УДК 621.365

Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2025-18-6-97-104

Высокочастотные импульсные источники питания для электротехнологий

К. Ю. Блинов, Б. Я. Качанов, Ю. И. Блинов⊠

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[™]yuri-50@mail.ru

Аннотация. Современные электротехнологическое процессы требуют создания источников питания (ИП), способных выдерживать без аварийных режимов колебания нагрузки практически от холостого хода (XX) до короткого замыкания (КЗ). В этом случае не только обеспечивается достижимость технологии, но и ее высокая эффективность, соответствие высокочастотной (ВЧ) установки принятым стандартам. Рассматривается гамма источников питания, работающих в импульсных и импульсно-периодических режимах (ИПР), способы перевода известных схем в данные режимы питания электротехнологических установок. Указываются программные средства для моделирования таких режимов работы, а также практические результаты перевода классических схем в требуемые режимы работы и результаты их моделирования.

Ключевые слова: электротехнология, высокая частота, импульсный режим, ламповый генератор, инвертор

Для цитирования: Блинов К. Ю., Качанов Б. Я., Блинов Ю. И. Высокочастотные импульсные источники питания для электротехнологий // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 6. С. 97–104. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-97-104.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

High Frequency Pulse-Periodic Power Supplies for Electrotechnologies

K. Y. Blinov, B. Ya. Kachanov, Yu. I. Blinov⊠

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

[™] yuri-50@mail.ru

Abstract. Modern electrotechnological processes require the development of power supplies capable to operate in wide range of load fluctuations from almost no-load to short circuit modes without emergency conditions. In this case the technology is achievable, as well as its high efficiency and compliance of the highfrequency installation with accepted standards. A power supplies operating in pulsed and pulse-periodic modes, methods of converting known circuits in to these power modes of electrotechnological installations are considered. Software tools for modelling such modes of operation are indicated, as well as practical results of converting classical circuits to the required modes of operation and the results of their modelling.

Keywords: electrotechnologies, high frequency, pulse-periodic mode, vacuum-tube generator, inverter

For citation: Blinov K. Y., Kachanov B. Ya., Blinov Yu. I. High Frequency Pulse-Periodic Power Supplies for Electrotechnologies. 2025. Vol. 18, no 6. P. 97–104. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-6-97-104.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Современные электротехнологические процессы требуют создания ИП, способных выдерживать без аварийных режимов колебания нагрузки практически от XX до K3. Причем при разработке новых ВЧ-электротехнологических процессов к ним следует подходить комплексно, проектируя всю установку, обеспечивающую требуемый процесс, начиная от сети промышленной

© Блинов К. Ю., Качанов Б. Я., Блинов Ю. И., 2025

Электротехника

Electrical Engineering

частоты и заканчивая процессами в технологическом звене. В этом случае обеспечивается не только достижимость технологии, но и ее высокая эффективность, соответствие ВЧ-установки принятым стандартам. В ряде случаев это достигается специфичной внешней характеристикой, которая может быть, в зависимости от требований к ИП, характеристикой источника либо тока, либо напряжения, специальными режимами работы импульсными режимами или ИПР. Создание таких ИП требует разработки теории их устойчивости при значительном диапазоне колебаний нагрузки, а также возможности широкого исследования их работы совместно с технологическим звеном согласно характеристикам самого технологического процесса. Эти исследования становятся возможными только при широком использовании принципов математического моделирования технологического процесса и самих схем ИП. При этом следует учитывать, что схемы ИП описываются системами дифференциальных уравнений высокого порядка с нелинейными коэффициентами со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Сегодня технологии ВЧ-обработки материалов очень широко используются при изготовлении различных изделий. Обычный диапазон мощностей в данных технологиях составляет 5...800 кВт, а частот – 5...13 560 кГц.

