

Цифровые двойники высокочастотных источников 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. Рассматриваются прототипы создания цифровых двойников источников питания, разработанных на различных элементных базах, имеющие устойчивые режимы работы в широком диапазоне изменения параметров нагрузки. Показаны примеры компьютерного моделирования установившихся режимов функционирования таких источников, а также их внешняя и нагрузочная характеристики. Даются конкретные рекомендации по созданию цифровых двойников и упрощению получения их компьютерных и математических моделей. Приведенные подходы могут и должны быть использованы и для других типов источников питания – бортовых, непосредственных преобразователей частоты, инверторов для электропривода, выпрямителей и др.

Ключевые слова: электротехнология, цифровой двойник, высокая частота, инвертор, ламповый генератор

Для цитирования: Блинов К. Ю., Качанов Б. Я., Блинов Ю. И. Цифровые двойники высокочастотных источников питания для электротехнологий // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 1. С. 60–68. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-1-60-68.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Digital Twins of High Frequency Power Supplies for Electrotechnologies

K. Yu. Blinov, B. Ya. Kachanov, Yu. I. Blinov✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ yuri-50@mail.ru

Abstract. Prototypes for development of digital twins for power supplies designed with different semiconductor and other element with stable operating modes in a wide range of load parameters change are considered. Examples of computer simulation of steady-state modes of such power supplies, as well as their external and load characteristics, are shown. Specific recommendations are given on how to create digital twins and simplify obtaining their computer and mathematical models. These approaches can and should be used for other types of power supplies, such as on-board, direct frequency converters, inverters for electric drives, rectifiers, etc.

Keywords: electrotechnology, digital twin, high frequency, inverter, vacuum-tube generator

For citation: Blinov K. Yu., Kachanov B. Ya., Blinov Yu. I. Digital Twins of High Frequency Power Supplies for Electrotechnologies // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 1. P. 60–68. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-1-60-68.

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

Электротехнология постоянно развивается и занимает одно из ведущих мест в техническом прогрессе [1]–[3]. В современной высокочастотной (ВЧ) электротехнологии следует отметить следующие быстро развивающиеся направления:

- ВЧ-электротехнологии для получения новых, современных материалов с заранее прогнозируемыми свойствами за счет решения задач оптимизации и синтеза;

- индукционная плавка диэлектрических материалов в холодных тиглях для различных применений;

- электротехнологии для обработки цветных металлов в вакуумной среде с регулируемой газовой атмосферой при различном давлении, частоте и напряжении;

- импульсные ВЧ-электротехнологии с электромагнитным воздействием на технологическую зону обработки с низкочастотной модуляцией напряжения и мощности;

- технологии предварительного индукционного нагрева заготовок со сложной формой исполнения из различных материалов и в дальнейшем конечной точечной обработкой для получения востребованных свойств промышленностью;

- разработка непотопляемых металлов, обладающих супергидрофобными свойствами при обработке фемтосекундным лазером;

- разработка термостабильной керамики типа нитрида углерода гафния (HfC_xN_y) с температурой плавления около 4200 °С;

- получение композитных материалов различного назначения, например для производства труб с их покрытием различными материалами; многие другие.

Разработка данных технологий и оборудования (установок) для их реализации недостижима без применения новых, современных и прогрессивных методов их создания. Установки для получения новых или модернизации старых электротехнологических процессов представляют собой энергоемкое оборудование, мощность которого может составлять десятки и сотни киловатт, растет энергопотребление электротехнологических установок и высокая стоимость энергоресурсов приводит к необходимости повышения эффективности работы такого оборудования. Электротехнологическая установка – это очень сложное электротехническое и технологическое оборудование. В связи с тем, что электротехнологическая установка состоит из ряда простых зве-

ньев, необходимо повышать эффективность каждого из них. Кроме того, каждая часть установки должна быть изучена как ее уникальная составляющая, а затем необходимо провести общее и поэтапное исследование этого объекта как единого целого, учитывая взаимное влияние его звеньев друг на друга [4].

Современные электротехнические процессы требуют разработки современных источников питания (ИП), например имеющих стабильные режимы работы в очень широком диапазоне изменения параметров технологического звена. Разработка таких ИП требует изучения теории их устойчивости при изменении нагрузки, а также возможности широкого изучения режимов их работы совместно с технологическим звеном. Такое исследование становится возможным только при условии применения принципов компьютерного и численного математического моделирования технологического процесса и самих цепей питания. Схемы электроснабжения описываются системами обыкновенных дифференциальных уравнений высокого порядка с нелинейными коэффициентами.

