действия магнетрона, дополнительным тепловым потерям и возникновению электромагнитных помех.

Исследование доказывает, что оптимизация схемы питания магнетронного генератора имеет важное значение для стабильной, более надежной и энергоэффективной работы систем микроволнового нагрева. С этой целью моделирование электрических процессов и гармонический анализ системы были выполнены в программной среде LTspice; полученные результаты симуляции подтвердили теоретические положения и позволили оценить различные режимы работы. Предложенный подход имеет практические возможности применения в направлениях проектирования установок микроволнового нагрева, оптимизации рабочих параметров, повышения энергетической эффективности и обеспечения электромагнитной совместимости.

Список литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: учебник: в 3 ч. – М.: Высшая школа, 2007. – 752 с.
2. В.И. Петровский, Ю.Е. Седельников. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1986.
3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. Ч.1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 199 с.
4. Каганов М.И. Электроны, фононы, магноны. – М.: Наука, 1979. – 192 с.
5. Касаткин, А.С., Немцов М.В. Курс электротехники: учебник. – М.: Академия, 2016. – 288 с.
6. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. – М.: Высшая школа, 1980. – 226 с.
7. Фролов В.Я. Устройства силовой электроники и преобразовательной техники с разомкнутыми и замкнутыми системами управления в среде Matlab – Simulink. – М.: Лань, 2018. – 332 с.
8. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК-Пресс, 2014. – 282 с.
9. Analog Devices. LTspice. Analog Devices. LTspice Official Page Retrived from: [Электронный ресурс]. – 2025. URL: <https://www.analog.com/en/resources/media-center/videos/6375717978112.html> (дата обращения: 09.08.2026).

10. Balanis C.A. Advanced engineering electromagnetics. – 2nd ed. – John Wiley & Sons. – 2012.
11. Basso C. Computer simulation of power electronics and motor drives // Power Electronics Handbook. – 2024.
12. Collin, R.E. Foundations for microwave engineering. – 2nd ed. – IEEE Press. – 2001.
13. Erickson R.W. Maksimović D. Fundamentals of power electronics. – 3rd ed. – Springer. – 2020.
14. IEEE Power & Energy Society [Электронный ресурс]. // IEEE Standard 519. – 2022. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/519/10677/> (дата обращения: 09.08.2026).
15. Kraus J.D., Marhefka R.J. Antennas for all applications. – 3rd ed. – McGraw-Hill. – 2002.
16. Kubulus P.P., Jørgensen A.B., Beczkowski S.M., Munk-Nielsen S. An LTSpice–MATLAB interface for mitigating convergence problems in circuit optimization with SPICE // IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP). – 2022. – DOI: 10.1109/IWIPP50752.2022.9894135.
17. Mohan N., Undel, T.M., Robbins W.P. Power electronics: Converters, applications, and design. – 3rd ed. – John Wiley & Sons. – 2003.
18. Pozar D.M. Microwave engineering. – 4th ed. – John Wiley & Sons. – 2012.
19. Rashid M.H. Power electronics: Circuits, devices, and applications. – 4th ed. – Pearson. – 2014.

References

1. Bessonov L.A. [Theoretical foundations of electrical engineering]. In 3 parts. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2007. 752 P. (In Russ.)
2. Petrovsky V.I., Sedelnikov Yu.E. [Electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. (In Russ.)
3. Zinoviev G.S. [Fundamentals of power electronics]. Part 1. Novosibirsk, NSTU Publ., 1999. 199 P. (In Russ.)
4. Kaganov M.I. [Electrons, phonons, magnons]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 192 P. (In Russ.)
5. Kasatkin A.S., Nemtsov M.V. [Electrical engineering course]. Moscow, Akademiya Publ., 2016. 288 P. (In Russ.)
6. Lebedev I.V. [Microwave technology and devices]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 226 P. (In Russ.)
7. Frolov V.Ya. [Power electronics and converter equipment with open-loop and closed-loop control systems in the Matlab–Simulink environment]. Moscow, Lan' Publ., 2018. 332 P. (In Russ.)
8. Chernykh I.V. [Modeling of electrical devices in MATLAB: SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK-Press Publ., 2014. 282 P. (In Russ.)
9. Analog Devices. LTspice. Analog Devices. LTspice Official Page Retrieved from:.. – 2025.
10. Balanis C.A. Advanced engineering electromagnetics. 2nd ed. John Wiley & Sons. – 2012.
11. Basso C. Computer simulation of power electronics and motor drives. – In: Power Electronics Handbook. 5th ed. Elsevier, 2024.
12. Collin R.E. Foundations for microwave engineering. 2nd ed. IEEE Press. – 2001.

13. Erickson R.W. Maksimović D. Fundamentals of power electronics. 3rd ed. Springer. – 2020.
14. IEEE Power & Energy Society. IEEE Standard 519–2022: IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE, 2022. Retrieved from: (accessed: 09.08.2026).
15. Kraus J.D., Marhefka R.J. Antennas for all applications. 3rd ed. McGraw-Hill. – 2002.
16. Kubulus P.P., Jørgensen A.B., Beczkowski S.M., Munk-Nielsen S. An LTSpice–MATLAB interface for mitigating convergence problems in circuit optimization with SPICE. – In: IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP), 2022. – DOI: 10.1109/IWIPP50752.2022.9894135.
17. Mohan N., Undel T.M., Robbins W.P. Power electronics: Converters, applications, and design. 3rd ed. John Wiley & Sons. – 2003.
18. Pozar D.M. Microwave engineering. 4th ed. John Wiley & Sons. – 2012.
19. Rashid M.H. Power electronics: Circuits, devices, and applications. 4th ed. Pearson. – 2014.