Для ограничения мощности, передаваемой в нагрузку, необходимо использовать импульсные режимы или ИПР питания технологического звена. Непрерывная передача энергии в заготовку или большая длительность импульса приводят к частичному оплавлению заготовки или ее полному плавлению. В настоящее время известен ряд технологий импульсной передачи мощности в нагрузку: ВЧ-сварка различных изделий, термическая обработка, упрочнение и т. д. Применение ИПР позволяет не только организовать строго дозированную передачу мощности в нагрузку, но и оказывать динамическое низкочастотное (НЧ) воздействие на зону обработки. Последнее достоинство ИПР подтверждается и технологией сварки изделий, например конденсаторов, по отбортованным кромкам и снятие грата при ВЧ-сварке труб.

Для реализации таких технологий, в зависимости от временных параметров ИПР, могут использоваться два типа ИП – ламповые и полупроводниковые (тиристорные [1] или транзисторные [2]) генераторы. Полупроводниковые генераторы также называются вентильными преобразователями или вентильными ИП. Анализируя литературные источники последних лет, посвященные ИП для ВЧ-электротехнологий, можно констатировать, что полупроводниковые ИП захватили диапазон частот от единиц до сотен килогерц, а ламповые – от 440 кГц до десятков мегагерц. Однако данные значения зависят, и очень сильно, от области мощностей, в которой работают такие ИП. Здесь же необходимо заметить, что представленные значения, как и в любой классификации, в том числе и в области ИП, приблизительны.

В указанном диапазоне частот и мощностей, учитывая импульсный или ИПР работы ИП, технологию проще реализовать с использованием лампового или полупроводникового генератора.

ИПР могут быть получены достаточно просто и не требуют существенных изменений. Например, в схеме лампового генератора (ЛГ) [3] в цепь постоянной составляющей сеточного тока устанавливается дополнительный источник запирающего напряжения, который шунтируется управляющим транзистором. Размыкание транзисторного ключа приводит к появлению на сетке триода дополнительного отрицательного потенциала и срыву генерации, либо к замыканию транзисторного ключа и короткому замыканию дополнительного источника и возвращению условий самовозбуждения ЛГ. Таким образом, влияние на сеточную цепь генератора приводит к ИПР, что позволяет прерывать самовозбуждение на заданное время.

По аналогии с общепринятой в литературных источниках терминологией параметров одиночного импульса тока необходимо дать понятия времен включения и выключения как ЛГ, так и вентильного ИП, работающих в импульснопериодическом режиме.

Для дальнейшего описания вводятся следующие определения:

– время включения ЛГ по цепи сетки $t_{\rm BKЛ}$ – это время с момента подачи импульса управления на управляющий транзистор в цепи сетки генераторного триода до момента времени, когда напряжение на анодном контуре (на нагрузочном контуре) достигает 0.9 от значения номинального уровня;

– время $t_{\rm BKЛ}$ можно представить, как сумму двух значений – времени задержки (t_3) и времени нарастания ($t_{\rm Hap}$), т. е.:

$$t_{\rm BKI} = t_3 + t_{\rm Hap}.$$

Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 6. С. 97–104

LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 6. P. 97–104

 время задержки – время с момента подачи импульса управления на управляющий транзистор в цепи сетки генераторного триода до момента времени, когда напряжение на анодном контуре достигнет 10 % от его номинального уровня;

– время нарастания – время с момента, когда напряжение на анодном контуре достигло 10 % от его номинального уровня, до момента, когда напряжение на анодном контуре достигает 0.9 от значения номинального уровня анодного напряжения;

– время выключения ЛГ по цепи сетки t_{выкл} – время с момента снятия импульса управления с управляющего транзистора в цепи сетки генераторного триода до момента времени, когда напряжение на анодном контуре (на нагрузочном контуре) достигает 0.1 от значения номинального уровня.