Для диапазона частот до 13.56 МГц и диапазона мощностей до 1 МВт широко используются ламповые генераторы (ЛГ) с самовозбуждением и полупроводниковые инверторы. В прошлом были разработаны тиристорные/транзисторные инверторы (ТИ) на частоту до 1 МГц и мощностью до 1 МВт [2], но электротехнологические процессы для плавки некоторых оксидов в холодном тигле требуют частоты 1.76 или 5.28 МГц при мощности до 400...1000 кВт. Сегодня в этом диапазоне частот и мощностей одновременно может работать только «старый» источник питания – ламповый генератор. Это особенно важно для остекловывания радиоактивных отходов или физического моделирования аварийных ситуаций при эксплуатации ядерных реакторов на атомных электростанциях. Также для этих целей могут быть использованы ТИ, но условия согласования между генератором и технологическим звеном становятся все более сложными. Выходное напряжение ЛГ достаточно высокое и подходит для разработанных технологий плавки оксидов в холодном тигле. Выходное напряжение ТИ в разы меньше, чем у ЛГ, и высоковольтный ВЧ-трансформатор должен быть установлен между индуктором и ТИ, что также представляет достаточно большую проблему, решением которой может стать разработка новой теории низковольтного питания холодного тигля.

Сложность задачи обусловлена сложностью не только самого ИП как нелинейного объекта, но и совместной оценки режима работы инвертора/ЛГ и нагрузки. В подавляющем большинстве случаев инвертор/ЛГ и нагрузка оказывают взаимное влияние друг на друга, и рассмотрение их по отдельности часто не позволяет реализовать не только требуемое качество, но и достижимость электротехнологического процесса.

Стабильность режима работы электротехнологической установки зависит от самого процесса, стабильности режима работы ИП и взаимной устойчивости всей электротехнологической системы. Например, при работе индукционной или ВЧ плазменной установки необходимо изготовить специальный тип плазменного звена, выбрать или разработать «хорошую» схему ЛГ, обеспечить их взаимный стабильный режим работы при различном количестве принимаемого газа, геометрических размерах плазменного звена и требуемом уровне ВЧ-напряжения. Кроме того, рабочая точка ИП должна быть выбрана на специальной части внешней характеристики ЛГ, которая соответствует характеристике источника тока. Только в этой области вся электротехническая система будет работать стабильно. Однако эта установка очень опасна из-за присутствия значительного количества озона, который образуется из-за большой температуры при высокой частоте и ВЧ-напряжении. Только вентиляционная система с высокой стоимостью может помочь реализовать безопасный ВЧ плазменный электротехнологический процесс.

К сожалению, идеи устойчивости теории Ляпунова или Найквиста не нашли широкого применения в силовой электронике. В ходе исследования была сделана попытка найти что-то приемлемое для электротехнологических процессов, но к успеху она не привела. Также в этой конкретной области не используются идеи теории катастроф [5] и идеи академика Арнольда [6]. В последние годы появились свежие публикации ([7]), в силу чего в теории ВЧ ИП касательно схем ЛГ оперируют только предыдущими идеями академика Берга.

В последнее время из-за расширения возможностей достижимости электротехнологических процессов очень востребованы импульсные и импульсно-периодические режимы работы ИП. Эти режимы подобны широко известному широко-импульсному (ШИМ) режиму модуляции мощности в нагрузке различными ИП. Однако

есть и отличия: в режиме ШИМ пользователь управляет только дозированной передачей мощности в нагрузку, а в электротехнологическом исполнении – еще и электромагнитным воздействием на зону обработки для получения требуемых технологических эффектов.

Полупроводниковые ИП применяются для достижения технологического эффекта обычно в диапазоне частот от единиц до нескольких сотен килогерц, соответственно, они могут быть разработаны и на транзисторной элементной базе. Анализ схемных решений, используемых в инверторах, показывает, что для целей индукционного нагрева, где возможно короткое замыкание обмотки индуктора и, по сути, переход в режим короткого замыкания, целесообразно использовать резонансные инверторы [1]. Профессор Е. Dede поясняет, что классические параллельные и последовательные инверторы тока и напряжения и даже алгоритмы и компьютерные системы управления не гарантируют сохранности транзисторов ИП в аварийных режимах. Кроме того, в последних работах он предлагает вводить дополнительные RL -элементы на выходе инверторов для их подключения при коротком замыкании нагрузки. Его окончательный вердикт: «использование резонансных инверторов в индукционном нагреве должно быть осуществлено».

