

МРНТИ 44.29.29

Н.Ш. Абдлахатова¹ – основной автор, | ©
Т.С. Жүсіп², А.Ә. Әрпіш³¹Ст. преподаватель, ²Канд. техн. наук, доцент, ³Преподаватель

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0003-1285-2684> ²<https://orcid.org/0000-0001-8131-2994>³<https://orcid.org/0009-0009-3368-6081>^{1,2,3}Казахский национальный университет водного хозяйства и ирригации,

г. Тара, Казахстан

¹abdakhatova@list.ru<https://doi.org/10.55956/NATF9916>

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ ЛАМПОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ

Аннотация. В статье представлены высокочастотные ламповые автогенераторы, которые способны обеспечить энергией различные технологические нагрузки. Представлены область использования, способ управления, а также система автоматизированного исследования схем ламповых генераторов. Были рассмотрены режимы работы ламповых генераторов для создания надежных источников с высокими энергетическими показателями. Генераторная лампа представляется эквивалентной схемой, состоящей из двух зависимых источников тока, один из которых определяется по анодным, другой по сеточным характеристикам. Автоматизация исследований обеспечивается элементами блока управления моделью, которые позволяют определять момент коммутации ключевых элементов, измерять напряжения и токи различных участков цепи, моделировать кусочно-линейные характеристики нелинейных резисторов, индуктивностей, емкостей. Анализ режимов работы различных генераторных ламп, применяемых в промышленности, показал, что их нагрузочные характеристики качественно сохраняют свой вид в диапазоне мощностей 4-500 кВт. Управление, ЛГ осуществляется при регулировании выпрямителям, однако перспективным направлением является управление по сетке, которое, кроме того, дает возможность осуществлять импульсный нагрев и обработку деталей по оптимальным алгоритмам.

Ключевые слова: ламповый генератор, инвертор, выпрямитель, напряжение, алгоритм управления.



Абдлахатова, Н.Ш. Методы анализа и управления ламповых генераторов для электротермии [Текст] / Н.Ш. Абдлахатова, Т.С. Жүсіп, А.Ә. Әрпіш // Механика и технологии / Научный журнал. – 2025. – №1(87). – С.494-502.
<https://doi.org/10.55956/NATF9916>

Введение. При питании электротермических установок на частотах 60 кГц и выше широкое распространение получили высокочастотные ламповые автогенераторы (ЛГ). На данных частотах только ламповые генераторы способны обеспечить энергией различные технологические нагрузки при мощности в десятки и сотни киловатт.

Область использования ЛГ в электротермии значительна. Они применяются при питании установок диэлектрического нагрева, плавке

оксидов в холодных тиглях, производстве труб из ленты, получении высокочастотной плазмы путем индуцированного разряда, питании газовых лазеров, литье микропровода, закалке и упрочнении поверхности деталей и т.д.

Разнообразный характер нагрузки, широкий диапазон изменения ее параметров, значительный уровень мощности заставляют исследовать режимы работы ЛГ для создания надежных источников с высокими энергетическими показателями.

Применение линейной теории ЛГ дает возможность анализировать процессы в таких схемах, работающих на неизменную нагрузку при постоянной частоте, в электротермии, для которой характерно изменение параметров технологического звена, возможны такие режимы ЛГ, когда определяющую роль играет нелинейность характеристик лампы. Учет нелинейности возможен только при цифровом моделировании электромагнитных процессов во всей схеме ЛГ.

Условия и методы исследования. Для получения полной картины процессов была разработана система автоматизированного исследования схем ламповых генераторов, главные принципы построения которой изложены в [1]. Основные идеи, заложенные в систему, сводятся к следующим.