Интервал времени между моментом снятия импульса управления с управляющего транзистора в цепи сетки генераторного триода и моментом времени, когда напряжение на анодном контуре (на нагрузочном контуре) достигает 0.9 от значения номинального уровня, называется временем задержки выключения t_{3ad} . Только после окончания этого интервала начинает уменьшаться анодное напряжение. Следующий интервал времени, до достижения 10 % начального значения, называется временем спада $t_{cпd}$. Сумма времен задержки и спада называется временем выключения:

$t_{\rm BЫКЛ} = t_3 + t_{\rm CПД}.$

Следует заметить, что при анализе динамических процессов включения ЛГ определялось именно то значение времени, которое дано в вышеприведенных определениях. Аналогично обстоит дело и с процессом выключения ЛГ. При этом достижение схемой ЛГ стационарного режима как такового может затягиваться на несколько сот периодов, что неоднократно отмечалось при расчетах различных режимов схем ЛГ, особенно в областях, далеких от области номинальной загрузки генератора.

При применении ИПР ЛГ с различной частотой следования ВЧ-импульсов важен вопрос о максимальном НЧ-воздействии, которое может обеспечить ИП. От частоты НЧ-импульсов зависит реализация ряда электротехнологий. Далее эта частота определяется для того же генератора на 60 кВт, 0.44 МГц.

Анализируя полученные диаграммы, которые здесь не приводятся в силу их большого объема, можно констатировать следующее: при частоте

воздействия по цепи сетки в 5 кГц формируются НЧ-импульсы, ЛГ успевает выключиться, а длительность паузы практически равна длительности времени генерации. Аналогичная ситуация наблюдается и при частоте воздействия 10 кГц. При частоте 20 кГц ЛГ попадает в режим, когда напряжение на контуре снижается до 10 % от номинального, и тут же начинает увеличиваться из-за шунтирования запирающего источника напряжения в цепи сетки. Т. е., следуя введенным ранее определениям времен включения-выключения, можно говорить о наличии ИПР в данном случае. Однако при частотах 25 и 30 кГц ЛГ не успевает выключиться, а на ВЧ-напряжение ЛГ накладывается еще и НЧпульсация, частота которой равна задающей.

Таким образом, для ЛГ частотой 0.44 МГц максимальная частота воздействия составляет 20 кГц. Однако, как показывают полученные данные, вариация частоты воздействия и коэффициента скважности позволяет иметь глубокое регулирование мощности в нагрузке и осуществлять требуемое динамическое воздействие на зону технологической обработки.

Приведенные временные и частотные характеристики ЛГ зависят, в основном, от соотношения значений анодного блокировочного дросселя ЛГ и анодного разделительного конденсатора. Это же соотношение влияет и на «выброс» напряжения на нагрузке при включении ЛГ в работу, что четко видно на приведенных динамических характеристиках включения ИП.

Рассмотрим другие данные, полученные на математической модели с использованием программы анализа схем ламповых генераторов [4], на примере установки ВЧГ6-60/0.44 (рис. 1). Установка выполнена по двухконтурной схеме ЛГ. Добротность первого контура равна шести. Схема содержит [5] генераторный триод ГУ-66А, анодный блокировочный дроссель L_{аб}; анодный разделительный конденсатор Сар; цепь постоянной составляющей сетки, состоящей из емкости С_{гр} и резистора R_{гр} гридлика; сеточной блокировочной индуктивности L_{gб}; емкости C₁ первого контура; регулятора мощности РМ, который также выполняет роль индуктивности первого контура; цепи обратной связи, содержащей емкость цепи обратной связи Сос, регулятора цепи обратной связи РОС, емкости C_2 , нагрузочного контура $C_{\rm H}, L_{\rm H}, R_{\rm H}$.



Рис. 1. Двухконтурная схема лампового генератора Fig. 1. Two-tank circuit of vacuum-tube generator

На рис. 2 показана схема управления моделью в системе анализа устройств электропитания (САУЭП), где элемент LAM1 по значениям анодного и сеточных напряжений в схеме интерполирует введенные заранее анодные и сеточные характеристики генераторного триода ГУ-66А и выдает значения анодного и сеточного токов. Другие элементы схемы обеспечивают вычисление анодного напряжения в схеме ЛГ по двум подсоединенным к аноду лампы конденсаторам.