В связи с широкой номенклатурой выпускаемых ИП довольно-таки сложно сделать выбор в пользу той или другой схемной конфигурации ИП, его преимуществ и достоинств, его универсальности в применении к конкретным электротехнологиям. Значительную помощь здесь может оказать появление технологии цифровых двойников (ЦД). Публикации, посвященные ЦД ИП, а особенно ВЧ ИП для электротехнологий, отсутствуют.

Стандарт «определяет общие положения создания цифровых двойников как для вновь разрабатываемых изделий (еще не созданных), так и для ранее спроектированных или уже эксплуатируемых изделий».

В отечественной промышленности до сих пор в эксплуатации находится огромное количество различных типов ИП, и создание их ЦД помогло бы интенсифицировать их замену на более современные и энергоэффективные, если это необходимо и возможно.

Источники питания – важнейший раздел электротехники, а их рациональное и эффективное применение в электротехнологии определяет технологическое превосходство в развитии современной техники и достижимости различных технологических процессов.

Для создания ЦД нужны математические и компьютерные модели ИП, которые можно классифицировать как «ручные», базовые, специализированные, универсальные. Каждый из этих типов моделей имеет свои достоинства и недостатки.

«Ручные» модели появились в 1960–70-е гг. [8]. В этом случае записывались уравнения, описывающие ИП, которые затем решались при введении дополнительных громоздких ограничений или условий. Моделировались в основном процессы в силовой части ИП.

Затем появились базовые модели, которые, естественно, строились на основе «ручных», но имели некоторые конкретные подходы к моделированию целевых групп ИП, например инверторов, выпрямителей, непосредственных преобразователей частоты и т. д.

Специализированные модели анализировали электромагнитные процессы в конкретных ИП для различных электротехнологических технологий и других применений, например для бортовых ИП.

Универсальные модели появились в связи с разработкой профессиональных программ анализа электронных схем, которые позволяли анализировать и схемы ИП. В этом случае появилась возможность моделировать электромагнитные процессы не только в силовой части ИП, но и в его системе управления.

Анализ публикаций за последние десятилетия показывает, что первый ЦД в области ВЧ ИП

представлен в работе И. А. Корницкого [8] при анализе схемы инвертора с удвоением частоты и диодами встречного тока рис. 1 и оформлен в виде отчета и публикации [8].

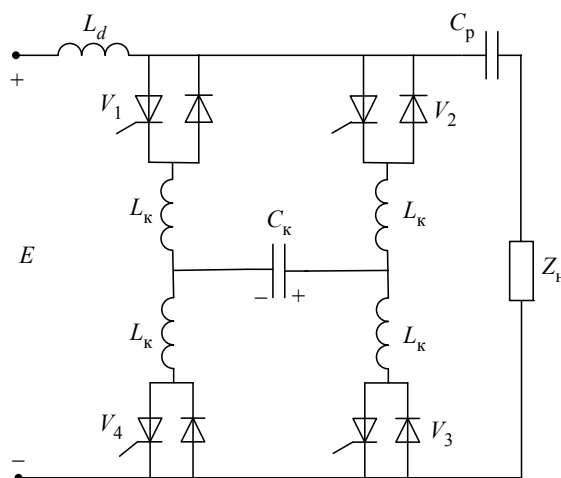


Рис. 1. Резонансный инвертор с удвоением частоты и диодами встречного тока

Fig. 1. Resonant inverter with double frequency and backward diodes

В табл. 1 показан пример одной из таблиц стационарных режимов для создания ЦД указанного инвертора при относительных параметрах $\beta = 2$; $n_0 = 1.8$; $\cos \varphi_H = 0.4$; $\cos \psi = 1$.

Эта таблица дана в относительных (безразмерных параметрах), где K_H – коэффициент нагрузки; K_C – коэффициент распределения емкостей; t_0 – время, предоставляемое тиристором

Табл. 1. Стационарные режимы инвертора с удвоением частоты и диодами встречного тока
Tab. 1. Stationary modes of resonance inverter with double frequency and backward diodes