Система дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих схему, формируется в базисе переменных состояния. Затем она кодируется, что позволяет в дальнейшем осуществлять работу только с ненулевыми элементами. Используемые методы интегрирования – явные, неявные, системные. Возможно их комбинированное применение с использованием алгоритмов, адаптирующихся к линейному или нелинейному режиму работы. например, как это предложено в [2] (под линейным режимом понимается такой, когда лампа заперта и по аноду и по сетке, под нелинейным – режим, когда лампа находится во включенном состоянии). В связи с тем, что система уравнений формируется один раз, значительно увеличивается эффективность применения системных методов на линейных участках режима работы ЛГ. Модель, представленная в таком виде, дает возможность получать переходные характеристики схемы, например, при импульсном режиме работы ЛГ, а также рассчитывать стационарные периодические режимы, как результат переходного процесса. Длительность переходного процесса может достигать сотен периодов ввиду наличия элементов колебательного контура и блокировочных элементов, значения которых отличаются на порядок и более. Элементный состав системы состоит из источников тока, напряжения, емкостей, индуктивностей, взаимоиנדуктивностей, резисторов, а также ключевых элементов, которые служат для моделирования различных переключений в схеме. Генераторная лампа представляется эквивалентной схемой, состоящей из двух зависимых источников тока, один из которых определяется по анодным, другой по сеточным характеристикам. Если же ЛГ работает на высоких частотах и параметры межэлектродных емкостей сопоставимы с параметрами линейной части схемы, необходимо в эквивалентную схему вводить емкости анод – катод, анод – сетка, сетка – катод. Характеристики ламп, применяемых в серийно выпускаемых установках, предварительно введены в систему и вызываются автоматически. Автоматизация исследований обеспечивается элементами блока управления моделью, которые позволяют определять момент коммутации ключевых элементов, измерять напряжения и токи

различных участков цепи, моделировать кусочно-линейные характеристики нелинейных резисторов, индуктивностей, емкостей. Набор элементов блока управления, входящих в систему, дан в [3].

Данный инструмент исследований позволяет получить поля характеристик ЛГ при изменении нагрузки, анодного питания E_a , коэффициента обратной связи β и иметь полное представление о поведении генератора в реальном диапазоне изменения указанных параметров. При этом наличие двух варьируемых параметров β и E_a , каждый из которых имеет по три фиксированных значения, требует расчета 54-72 режимов, если параметры нагрузки изменяются в 6-8 точках. Увеличение количества изменяемых значений β и E_a до пяти требует расчета уже 150-200 режимов. Однако в этом случае объем получаемой информации является столь значительным, что иметь точное представление об энергетике схемы без применения ЭВМ можно лишь с малой степенью достоверности, из-за трудностей сравнения большого количества таблиц.

Результаты исследований и их обсуждение. По результатам исследований для определения режима работы ЛГ при широком диапазоне изменения параметров нагрузки необходимо иметь устройство, которое по заранее введенным в него таблицам (полям) характеристик, полученным на математической модели, могло бы с помощью минимального количества измерений на реально работающем ЛГ выдавать требуемую информацию [4]. Характерно, что в этом случае можно получать не только те значения токов и напряжений, которые легко доступны для измерения, но и значения мощностей рассеяния на аноде и на сетке, выходной мощности генератора, а также его к.п.д.

Появление микропроцессорной техники позволяет определять режим работы ЛГ, а также создать автоматизированный регулятор режима. Введение в микропроцессор полей характеристик и алгоритмов интерполяции дает возможность получать информацию о работоспособности ЛГ не только в заранее рассчитанном диапазоне изменения его параметров (наиболее энергетически выгодном), но и за его пределами. Данный подход позволяет определить круг требований по переводу ЛГ в режим с максимальным к.п.д., что может быть реализовано непосредственно на рабочем месте и позволяет иметь «помощника» при первоначальной настройке генератора на выпускающем предприятии. В последнем варианте наличие полей характеристик серийных установок значительно повышает эффективность работы предлагаемого диагностического комплекса.

