

Моделирование динамических режимов в системе электропитания группы магнетронных генераторов

И. И. Артюхов

Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.
ivart54@mail.ru

А. И. Земцов

Филиал Самарского государственного технического
университета в г. Сызрани
artex283@mail.ru

Аннотация. Промышленные электротехнологические установки с распределенным подводом СВЧ энергии могут иметь в своем составе несколько СВЧ-генераторов на магнетронах пакетированного типа. При этом в целях унификации конструкции производители электротехнологических установок комплектуют каждый СВЧ-генератор своим источником питания. С одной стороны, такое решение позволяет оперативно изменять режим работы каждого из СВЧ-генераторов, с другой стороны, требует применения соответствующего количества высоковольтных блоков, что не способствует достижению оптимальных массогабаритных и стоимостных показателей.

В этой связи актуальной является задача создания системы централизованного электропитания группы пакетированных магнетронов, обладающей возможностью оперативной подстройки режима работы каждого прибора по анодным цепям. В статье рассматриваются особенности построения и функционирования такой системы. Для исследования динамических режимов разработана имитационная модель в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink. По результатам виртуальных экспериментов установлено влияние параметров автоматического регулятора на качество переходных процессов в системе электропитания трех пакетированных магнетронов.

Ключевые слова: магнетрон; система электропитания; динамические режимы; имитационное моделирование

I. ВВЕДЕНИЕ

Для построения источников СВЧ-энергии в настоящее время имеется широкая гамма электронных приборов. По ряду причин наиболее часто применяются магнетроны, которые различаются системами создания магнитного поля [1,2]. В каталогах фирм-изготовителей электронного оборудования заявлены как пакетированные магнетроны (со встроенными магнитами), так и магнетроны с электромагнитами. Известны также магнетроны с комбинированной магнитной системой.

Функционирование пакетированного магнетрона осуществляется с помощью системы электропитания из двух источников, один из которых осуществляет накал катода, другой служит для питания анодной цепи. Для

магнетрона с электромагнитом требуется еще источник с возможностью регулировки тока электромагнита.

Промышленные электротехнологические установки, использующие энергию СВЧ-колебаний, могут иметь в своем составе несколько магнетронных генераторов [3]. В системах с распределенным подводом СВЧ-энергии достаточно часто применяют пакетированные магнетроны.

В существующих установках регулировка выходной мощности СВЧ-генераторов на магнетронах пакетированного типа осуществляется за счет изменения длительности подачи напряжения на анодную цепь магнетрона. Данный способ регулировки имеет ряд существенных недостатков, один из которых – невозможность дозированной подачи СВЧ-энергии на объект обработки. В работах [4, 5] и ряде других показана возможность регулирования выходной мощности пакетированного магнетрона за счет изменения анодного напряжения.

Пакетированные магнетроны имеют разброс электрических характеристик даже среди моделей одного номинала. Это обусловлено технологическим разбросом характеристик постоянных магнитов, входящих в конструкцию пакетированного магнетрона. Поэтому для обеспечения заданного режима работы СВЧ-генераторов при централизованном питании анодных цепей необходимо осуществлять автоматическую подстройку каждого магнетрона.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Режим работы магнетрона по анодной цепи определяется точкой пересечения вольт-амперной характеристики магнетрона и внешней характеристики источника анодного питания. Для анализа работы магнетронного генератора используется набор приближенных магнетронных вольт-амперных характеристик или кривых I-V, как показано на рис. 1. Кривая I-V магнетрона начинается с крутой области, показанной пунктирной линией. Область с небольшим наклоном от оси I, представляющая режим излучения магнетрона, следует за точкой изгиба. В области анодных напряжений, меньших порогового напряжения ($U_a < U_0$),

условия синхронизации между носителями заряда и высокочастотным полем не выполняются, поэтому колебания и ток анода не индуцируются. Самовозбуждение магнетрона и внезапное увеличение анодного тока происходят, как только напряжение анода достигает порога. Впоследствии небольшое изменение анодного напряжения U_a приводит к резким изменениям анодного тока I_a , величина которого определяется пропускной способностью катодного излучения.