Параметр	K_H							
	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0
K_C	0.150	0.300	0.600	0.880	1.176	1.764	2.352	2.939
t_0	0.532	0.508	0.759	0.819	0.825	0.800	0.78	0.762
t_k	0.580	0.610	0.663	0.662	0.671	0.710	0.730	0.732
t_2	0.112	0.118	0.422	0.481	0.496	0.510	0.510	0.493
R_{BX}	2.705	1.388	0.897	1.163	1.497	2.127	2.802	3.443
U_{Bm}	1.469	1.781	2.237	2.271	2.258	2.224	2.151	2.146
I_{Tm}	2.487	2.836	3.366	3.081	2.830	2.575	2.475	2.393
I_{dm}	-1.598	-1.085	-0.393	-0.828	-1.130	-1.438	-1.622	-1.795
I_{tcp}	0.457	0.533	0.651	0.582	0.531	0.479	0.454	0.442
$I_{d, cp}$	-0.272	-0.174	-0.900	-0.155	-0.200	-0.247	-0.278	-0.301
U_k	1.502	1.580	1.838	1.876	1.881	1.886	1.877	1.861
$U_{p\sim}$	0.750	0.715	0.645	0.470	0.352	0.244	0.200	0.190
U_H	0.251	0.489	0.874	0.929	0.940	0.954	0.969	1.027
U_{H1}	0.251	0.488	0.872	0.926	0.935	0.940	0.925	0.891
I_p	1.515	1.456	1.309	0.963	0.748	0.570	0.540	0.620
I_{p1}	1.500	1.437	1.282	0.928	0.700	0.470	0.350	0.270

для восстановления своих свойств; t_k – время одновременной коммутации вентиля; t_2 – время обратной проводимости вентиля; $R_{вх}$ – входное сопротивление инвертора; $U_{вм}$ – максимальное напряжение на вентиле; $I_{тм}$ – максимальный ток тиристора; $I_{дм}$ – максимальный ток обратного диода; $I_{тср}$ – средний ток через тиристор; $I_{дср}$ – средний ток через обратный диод; U_k – напряжение на коммутирующем конденсаторе; $U_{р\sim}$ – переменная составляющая напряжения на разделительном конденсаторе; U_H – напряжение на нагрузке; U_{H1} – первая гармоника напряжения на нагрузке; I_p – ток разделительного конденсатора; I_{p1} – первая гармоника тока через разделительный конденсатор; β – коэффициент распределения значений разделительного C_p и коммутирующего C_k конденсаторов схемы $\beta = (C_k + C_p)/C_k$; $n_0 = \omega_k/\omega_3$ – относительная частота коммутирующего контура, где ω_k – частота коммутирующего контура, а ω_3 – задающая частота генератора импульсов управления, подаваемых на тиристоры вентильного моста; $\cos \varphi_H$ – коэффициент мощности индуктора; $\cos \psi$ – коэффициент мощности нагрузочного контура.

Параметры в первом столбце имеют конкретные смысловые значения, характеризующие данную схему, но не имеющие значения для данной публикации, например коэффициент нагрузки, время, предоставляемое тиристорам для восстановления их свойств, и т. д.

При этом параметр β принимал значения 1.6; 1.8; 2.0; 2.2; 2.4; параметр n_0 – 1.6; 1.8; 2.0; 2.2; 2.4; $\cos \varphi_H = 0.4$; $\cos \psi = -0.8$; -0.9 ; 1.0 ; $+0.9$; $+0.8$ (емкостная или индуктивная расстройка нагрузочного контура).

Таким образом, совокупность из 125 таблиц полностью характеризовала схему инвертора (рис. 1) для представления в ЦД.

Применяя последовательно-параллельный подход к математическому и компьютерному моделированию ИП, можно перейти и к созданию его ЦД. Последовательный подход предполагает разработку математической модели ИП отдельно, а затем переход к ее компьютерной модели. Параллельный подход «увязывает» обе модели в единое целое, когда «вдруг», в силу различных обстоятельств, оказывается, что какая-то модель облада-

ет ограниченной адекватностью при разработке исходного цифрового двойника и необходима коррекция какого-то из предыдущих этапов моделирования.

На рис. 2 приведен вентильный режим резонансного инвертора с удвоением частоты и диодами встречного тока, а также напряжение на коммутирующем конденсаторе u_{C_k} ; i_{v1} – ток первого моста; i_{v2} – ток второго моста. Показанные диаграммы демонстрируют сложность процессов, протекающих в схеме, а также существенную нелинейность процессов в ней.

На рис. 3 ($U_{ввых}$ – выходное напряжение инвертора; $I_{ввых}$ – выходной ток инвертора) приведена внешняя характеристика инвертора на мощность 15 кВт и частоту 10 кГц, которая имеет участок с крутопадающей внешней характеристикой, соответствующей характеристике источника тока, что важно для ряда электротехнологических применений, например сварочных технологий.