В качестве датчиков целесообразно применять датчики напряжения, которые наиболее надежны на этих частотах даже при высоком уровне анодного питания. Заданные значения следует измерять на аноде и сетке лампы, так как именно эти два параметра полностью определяют режим работы лампы, на входе ЛГ (постоянное входное напряжение регулируемый параметр) и на нагрузочном контуре [5]. При одноконтурной, одноконтурной схеме эти четыре параметра дают возможность иметь полную информацию о работе установки. Усложнение схемы генератора – выполнение его по двухконтурной схеме – приводит к необходимости установки дополнительных датчиков в целях представления всей картины его работы. Однако определить наиболее энергетически выгодный режим ЛГ можно только по значениям анодного и сеточного напряжений.

В общем случае данные идеи могут быть заложены в автоматизированные ЛГ. При этом можно выделить три уровня автоматизации.

1. Создание диагностических стендов для настройки ЛГ, основными функциями которых является представление оператору, обслуживающему ЛГ, информации в удобном для настройки генератора виде. Подробно вопросы создания стенда такого вида описаны в автоматизированные ЛГ. При этом можно выделить три уровня автоматизаций.

2. Создание автоматических регуляторов для начальной настройки ЛГ. Необходимость в такой настройке возникает при смене индукторов и нагреваемых деталей. Внедрение таких регуляторов позволит значительно улучшить энергетические показатели режимов работы промышленных ЛГ. Функциональная схема регулятора для настройки ЛГ приведена на рисунке 1. Основным элементом регулятора такого вида является блок оптимизации режима, позволяющий в зависимости от требований технологии реализовывать функцию вида [6].

$$F = \max \eta (E, \beta, R_0, \varepsilon) \quad (1)$$

При ограничениях

$$\begin{aligned} P &= P_{\text{зад}}, \\ P_a &< P_a \cdot \text{доп}, \\ P_d &< P_d \cdot \text{доп}, \\ U_d &< U_d \cdot \text{доп} \end{aligned}$$

или

$$F = \max P (E, \beta, R_0, \varepsilon) \quad (2)$$

При ограничениях

$$\begin{aligned} \eta &\geq \eta_{\text{зад}}, \\ P_a &< P_a \cdot \text{доп}, \\ P_d &< P_d \cdot \text{доп}, \\ U_d &< U_d \cdot \text{доп}. \end{aligned}$$

Входными параметрами блока оптимизации являются нормализованные сигналы, снимаемые с ЛГ, E_a, U_a, U_d, U_n . Выходные сигналы – угол регулирования δ , приращение коэффициента обратной связи $\Delta\beta$ и приращение ΔP . Воздействуя на выпрямитель (В), регулятор обратной связи (РОС), регулятор мощности (РМ), можно вывести ЛГ в режим в соответствии с выражениями (1) или (2). Применение регулятора такого вида может быть рекомендовано для начальной настройки режима кратковременных технологических процессов, таких как закалка машиностроительных деталей, наплавка, импульсный нагрев.

3. Автоматизированный регулятор третьего уровня позволяет получать энергетически выгодный режим работы ЛГ на протяжении всего технологического процесса. Функциональная схема регулятора представлена на рисунке 2. Задача стабилизации температуры или напряжения на нагрузке

Ун может быть решена обычным аналоговым регулятором, воздействующим на угол отпирания тиристоров выпрямителя. Основной задачей блока оптимизации режима является автоматическое поддержание максимального электронного к. п. д. генератора в соответствии С (1). Входными сигналами блока оптимизации, как и в предыдущем случае, являются напряжение выпрямителя, напряжения на сетке и аноде лампы. Выходные параметры – $\Delta\beta$ и ΔP , воздействующие на РОС и РМ. Учитывая, что регулирование режима ЛГ связано с перемещением короткозамкнутых катушек в регуляторах с помощью сервомеханизмов, постоянные времени этого канала регулирования оказываются на несколько порядков больше постоянных времени каналов оптимизации, поэтому взаимное влияние регуляторов несущественно. Регулятор такого типа может быть рекомендован к использованию в длительных технологических процессах, таких как плавка материалов.