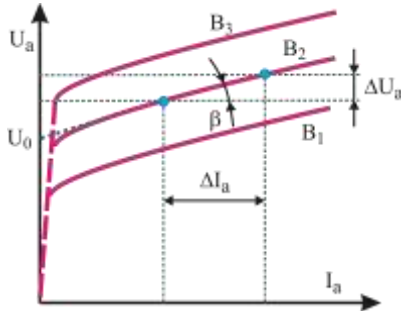


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики магнетрона для различных значения магнитной индукции ($B_1 < B_2 < B_3$).

Важным параметром магнетрона является его динамическое сопротивление, которое определяется по формуле

$$R_d = \Delta U_a / \Delta I_a = \operatorname{tg} \beta. \quad (1)$$

При исследовании источников питания для СВЧ-установок магнетрон представляется в виде модели, которая состоит из последовательно соединенного идеального диода с пороговым напряжением и резистора, значение которого соответствует динамическому сопротивлению магнетрона [6] – [8].

ВАХ магнетрона при такой кусочно-линейной аппроксимации имеет вид

$$U_a = R_d \cdot I_a + U_0, \quad (2)$$

где R_d, U_0 – соответственно динамическое сопротивление и пороговое напряжение магнетрона.

Внешняя характеристика источника анодного питания может быть представлена следующим образом

$$U_a = E - R_s \cdot I_a, \quad (3)$$

где E, R_s – ЭДС и внутреннее сопротивление источника питания соответственно.

Из (2) и (3) получим выражение для определения анодного тока

$$I_a = (E - U_0) / (R_s + R_d). \quad (4)$$

Таким образом, требуемое значение анодного тока можно получить за счет изменения ЭДС источника анодного питания или его внутреннего сопротивления.

Принципы управления режимом работы магнетрона иллюстрируют рис. 2 и 3.

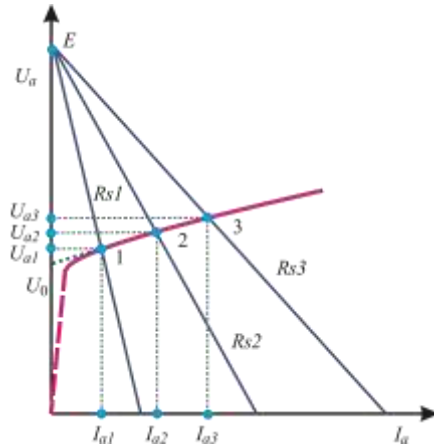


Рис. 2. Управление режимом работы пакетированного магнетрона изменением внутреннего сопротивления источника ($R_{s1} > R_{s2} > R_{s3}$)

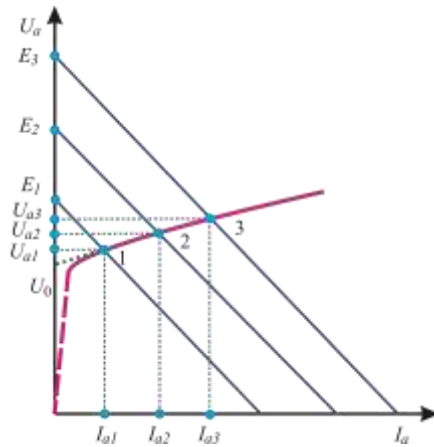


Рис. 3. Управление режимом работы пакетированного магнетрона изменением ЭДС источника ($E_1 > E_2 > E_3$)

При фиксированной величине ЭДС необходимое изменение режима работы магнетрона может быть получено за счет включения в цепь анодного питания каждого из магнетронов добавочного сопротивления. Однако данный метод не позволяет оперативно менять режим работы магнетронов. Для перенастройки режима работы магнетронов требуется отключение установки, что может оказаться невозможным при реализации того или иного технологического процесса. Кроме того, наличие добавочных сопротивлений приведет к дополнительным потерям мощности, что отрицательно скажется на величине КПД установки.