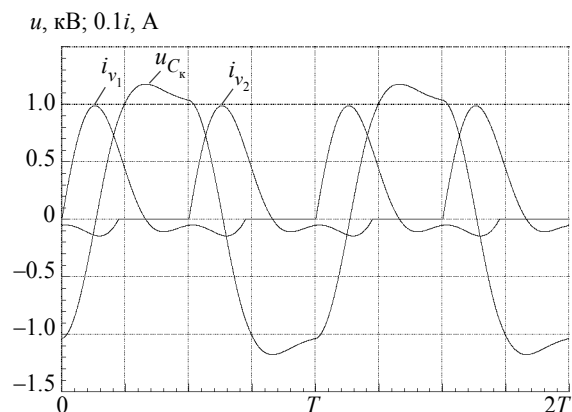


Рис. 2. Вентильный режим резонансного инвертора с удвоением частоты и диодами встречного тока

Fig. 2. Valve mode of resonant inverter with double frequency and backward diodes

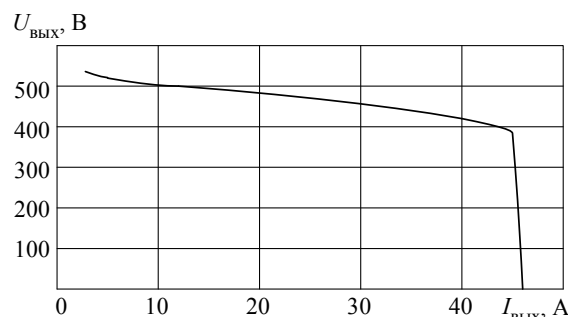


Рис. 3. Внешняя характеристика резонансного инвертора с удвоением частоты и диодами встречного тока при чисто активной нагрузке

Fig. 3. External characteristic of resonant inverter with double frequency and backward diodes at pure resistive load

При составлении моделей ИП для ЦД необходимо учитывать, что для вентильных схем по-прежнему не решен вопрос о единственности решения сложных нелинейных систем дифференциальных уравнений, которыми и описываются ИП [9]. Подтверждение последнего факта приведено в [10], где показано, что в зависимости от значений начальных условий возможны выходы на различные стационарные режимы работы ВЧ-инвертора.

Результаты, аналогичные ТИ, были получены и для других типов ИП – ЛГ. При анализе режимов работы [9], по сути дела, представлен ЦД установки ВЧГ4-10/1.76, где показаны таблицы его стационарных режимов.

Далее приводятся данные установки ВЧГ4-10/1.76. Установка собрана по одноконтурной схеме ЛГ с самовозбуждением (рис. 4), где введены следующие обозначения: E_a – постоянное анодное питание; $L_{a,б}$ – анодный блокировочный дроссель; $C_{a,р}$ – анодный разделительный конденсатор; L_{OC} – регулятор цепи обратной связи (ОС); $C_{бл}$ – блокировочный конденсатор цепи ОС; $L_{гб}$ – сеточный блокировочный дроссель; C_{gf} – конденсатор цепи ОС; $C_{гр}$, $R_{гр}$ – конденсатор и резистор цепи гридика; C_H , L_H , R_H – соответствующие параметры нагрузочного контура.

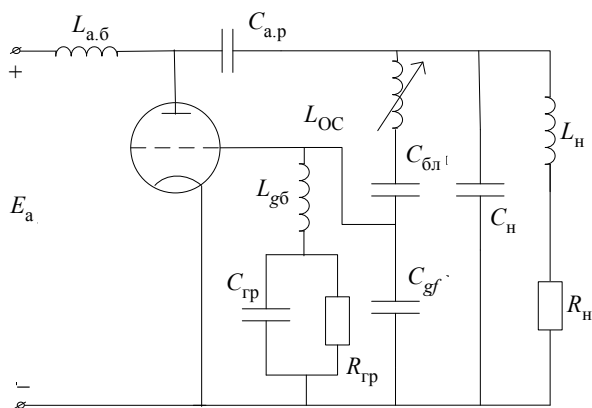


Рис. 4. Схема замещения установки ВЧГ4-10/1.76
Fig. 4. Substitution scheme of the VCHG4-10/1.76 installation

На рис. 5 приведен режим работы генераторного триода ГУ-59А для данной установки в граничном или критическом режиме работы, а на рис. 6 (i_g – сеточный ток; u_g – сеточное напряжение) – в сильноперенапряженном режиме, где явно виден провал анодного тока i_a до нуля, обусловленный отрицательными значениями напряжения на аноде u_a триода на коротком временном