Схема управления моделью работает следующим образом. В блоке SUM происходит сложение напряжений на конденсаторах C_{ар} и C₁. Полученное напряжение является напряжением на аноде триода. В блоке LAM1 происходит интерполяция характеристик триода по анодному и сеточному напряжениям и на его выходе получаются значения анодного и сеточного токов, которые и передаются в электрическую расчетную схему.



Fig. 2. Control circuit of model in system of power supplies analysis

Для получения ИПР в цепь постоянной составляющей сеточного тока устанавливается транзисторный ключ и источник напряжения обратной полярности по отношению к сетке триода [6]. Замыкание ключа и шунтирование дополнительного источника напряжения возобновляет условия самовозбуждения и способствует генерации ВЧ-напряжения на нагрузке. Размыкание ключа приводит к появлению на сетке лампы отрицательного потенциала и закрытию триода, а, значит, и к срыву генерации или нарушению

условий самовозбуждения в схеме. Высокочастотный источник питания за счет организации на нагрузке модуляции высокочастотного напряжения, представляющей собой «пачки» высокочастотных импульсов, обеспечивает глубокое регулирование выходной мощности практически от нуля до максимально возможного.

Рассмотрим импульсно-периодический режим работы ЛГ (рис. 3), где по оси ординат представлено напряжение на нагрузке и_н. Предварительно следует заметить, что на частоте 440 кГц период работы схемы равен 2.27 мкс, т. е. длительность первого ВЧ-импульса составляет около 1.5...2.0 мс или около 100 периодов выходной частоты. Затем наблюдается пауза длительностью 1.5...2.0 мс и опять возникает генерация ВЧ-напряжения на нагрузке той же длительности – 1.5...2.0 мс.



of vacuum tube generator Аналогичный ИПР работы ЛГ приведен и на

рис. 4, но с другими длительностями пачек ВЧимпульсов. Так, длительность первой пачки составляет около 0.2 мс, второй – чуть меньше 1 мс, а третьей – более 7-8 мс.



LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 6. P. 97–104

В некоторых публикациях и зарубежных патентах также приводятся рекомендации организовывать ИПР работы ЛГ с помощью цепи гридлика: подключая или шунтируя установленный в цепь гридлика дополнительный резистор или несколько резисторов. На рис. 5, где приведен «импульснопериодический режим работы» ЛГ, показана абсурдность таких предположений. Данный режим известен в литературных источниках как режим затягивания [7] или режим прерывистой генерации.

На интервале 0.0...0.3 мс организовано получение импульса за счет отрицательного потенциала на сетке триода по аналогии с рис. 3. Затем источник напряжения делается равным нулю и в цепь постоянной составляющей сеточного тока тут же подключается резистор со значением, равным сопротивлению гридлика. Тут же наблюдается прерывистая генерация – два неконтролируемых ВЧ-импульса на интервале 0.35...0.7 мс. Далее шунтируется дополнительный резистор и в схеме опять возникают нормальные автоколебания или наблюдается режим самовозбуждения ЛГ.



Fig. 5. Intermittent generation mode of vacuum tube generator

Таким образом, использование в качестве ИП ЛГ с самовозбуждением позволяет получить НЧимпульсы с частотой 20 кГц для генератора с выходной частотой 440 кГц.

Рассмотрим вентильные ИП.