При неизменной жесткости внешней характеристики источника питания к изменению режима работы магнетрона приводит ее параллельное перемещение. Задачу оперативного управления режимом работы группы магнетронов в этом случае можно решить за счет включения в анодную цепь каждого магнетрона дополнительного источника питания по принципу

вольтодобавки. Подобное решение представляется перспективным, так как позволяет не только оперативно настраивать каждый магнетронный генератор в группе на требуемый режим работы, но и может быть реализовано электрооборудованием, масса, габариты и стоимость которого будет меньше, чем аналогичные показатели установки с индивидуальными источниками питания.

III. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Изучение процессов в электротехническом комплексе, который включает источники энергии, полупроводниковые преобразователи и большое количество индуктивных и емкостных элементов, представляет собой довольно сложную задачу. Математическая модель, описывающая такой сложный комплекс, представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. Поэтому для исследования динамических режимов в системе электропитания группы магнетронов применено имитационное моделирование в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink.

Схема имитационной модели для трех магнетронных генераторов показана на рис. 4. Каждый генератор представлен подсистемой MG, имеющей управляющий вход In1 для подачи задающего воздействия Reference_Id, информационные выходы Out1, Out2 для наблюдения за напряжением вольтодобавки и анодным током. Силовые входы Conn1, Conn2 подсистем MG подключены к выходам блока DC Power System, который имитирует высоковольтный источник постоянного напряжения. При моделировании блок DC Power System был реализован в виде блоков Three-Phase Source и Universal Bridge из библиотеки SimPowerSystem. Линейное напряжение трехфазного источника питания составляло 3500 В, индуктивность и активное сопротивление – 2,5 Гн и 56 Ом соответственно.

Схема подсистемы MG представлена на рис. 5. Магнетрон представлен в виде последовательно соединенных блоков Diode, R_{din} и DC Voltage Source. Вольтодобавочный элемент моделируется блоком Controlled Voltage Source.

Для измерения анодного тока служит резистор R, напряжение на котором через измеритель U1 и через блок Transfer Fcn, имитирующий фильтр низких частот, подается на один из входов элемента сравнения (блок Sum). На другой вход этого элемента поступает сигнал, задающий требуемое значение анодного тока. В результате формируется сигнал ошибки, который подается на интегральный регулятор, выходной сигнал которого через блок ограничения Saturation подается на вход блока Controlled Voltage Source.

На рис. 6–8 представлены результаты исследования переходных процессов в системе электропитания магнетронов E3328 фирмы Toshiba мощностью 3 кВт [9]. Исходя из параметров этих магнетронов при моделировании принято пороговое напряжение 4500 В, динамическое сопротивление 200 Ом.

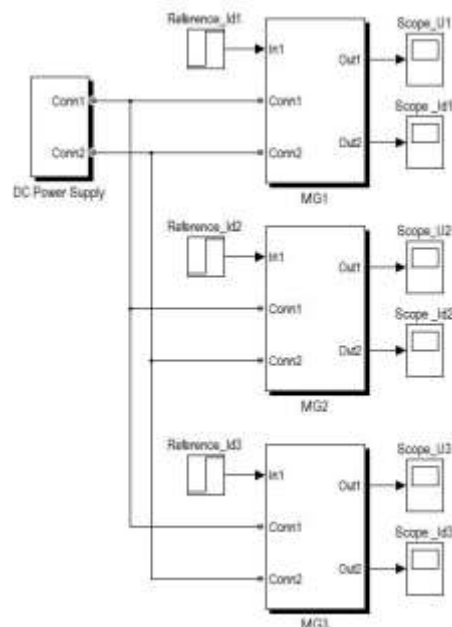


Рис. 4. Схема имитационной модели для исследования переходных процессов в системе электропитания трех магнетронных генераторов