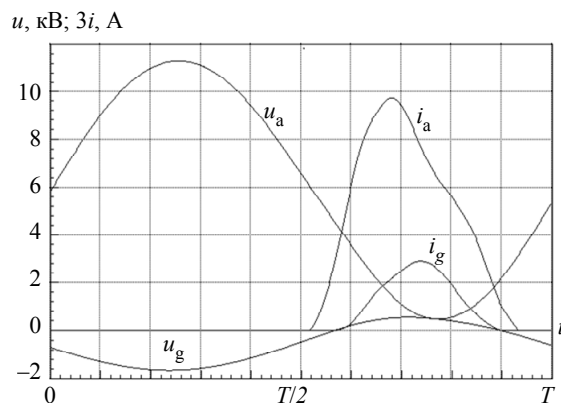


Рис. 5. Граничный/критический режим работы триода ГУ59А в установке ВЧГ4-10/1.76

Fig. 5. The boundary/critical operation mode of the GU59A triode in the VCHG4-10/1.76 installation

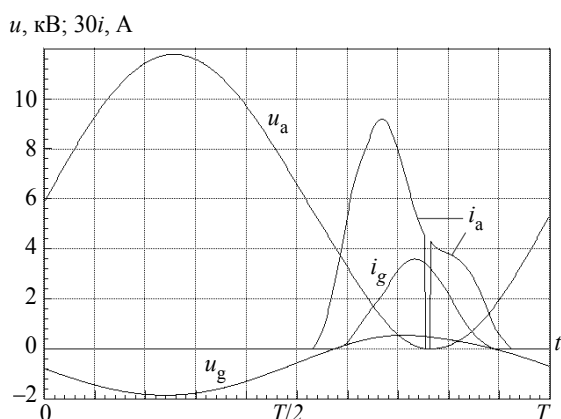


Рис. 6. Сильноперенапряженный режим работы триода ГУ59А в установке ВЧГ4-10/1.76

Fig. 6. Highly overvoltage operation mode of the GU59A triode in the VCHG4-10/1.76 installation

интервале, соответствующем времени провала в графике анодного тока.

Рассчитанные стационарные режимы работы ЛГ могут быть сведены в базу данных таблиц стационарных режимов при различных параметрах схемы. Так, для указанной схемы применяются следующие возможности регулирования напряжения/мощности на выходе: изменение положения L_{OC} , а значит, и коэффициента обратной связи β , вариация постоянного анодного напряжения E_a . Однако было замечено, что изменение E_a подвержено определенной закономерности, связанной с линейным изменением всех интегральных параметров схемы в диапазоне изменения E_a от максимального значения 6 кВ до 4 кВ.

Данный факт положен в основу табл. 2 ($R_{экв}^*$ – относительное эквивалентное сопротивление нагрузочного контура; K_u – коэффициент пересчета по напряжению и току; K_p – коэффициент

пересчета по мощности), где, имея стационарные режимы нагрузочных характеристик для различных эквивалентных сопротивлений $R_{\text{экв}}$ при $E_a = 6$ кВ, можно их пересчитать и для других значений E_a . Данный факт справедлив и для схем ЛГ, что подтверждается поверочными расчетами ряда схемных решений.

Для схем ЛГ, как и для ТИ, по-прежнему не определена единственность решения при их выходе на стационарный режим работы.

Также существует проблема минимального количества параметров и того, каким именно можно и нужно определять режим работы ЛГ. Существует опасность, что набор выбранных измеряемых параметров может указывать на другой режим работы ИП. На базе длительного практического опыта работы с ЛГ сделано следующее заключение: напряжения на аноде, сетке, нагрузке и постоянное анодное напряжение дают полную и единственную картину режима работы ЛГ. Однако на лицевой панели ВЧГ стоят амперметры анодного и сеточного токов, а также вольтметр, измеряющий постоянное анодное напряжение. Это объясняется тем, что измерение ВЧ-напряжения существующими приборами на разных частотах довольно-таки сложно, в отличие от простого измерения постоянных составляющих анодного и сеточного токов. Более того, практический опыт показывает, что для лампы ГУ-66А околооптимален режим при постоянной составляющей анодного тока, равной 7 А, а сеточного – 2 А. Для генераторного триода ГУ-59А оптимальные параметры достигаются при постоянной составляющей анодного тока 2...2.5 А, а сеточной – 0.5...0.7 А (рис. 7, где R_H – сопротивление нагрузки; P_H – мощность в нагрузке). Таким образом, на практике при составлении ЦД могут быть реализованы два вышеприведенных подхода.