В качестве полупроводниковых ИП высокой частоты необходимо применять ВЧ-инверторы. Основные, наиболее известные в литературных источниках классы схем ВЧ-инверторов – резонансные инверторы, инверторы тока и инверторы напряжения. В зависимости от каждого из типов инверторов в этих классах существуют и особенности их перевода в ИПР. Резонансные инверторы и инверторы тока имеют на входе дроссель, причем в инверторах тока его значение на поря-

док больше, чем в резонансных инверторах, что и необходимо учитывать при организации ИПР. Поэтому реализация таких режимов в инверторах тока практически невозможна либо приводит к сложностям, выхолащивая саму природу ИПР. Реализация ИПР [8] в схеме резонансного инвертора с удвоением частоты и диодами встречного тока [9] показана на рис. 6. Здесь введены следующие схемные обозначения: E – источник постоянного напряжения; V1-V4 – вентильные ячейки (встречнопараллельно включенные тиристоры и диоды); L_d – входной дроссель; $L_{\rm K}$ – коммутирующие индуктивности; $C_{\rm K}$ – коммутирующий конденсатор; $C_{\rm p}$ – разделительный конденсатор; $Z_{\rm H}$ – нагрузка.



Рис. 6. Резонансный инвертор с удвоением частоты и диодами встречного тока
Fig. 6. Resonant inverter with double frequency and backward diodes

Для реализации поставленных целей необходимо параллельно соединить два инверторных моста, представленных на рис. 6, по цепи высокой частоты с раздельными входными реакторами Ld1 и L_{d2} , а также с двумя разделительными конденсаторами C_{p1} и C_{p2} (рис. 7), где М1, М2 – первый и второй инверторные мосты по схеме рис. 6. Такое включение инверторных мостов позволяет осуществить их параллельную работу и удвоить мощность, выделяемую в нагрузке. Если мощности этих инверторов одинаковы, то сюда можно параллельно подключить другие инверторы, желательно той же мощности. В этом случае получается система централизованного питания (СЦП). Если в СЦП будут находиться инверторы разной мощности, то это может привести к проблемам номинальной загрузки каждого из инверторных мостов.



Puc. 7. Схема PBP (раздельный входной реактор) *Fig.* 7. Scheme with separate input reactors

При указанном подключении инверторных мостов реализуют фазовое регулирование мощности в нагрузке. На рис. 8 приведены системы импульсов управления, подаваемых на инверторные мосты 1 и 2 – i_{ynp1} и i_{ynp2} , при их синфазной работе (первые две оси абсцисс). На третьей оси абсцисс i_{ynp3} показана система импульсов управления, подаваемых с задержкой на фазовый угол ф на второй инверторный мост. При синфазной работе мостов, когда угол $\phi = 0^{\circ}$, в нагрузку передается удвоенная мощность, равная мощности каждого моста. При противофазной работе мостов, когда угол $\phi = 180^{\circ}$, мощность в нагрузке равна нулю.



Fig. 8. Pulse control system of inverter bridges

Последнее обстоятельство дает возможность реализовать низкочастотные ВЧ-импульсы на базе двухмостового инвертора. При противофазной работе напряжение на нагрузке равно нулю, а уменьшение фазового угла ф от 180° до нуля позволяет формировать на нагрузке увеличение напряжения до максимального значения. Такое формирование переднего фронта НЧ-импульса ВЧ-напряжением возможно только при определенной скорости изменения угла сдвига фаз между импульсами управления обоими мостами ИП. Теоретические исследования с использованием математического моделирования электромагнитных процессов в схеме ИП показывают, что при наиболее широко употребляемом способе органи-

зации импульсов управления инверторными мостами скорость изменения фазового сдвига составляет 20 периодов выходной частоты без перенапряжений и перегрузок вентилей в ИП. При выходной частоте 10 кГц разведение мостов из противофазной работы до синфазной равно 2 мс, т. е. передний или задний фронт ВЧ-импульса составляет именно это число. Однако при реализации системы управления ВЧ ИП, приведенной в патенте [10], т. е. при симметричной организации подачи импульсов управления на оба моста при их переводе в противофазный режим работы или, наоборот, в отличие от разведения мостов таким образом, как показано на рис. 8, фронты ВЧ-импульсов удается сократить вдвое до 1 мс. Таким образом, можно утверждать, что минимальное воздействие на зону обработки изделий при выходной частоте инвертора в 10 кГц составляет 2 мс или 5 кГц. Данная частота НЧ воздействия в 3 раза меньше, чем в ИП на базе ЛГ, описанном ранее, на частоте 440 кГц.