Точность регулирования ЛГ зависит от количества введенных в процессор таблиц при различных изменяемых параметрах, число которых, как указывалось, может достигать 25 и более, причем в каждой таблице имеется по 48-64 значения. Так как объем памяти процессора не велик, то число вводимых таблиц ограничено. На примере генератора ВЧГЗ-4/1, 76 были проанализированы таблицы стационарных режимов. Оказалось, что при неизменном значении β и изменении напряжения E_a л 6 до 4 кВ с шагом 0,5 кВ можно построить таблицу пересчета характеристик ЛГ [7]. Это позволяет существенно уменьшить информацию, закладываемую в ЭВМ. Таким образом, имея таблицу характеристик ЛГ для одного значения β и E_a при различной нагрузке и таблицу пересчета с N поправочными коэффициентами, можно вместо 25 вводить в ЭВМ пять таблиц характеристик, одну таблицу пересчета и поправочные коэффициенты, что значительно снижает требуемый объем памяти, а также повышает эффективность вычислений.

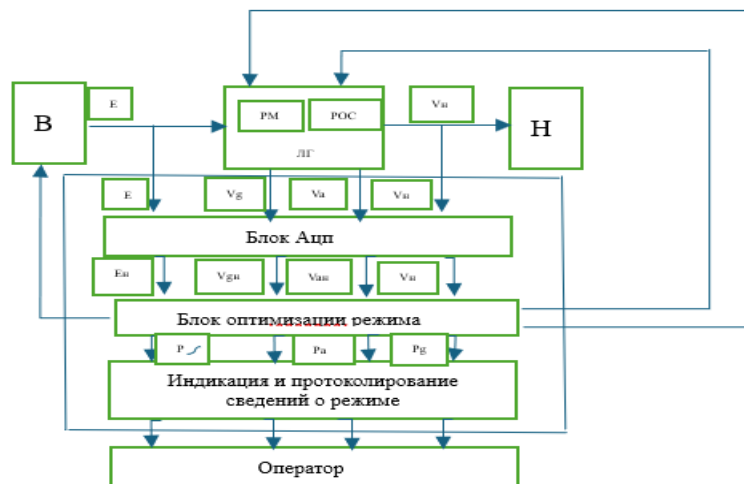


Рис. 1. Функциональная схема регулятора для настройки ЛГ

Анализ режимов работы различных генераторных ламп, применяемых в промышленности, показал, что их нагрузочные характеристики качественно сохраняют свой вид в диапазоне мощностей 4-500 кВт. Использование в схемах автогенераторов элементов, приводящих к искажению формы

составляющей сеточного тока, и его конфигурация не зависит от типа ЛГ и его мощности. Поясним работу ЛГ при данном способе управления.

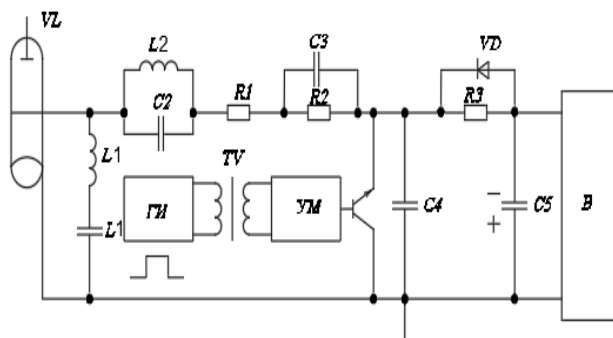


Рис. 3. Звено управления ЛГ при воздействии на цепь постоянной составляющей сеточного тока

Лампа находится в запертом состоянии при подаче отрицательного напряжения на ее сетку, что достигается установкой в данной цепи источника постоянного напряжения. Напряжение этого источника зависит от E_a и β . Например, для генератора ВЧГЗ-60/13,56 при $E_a = 10$ кВ значение запирающего напряжения для надежного срыва генерации должно составлять 500 В. Пуск генератора осуществляется замыканием транзистора. Цепь автосмещения оказывается подключенной к общей шине, и возбуждение ЛГ происходит как в обычной схеме.