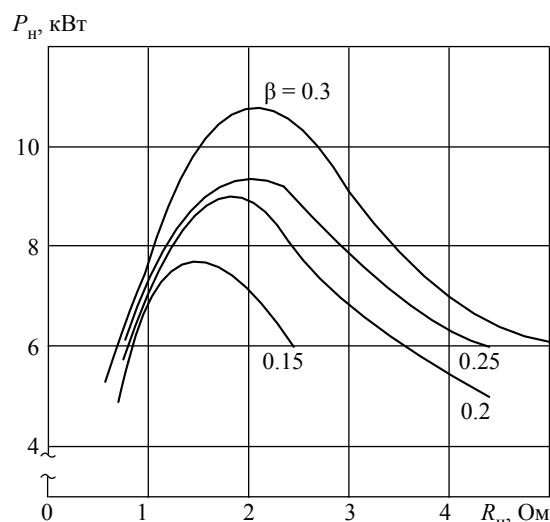


Рис. 7. Нагрузочные характеристики установки ВЧГ4-10/1.76
Fig. 7. Load characteristic of the VCHG4-10/1.76 installation

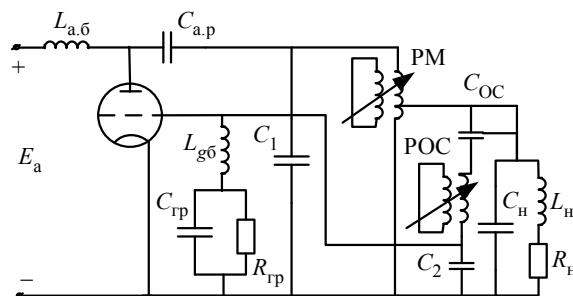


Рис. 8. Двухконтурная схема лампового генератора с самовозбуждением
Fig. 8. Two-tank circuit of vacuum-tube generator with self-exciting

Данный подход реализован и для установки ВЧГ9-60/0.44 рис. 8 [9], для которой также получены таблицы стационарных режимов, таблица пересчета, но с учетом двух контуров схемы в колебательной системе и наличия дополнительного элемента к уже имеющемуся регулятору мощности РМ (C_1 – емкость первого контура; C_2 – емкость цепи сетки; C_{OC} – емкость цепи ОС).

Табл. 2. Стационарные режимы нагрузочных характеристик ЛГ
Tab. 2. Stationary modes of load characteristics of the vacuum-tube generator

$R_{\text{экв}}^*$	$E_a, \text{кВ}$					$E_a, \text{кВ}$				
	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0
	K_u					K_p				
0.3	1.0	1.1	1.2	1.45	1.7	1.0	1.2	1.55	2.0	2.9
0.5	1.0	1.1	1.2	1.4	1.6	1.0	1.2	1.5	1.9	2.4
0.7	1.0	1.1	1.2	1.4	1.5	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4
0.8	1.0	1.1	1.2	1.4	1.5	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4
1.0	1.0	1.1	1.2	1.4	1.5	1.0	1.2	1.5	1.8	2.3
2.0	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.0	1.2	1.45	1.8	2.3
3.0	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.0	1.2	1.5	1.8	2.3
4.0	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.0	1.2	1.4	1.8	2.2

Выводы. При получении (расчете на моделях) нагрузочных характеристик ИП необходимо учитывать способ изменения параметров нагрузочного контура, который зачастую моделирует индуктор с компенсирующей его емкостью. Так, для ТИ для изменения эквивалентного сопротивления нагрузочного контура необходимо менять все три параметра R , L , C одновременно и пропорционально в сторону как увеличения, так и уменьшения. При этом достигается плавность хода снимаемых нагрузочных, регулировочных и внешних характеристик ИП. Данный подход применительно к схемам ЛГ дает «уход» частоты от заданной частоты самовозбуждения и получению характеристик схемы, которые малоинформативны для дальнейшего использования. Поэтому для схем ЛГ изменяется только активное сопротивление индуктора, а значит, и эквивалентное сопротивление не только нагрузочного контура, но и всей колебательной системы.