Описанный способ управления инверторными мостами может быть видоизменен таким образом, что организуется не просто ИПР работы ИП, а изменяется сама форма НЧ-импульса с ВЧзаполнением, т. е. модуляция высокочастотного напряжения по наперед заданному закону. При эксплуатации ИП, например в случае лазерной резки стекла, при достаточно большом времени воздействия излучения на материал, использование модулированного излучения позволяет упорядочить газо- и гидродинамические процессы в канале реза, что приводит к существенному улучшению качества резки. При этом оптимальная частота модулированного излучения в технологических лазерах лежит в диапазоне 50...2000 Гц. Модуляцию мощности излучения в технологических лазерах наиболее просто осуществить молуляцией выходного напряжения ИП. Частота модуляции должна быть по крайней мере в двадцать раз меньше частоты инвертора.

Заключение. Для реализации современных ВЧ-электротехнологий показано использование различных типов ИП в диапазоне частот от 5 кГц до 13.56 МГц, в диапазоне мощностей от 5 до 1000 кВт. Перевод ИП в ИПР позволяет не только увеличить точность передаваемой мощности в нагрузку, но и оказывать динамическое воздействие на зону термообработки, что существенно повышает качество обрабатываемых изделий.

Список литературы

1. Васильев А. С. Статические преобразователи частоты для индукционного нагрева. М.: Энергия, 1974. 177 с.

2. State of the art and future trends of solid-state power supplies for induction heating / E. J. Dede, J. V. Gon-

.....

LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 6. P. 97–104

zales, V. Esteve, J. Jordan // Proc. of the Int. Induction Heating Seminar HIS-98, May 13–15 Padua, 1998. P.3–10.

3. Методы анализа и управления ламповых генераторов для электротермии / А. С. Васильев, Ю. И. Блинов, Б. В. Коган, Л. В. Сазонов, О. П. Яблонская // Электротехника. 1987. № 8. С. 33–36.

4. Система автоматизированного исследования высокочастотных источников питания для электротехнологий / А. С. Васильев, Ю. И. Блинов, Л. В. Сазонов, О. П. Яблонская // Техн. электродинамика. 1986. № 5. с. 86–92.

5. Автоматизация выбора оптимальных режимов работы ламповых генераторов / А. С. Васильев, Ю. И. Блинов, В. В. Вологдин, Л. В. Сазонов // Сб. науч. тр. ВНИИЭТО «Новая высокочастотная техника для машиностроительного производства». М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 57–61. 6. Пат. 2819661 (RU). Способ предпосевной обработки семян / К. Ю. Блинов, Б. Я. Качанов, Ю. И. Блинов. Заявл. 09.03.23; опубл. 22.05.24. Бюл. № 15. 8 с.

7. Евтянов С. И. Ламповые генераторы. М.: Связь, 1967. 384 с.

8. Пат. 959254 (SU). Устройство для управления статическим преобразователем частоты / Ю. П. Качан, А. Н. Щагин, В. Н. Теплов, А. А. Ружников. Заявл. 03.11.80; опубл. 15.09.82, Бюл. № 34. 3 с.

9. Пат. 312349 (SU). Способ генерирования токов высокой частоты / А. М. Борок, А. С. Васильев, С. Г. Гуревич, А. Е. Слухоцкий, В. В. Царевский. Заявл. 23.01.69; опубл. 19.08.71. Бюл. № 25. 2 с.

10. Пат. 1513594 (SU). Устройство для управления статическим преобразователем частоты / Ю. И. Блинов, А. С. Васильев, А. М. Каргальцев, А. Н. Щагин. Заявл. 27.05.87; опубл. 07.09.89. Бюл. № 37. 4 с.

Информация об авторах

Блинов Кирилл Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ.

E-mail: kyblinov@etu.ru

Качанов Борис Яковлевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ.