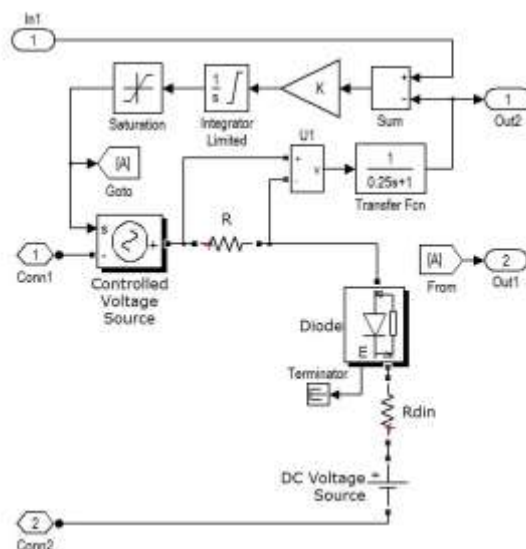


Рис. 5. Имитационная модель магнетронного генератора с вольтодобавочным элементом в анодной цепи

Из графиков на рис. 6 видно, что качество переходных процессов при выводе магнетрона на рабочий режим существенно зависит от коэффициента интегрального регулятора. Кроме того установлено, что на характер динамических режимов влияют параметры источника постоянного напряжения. Графики на рис. 7 получены при моделировании ситуации, когда с интервалом 5 секунд производится последовательный вывод на номинальный режим трех магнетронов. Коэффициент интегрального регулятора при этом был равен 2000 c^{-1} .

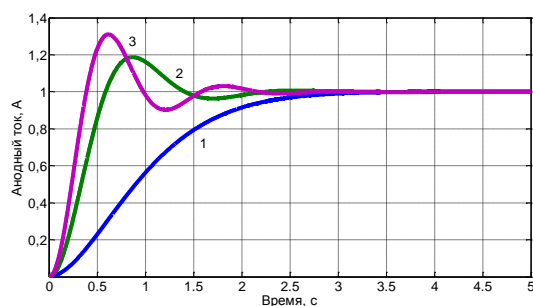


Рис. 6. Графики изменения анодного тока магнетрона при различных значениях коэффициента интегрального регулятора: 1000 c^{-1} (1); 4000 c^{-1} (2); 8000 c^{-1} (3)

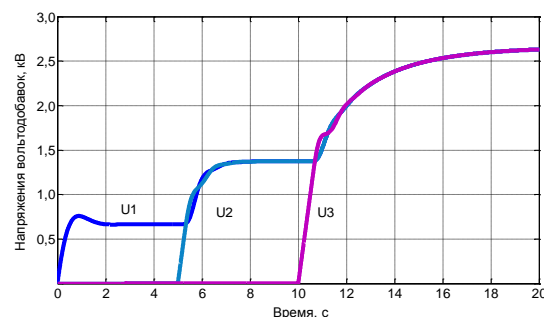


Рис. 8. Графики изменения напряжений вольтодобавки в процессе последовательного включения магнетронов