Таким образом, выявлены быстро развивающиеся направления современной ВЧ-электротехнологии. Показано, что по-прежнему широко применяются ламповые генераторы и тиристорные/транзисторные инверторы, имеющие стабильные режимы работы в широком диапазоне изменения параметров нагрузки. Показаны примеры компьютерного моделирования их установившихся режимов, а также внешняя и нагрузочная характеристики источника питания. Доказывается, что образчики создания цифровых двойников источников питания, разработанных на различных элементных базах, могут и должны быть использованы и для других типов источников питания – бортовых, непосредственных преобразователей частоты, инверторов для электропривода, выпрямителей и т. д.

Список литературы

1. Rudnev V., Loveless D., Cook R. Handbook of induction heating. 2nd ed. Boca Raton, Florida: CRC press, 2017. 772 p.
2. Rudnev V. Implications of induction hardening // Heat Proc. J. 2018. No. 3. P. 103–105.
3. Mühlbauer A., Starck A., Kramer K. Handbook of thermoprocessing technologies. Essen, Germany: Vulkan-Verlag GmbH, 2007. 820 p.
4. Egan L. R., Furtani E. P. A computer simulation of an induction heating system // IEEE Transactions on Magnetics. 1991. Vol. 27, no. 5. P. 4343–4353. doi: 10.1109/20.105060.
5. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф / пер. изд. М.: Мир, 1984. 350 с.
6. Арнольд В. И. Теория катастроф. М.: URSS, 2004. 128 с.
7. Кузнецов Н. В. Теория скрытых колебаний и устойчивость систем управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2020. № 5. С. 5–27. doi: 10.31857/S0002338820050091.
8. Корницкий И. А. Исследование электромагнитных процессов в вентильных преобразователях частоты для электротермии на цифровых моделях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.10.07 / ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина). Л., 1976. 16 с.
9. Васильев А. С. Статические преобразователи частоты для индукционного нагрева. М.: Энергия, 1974. 177 с.
10. Устойчивость работы электротехнологической нагрузки от высокочастотного источника питания / Ю. И. Блинов, К. Ю. Блинов, С. А. Галунин, С. Г. Гуревич, В. В. Ишин, Б. Я. Качанов, Э. Р. Маннанов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 9. С. 54–58.

Информация об авторах

Блинов Кирилл Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: kyblinov@etu.ru

Качанов Борис Яковлевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: kachanov-boris@yandex.ru

Блинов Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: yuri-50@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-2620-2079>

References

1. Rudnev V., Loveless D., Cook R. Handbook of induction heating. 2nd ed. Boca Raton, Florida: CRC press, 2017. 772 p.
2. Rudnev V. Implications of induction hardening // Heat Processing J. 2018. No. 3. P. 103–105.
3. Mühlbauer A., Starck A., Kramer K. Handbook of thermoprocessing technologies. Essen, Germany: Vulkan-Verlag GmbH, 2007. 820 p.
4. Egan L. R., Furtani E. P. A computer simulation of an induction heating system // IEEE Transactions on Magnetics. 1991. Vol. 27, no. 5. P. 4343–4353. doi: 10.1109/20.105060.
5. Gilmor R. Pribladnaja teorija katastrof / per. izd. M.: Mir, 1984. 350 s. (In Russ.).
6. Arnol'd V. I. Teorija katastrof. M.: URSS, 2004. 128 s. (In Russ.).
7. Kuznecov N. V. Teorija skrytyh kolebanij i ustojchivost' sistem upravlenija // Izv. RAN. Teorija i sistemy upravlenija. 2020. № 5. S. 5–27. doi: 10.31857/S0002338820050091. (In Russ.).
8. Kornickij I. A. Issledovanie jelectromagnitnyh processov v ventil'nyh preobrazovateljah chastoty dlja jelectrotermii na cifrovych modeljah: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.10.07 / LjeTI im. V. I. Ul'janova (Lenina). L., 1976. 16 s. (In Russ.).
9. Vasil'ev A. S. Sticheskie preobrazovateli chastoty dlja indukcionnogo nagreva. M.: Jenergija, 1974. 177 s. (In Russ.).
10. Ustojchivost' raboty jelectrotehnologicheskoy nagruzki ot vysokochastotnogo istochnika pitaniya / Ju. I. Blinov, K. Ju. Blinov, S. A. Galunin, S. G. Gurevich, V. V. Ishin, B. Ja. Kachanov, Je. R. Mannanov // Izv. SPbGJeTU «LjeTI». 2014. № 9. S. 54–58. (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 Ing., 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 09.09.2025; принята к публикации после рецензирования 27.11.2025; опубликована онлайн 29.01.2026.

Submitted 09.09.2025; accepted 27.11.2025; published online 29.01.2026.