В установившемся режиме звено управления не оказывает влияния на работу всей установки. Срыв генерации происходит при запираании транзистора. На частоте 13,56 МГц пуск генератора происходит за 5-10 мкс, а выключение – за 10-15 мкс, что позволяет осуществить импульсно-периодический режим работы с малыми скважностями при частоте включения до 10 кГц, а также в режиме одиночных импульсов с большими скважностями. Данный способ управления позволяет оказывать динамическое воздействие на зону обработки, что может быть полезным для реализации специальных алгоритмов регулирования.

Заключение. Таким образом, в ЛГ для электротермии целесообразно использовать устройства на основе микропроцессоров, что дает возможность реализовать алгоритмы управления по предварительно полученной модели. Это позволяет иметь максимальный к.п.д. всего технологического процесса, что значительно увеличивает эффективность использования оборудования, а также автоматизировать режим работы ЛГ. Управление ЛГ осуществляется при регулировании выпрямителя, однако перспективным направлением является управление по сетке, которое, кроме того, дает возможность осуществлять импульсный нагрев и обработку деталей по оптимальным алгоритмам.

Список литературы

1. Иванов, Д.В. Разработка лампового генератора мощностью 1 МВт и частотой 0,44 МГц для питания ВЧИ-плазмотрона [Текст] / Д.В. Иванов // Электричество. – 2023. – №6.

2. Поляков, В.Д. Высокочастотный генератор для индукционного нагрева [Текст] / В.Д. Поляков, Э. Чаколья // Электротехника. – 2000. – № 12. – С. 31-34.
3. Иванов, А.Б. Импульсные передатчики СВЧ [Текст] / А.Б. Иванов. – Москва: Советское радио, 2009. – 113-118 с.
4. Важенина, З.П. Импульсные генераторы на транзисторах [Текст] / З.П. Важенина. – М.: Энергия, 2000. – 128 с.
5. Иванов, В.В. Генераторные, фазовые и частотные преобразователи и модуляторы [Текст] / В.В. Иванов, В.К. Шакурский. – М.: Радио и связь, 2003. – 184 с.
6. Блинов Ю.И., Сазонов Л.В., Яблонская О.П. Анализ режимов работы ламповых генераторов для электротехнологий с применением ЭЦВМ [Текст] / Ю.И. Блинов., Л.В. Сазонов, О.П. Яблонская // Изв. вузов. Электромеханика. – 1984. – №9. – С. 93-97.
7. Murashov I. et al. Development of Digital Twin of High Frequency Generator with Self-Excitation in Simulink. – IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2019. Vol. 643 (1).

Материал поступил в редакцию 08.01.25, принят 17.03.25.

Н.Ш. Абдлахатова¹, Т.С. Жүсіп¹, А.Ә. Әрпіш¹

*¹Қазақ ұлттық су шаруашылығы және ирригация университеті,
Тараз қ., Қазақстан*

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯЛЫҚ МАҚСАТТАҒЫ ЛАМПАЛЫҚ ГЕНЕРАТОРЛАРДЫ ТАЛДАУ ЖӘНЕ БАСҚАРУ ӘДІСТЕРІ

Аңдатпа. Мақалада әртүрлі технологиялық жүктемелерді энергиямен қамтамасыз ете алатын жоғары жиілікті түтік автогенераторлары қарастырылған. Пайдалану аймағы, басқару әдісі, сондай-ақ генераторлардың схемаларын автоматтандырылған зерттеу жүйесі ұсынылған. Жоғары энергетикалық көрсеткіштері бар сенімді көздерді құру үшін түтік генераторларының жұмыс режимдері қарастырылды. Генератор шамы екі тәуелді ток көздерінен тұратын эквивалентті схема ретінде ұсынылады, олардың біреуі анодтармен, екіншісі торлы сипаттамалармен анықталады. Зерттеулерді автоматтандыру негізгі элементтердің коммутация моментін анықтауға, тізбектің әртүрлі бөліктерінің кернеулері мен токтарын өлшеуге, сызықтық емес резисторлардың, индуктивтіліктің, сыйымдылықтардың бөлшектік-сызықтық сипаттамаларын модельдеуге мүмкіндік беретін модельді басқару блогының элементтерімен қамтамасыз етіледі. Өнеркәсіпте қолданылатын әртүрлі генераторлық шамдардың жұмыс режимдерін талдау олардың жүктеме сипаттамалары 4-500 кВт қуат диапазонында өз түрін сапалы сақтайтынын көрсетті. Басқару, түтік генератор түзеткіштерді реттеу кезінде жүзеге асырылады, бірақ перспективалы бағыт- торды басқару, ол сонымен қатар импульсті жылытуға және бөлшектерді оңтайлы алгоритмдер бойынша өңдеуге мүмкіндік береді.