E-mail: kachanov-boris@yandex.ru

Блинов Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ. E-mail: yuri-50@mail.ru

http://orcid.org/0000-0002-2620-2079

References

1. Vasil'ev A. S. Staticheskie preobrazovateli chastoty dlja indukcionnogo nagreva. M.: Jenergija, 1974. 177 s. (In Russ.).

2. State of the art and future trends of solid-state power supplies for induction heating / E. J. Dede, J. V. Gonzales, V. Esteve, J. Jordan // Proc. of the Int. Induction Heating Seminar HIS-98, May 13–15 Padua, 1998. P. 3–10.

3. Metody analiza i upravlenija lampovyh generatorov dlja jelektrotermii / A. S. Vasil'ev, Ju. I. Blinov, B. V. Kogan, L. V. Sazonov, O. P. Jablonskaja // Jelektrotehnika. 1987. № 8. S. 33–36. (In Russ.).

4. Sistema avtomatizirovannogo issledovanija vysokochastotnyh istochnikov pitanija dlja jelektrotehnologij / A. S. Vasil'ev, Ju. I. Blinov, L. V. Sazonov, O. P. Jablonskaja // Tehn. jelektrodinamika. 1986. № 5. s. 86–92. (In Russ.).

5. Avtomatizacija vybora optimal'nyh rezhimov raboty lampovyh generatorov / A. S. Vasil'ev, Ju. I. Blinov, V. V. Vologdin, L. V. Sazonov // Sb. nauch. tr. VNIIJeTO Novaja vysokochastotnaja tehnika dlja mashinostroitel'nogo proizvodstva. M.: Jenergoatomizdat, 1988.S. 57–61. (In Russ.).

6. Pat. 2819661 (RU). Sposob predposevnoj obrabotki semjan / K. Ju. Blinov, B. Ja. Kachanov, Ju. I. Blinov. Zajavl. 09.03.23; opubl. 22.05.24. Bjul. № 15. 8 s. (In Russ.).

7. Evtjanov S. I. Lampovye generatory. M.: Svjaz', 1967. 384 s. (In Russ.).

8. Pat. 959254 (SU). Ustrojstvo dlja upravlenija staticheskim preobrazovatelem chastoty / Ju. P. Kachan, A. N. Shhagin, V. N. Teplov, A. A. Ruzhnikov Zajavl. 03.11.80; opubl. 15.09.82. Bjul. № 34. 3 s. (In Russ.).

9. Pat. 312349 (SU). Sposob generirovanija tokov vysokoj chastoty / A. M. Borok, A. S. Vasil'ev, S.G. Gurevich, A. E. Sluhockij, V. V. Carevskij. Zajavl. 23.01.69; opubl. 19.08.71. Bjul. № 25. 2 s. (In Russ.).

10. Pat. 1513594 (SU). Ustrojstvo dlja upravlenija staticheskim preobrazovatelem chastoty / Ju. I. Blinov, A. S. Vasil'ev, A. M. Kargal'cev, A. N. Shhagin. Zajavl. 27.05.87; opubl. 07.09.89. Bjul. № 37. 4 s. (In Russ.).

Information about the authors

Kirill Yu. Blinov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrotechnology and Converter Engineering (ETPT) of Saint Petersburg Electrotechnical University. E-mail: kyblinov@etu.ru **Boris Ya. Kachanov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrotechnology and Converter Engineering (ETPT) of Saint Petersburg Electrotechnical University. E-mail: kachanov-boris@yandex.ru

Yuri I. Blinov – Dr. Sci. (Eng.), professor of the Department of Electrotechnology and Converter Engineering (ETPT) of Saint Petersburg Electrotechnical University. E-mail: yuri-50@mail.ru http://orcid.org/0000-0002-2620-2079

Статья поступила в редакцию 19.03.2025; принята к публикации после рецензирования 05.05.2025; опубликована онлайн 30.06.2025.

Submitted 19.03.2025; accepted 05.05.2025; published online 30.06.2025.

.....