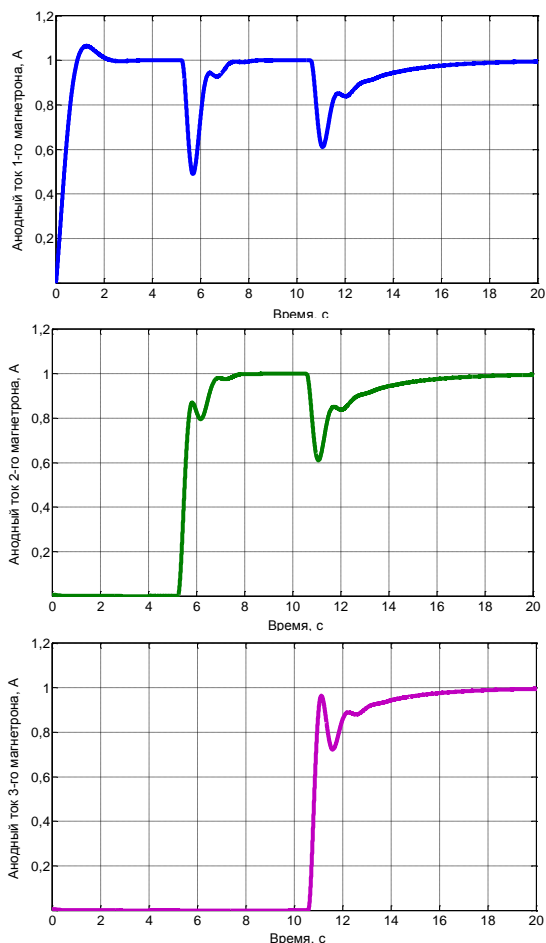


Рис. 7. Графики изменения анодных токов магнетронов в процессе последовательного включения

Напряжение централизованного источника питания зависит от тока его нагрузки. Поэтому каждое последующее включение магнетрона приводит к снижению величины на общих шинах и соответствующему возрастанию напряжения вольтодобавки. При этом, в графике тока уже работающего магнетрона наблюдается провал, который устраняется за счет работы контура автоматического управления. Однако с уменьшением напряжения источника анодного питания длительность переходного процесса увеличивается.

ВЫВОДЫ

Система электропитания группы магнетронных генераторов представляет сложный электротехнический комплекс, для моделирования которого целесообразно применение современных программных продуктов.

Для исследования динамических режимов в этой системе разработана имитационная модель в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink.

По результатам виртуальных экспериментов установлено влияние параметров автоматического регулятора и параметров источника централизованного питания на качество переходных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Collins G., Microwave magnetrons. Massachusetts Institute of Technology, Radiation Laboratory series, 6. New-York: McGraw-Hill Book Co., 1948.
- [2] Okress E., Microwave Power Engineering, vol.1. New York: Acad. Press, 1968.
- [3] Surducu V., Surducu E., Ciupa R. Variable power, short microwave pulses generation using a CW magnetron, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2011, vol. 11, iss. 2, pp. 49-54, DOI: 10.4316/AECE.2011.02008.
- [4] Yang Y.-R. A magnetron power supply with transition-mode zero-voltage-switching inverter, *Journal of Energy and Power Engineering*, 2013, vol. 7, iss. 8, pp. 1571-1577.
- [5] Bahani B., Ferfra M., Chraygane M., Bousseta M., Ghazal N. El., Belhaiba A. Modeling and optimization of a new single-phase high voltage power supply for industrial microwave generators, *International Review of Electrical Engineering*, 2014, vol. 9, iss. 1, pp. 136-145.
- [6] Artyukhov I.I., Zemtsov A.I. Modelling of the power supply magnetron generator of the industrial plant of superhigh frequency, 2008 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering. Saratov: IEEE, 2008, pp. 355-360, DOI: 10.1109/APEDE.2008.4720172.
- [7] Ghazal N.El., Ould Ahmedou M., Chraygane M., Ferfra M., Belhaiba A. Optimization of high voltage power supply for industrial microwave generators for one magnetron, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2012, vol. 46, No.1. Available: <http://www.jatit.org>
- [8] Artyukhov I.I., Zemtsov A.I., Soshinov A.G. Simulation of power supply packaged magnetron for industrial applications, 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering. Saratov: IEEE, 2016, pp. 1-3, DOI: 10.1109/APEDE.2016.7878968.
- [9] TOSHIBA Industrial Magnetron E3328. http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind_magnetron/pdf/E3328_E.pdf