Тірек сөздер: түтік генераторы, инвертор, түзеткіш, кернеу, басқару алгоритмі.

N.Sh. Abdlakhatova¹, T.S. Zhussip¹, A.A. Arpish¹¹Kazakh National University of Water Management and Irrigation, Taraz, Kazakhstan**METHODS FOR THE ANALYSIS AND CONTROL OF VACUUM TUBE GENERATORS
IN ELECTROTHERMAL APPLICATIONS**

Abstract. The article presents high-frequency tube autogenerators that are capable of providing energy for various technological loads. The scope of use, the control method, as well as the system of automated study of lamp generator circuits are presented. The modes of operation of lamp generators were considered to create reliable sources with high energy performance. The generator lamp appears to be an equivalent circuit consisting of two dependent current sources, one of which is determined by anode characteristics, the other by grid characteristics. Automation of research is provided by the elements of the model control unit, which allow determining the switching moment of key elements, measuring voltages and currents of various sections of the circuit, and modeling piecewise linear characteristics of nonlinear resistors, inductors, and capacitances. An analysis of the operating modes of various generator lamps used in industry has shown that their load characteristics qualitatively retain their appearance in the power range of 4-500 kW. LG control is carried out by regulating rectifiers, however, grid control is a promising direction, which, in addition, makes it possible to carry out pulsed heating and processing of parts according to optimal algorithms.

Keywords: lamp generator, inverter, rectifier, voltage, control algorithm.

References

1. Ivanov D.V. Razrabotka lampovogo generatora moshchnost'yu 1 MVt i chastotoj 0,44 MGc dlya pitaniya VChI-plazmotrona [Development of a vacuum tube generator with a power of 1 MW and a frequency of 0.44 MHz for powering a high-frequency plasma torch] // Electricity. – 2023. – No. 6, [in Russian].
2. Polyakov V.D., Chakolya E. Vysokochastotnyj generator dlya indukcionnogo nagreva [High-frequency generator for induction heating] // Electrical engineering. – 2000. – No. 12. – P. 31-343, [in Russian].
3. Ivanov, A.B. Impul'snye peredatchiki SVCh [Microwave pulse transmitters] – Moscow: Soviet Radio, 2009. – 113-118 p., [in Russian].
4. Vazhenina, Z.P. Impul'snye generatory na tranzistorah [Pulse generators on transistors]. – M.: Energy, 2000. – 128 p, [in Russian].
5. Ivanov, V.V., Shakursky, V.K. Generatory, fazovye i chastotnye preobrazovateli i modulyatory [Generator, phase and frequency converters and modulators]. – M.: Radio and communication, 2003. – 184 p., [in Russian].
6. Blinov Yu.I., Sazonov L.V., Yablonskaya O.P. Analiz rezhimov raboty lampovyh generatorov dlya elektrotekhnologij s primeneniem ECVm [Analysis of operating modes of vacuum tube generators for electrical technologies using digital computers] // News of universities. Electromechanics. – 1984. – No. 9. – P. 93-97, [in Russian].
7. Murashov I. et al. Development of Digital Twin of High Frequency Generator with Self-Excitation in Simulink. – IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2019. – Vol. 643 (1).