

Электротехника

УДК 621.314:621.365.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МУЛЬТИГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ СВЧ-НАГРЕВА

И.И. Артюхов¹, А.И. Земцов², Е.К. Пыльская¹, С.В. Молот¹

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

²Самарский государственный технический университет, филиал в г. Сызрани
Россия, 446001, г. Сызрань, ул. Советская, 45

E-mail: ivart54@mail.ru, artex283@mail.ru, ekpyslkaya@mail.ru, sve_1992@mail.ru

Аннотация. Поставлена задача исследования электромагнитных процессов в системе электропитания установки диэлектрического нагрева, в которой СВЧ-колебания создаются группой пакетированных магнетронов промышленного назначения. В среде Matlab с пакетом расширения Simulink разработана имитационная модель, которая позволяет получить информацию о мгновенных и интегральных значениях напряжений и токов в системе электропитания, рассчитать ее энергетические характеристики. Моделирование проведено для случая, когда источниками СВЧ-колебаний являются пакетированные магнетроны 2М164. По результатам моделирования определено влияние параметров сетевого напряжения на режим работы СВЧ-установки и показана необходимость его стабилизации для обеспечения заданного режима работы установки. Показано, что импульсный режим работы магнетронов является причиной искажения потребляемых токов и протекания тока в нейтральном проводе.

Ключевые слова: СВЧ-установка, магнетрон, система электропитания, имитационное моделирование.

Введение

СВЧ диэлектрический нагрев позволяет эффективно реализовывать широкий спектр технологий. Основные преимущества использования СВЧ-нагрева в термических процессах обусловлены особенностями поглощения СВЧ-энергии. СВЧ-энергия преобразуется в теплоту внутри вещества, что приводит к значительной экономии энергии и сокращению времени процессов [1, 2].

Артюхов Иван Иванович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника».

Земцов Артем Иванович (к.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий».

Пыльская Елена Константиновна (к.ф.-м.н.), доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника».

Молот Светлана Викторовна, ассистент кафедры «Электроэнергетика и электротехника».

Прогресс в разработке генераторов СВЧ-колебаний и хорошие поглощательные свойства многих материалов привели к созданию промышленных установок различного назначения, в том числе конвейерного типа мощностью в десятки киловатт [3]. Большое число таких установок используется, в частности, для термообработки сельскохозяйственной продукции и пищевых продуктов, которые обычно содержат много воды и поэтому хорошо поглощают СВЧ-энергию [4–6].

СВЧ-установка конвейерного типа представляет собой сложную систему, в процессе работы которой необходимо распределить СВЧ-энергию, вырабатываемую одним или несколькими СВЧ-генераторами согласно требованиям технологического процесса. Возможен вариант, когда СВЧ-колебания создаются одним мощным генератором и распределяются затем с помощью волноводной системы. Однако СВЧ-установки конвейерного типа чаще всего выполняют мультигенераторными [7], причем для равномерной загрузки сети количество генераторов принимают кратным трем [8].

Для создания источников СВЧ-энергии в настоящее время имеется широкая гамма электронных приборов. В установках небольшой мощности наиболее часто применяют пакетированные магнетроны (со встроенными магнитами). Для установок большой мощности применяются магнетроны с электромагнитами. В последнее время получают также применение магнетроны комбинированного типа, в которых постоянные магниты дополняются электромагнитами для обеспечения регулировочных свойств.

В качестве источников СВЧ-энергии в установках конвейерного типа часто применяют пакетированные магнетроны мощностью 1,5–2 кВт. Выбор в пользу таких магнетронов объясняется несколькими факторами, один из которых – воздушное охлаждение анода и катода. Магнетроны, позволяющие получить СВЧ-колебания мощностью 3 кВт и более, требуют для своей работы две системы охлаждения. Водяное охлаждение применяется для анода, принудительное воздушное – для катодного блока, где размещается фильтр для защиты от радиопомех. Наличие системы водяного охлаждения заметно усложняет конструкцию СВЧ-установки.

В настоящее время известно много работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию схем источников питания, которые применяются в СВЧ-печах бытового назначения, например [9–11]. Процессы в системах электропитания магнетронов для СВЧ-установок промышленного назначения изучены в гораздо меньшей степени. Имеющейся в литературе информации недостаточно для разработки и проектирования мультигенераторных СВЧ-установок. Поэтому было поставлена задача разработать модель, которая позволяет проводить исследования характеристик системы электропитания группы магнетронов для различных сочетаний параметров ее элементов и питающей сети.

Система электропитания магнетронных генераторов

Для функционирования пакетированного магнетрона необходимы два источника питания. Один из них обеспечивает накал катода, другой создает необходимую разность потенциалов между анодом и катодом магнетрона. Так как анод магнетрона соединяется с корпусом СВЧ-установки, то цепь питания накала оказывается под высоким напряжением.

В СВЧ-печах бытового назначения традиционно применяется схема, которая содержит один трансформатор с двумя вторичными обмотками. Низковольтная обмотка обеспечивает накал катода, высоковольтная обмотка с помощью удвоителя напряжения запитывает анодную цепь магнетрона.

Для функционирования магнетронов промышленного назначения требуется более сложная схема организации потоков энергии, так как в соответствии с требованиями на эксплуатацию этих магнетронов необходимо разделить во времени процессы подогрева катода и подачи высокого напряжения на анодную цепь. Кроме того, должна быть предусмотрена возможность регулирования напряжения накала при изменении режима работы магнетрона по анодной цепи.

Схема электропитания СВЧ-установки, в состав которой входят N магнетронных генераторов пакетированного типа, показана на рис. 1. Эта схема разработана в соответствии с требованиями на эксплуатацию магнетрона TOSHIBA 2M164, который генерирует СВЧ-колебания в диапазоне частот от 2440 до 2460 МГц. Средняя выходная мощность магнетрона составляет 1300...1600 Вт [12].

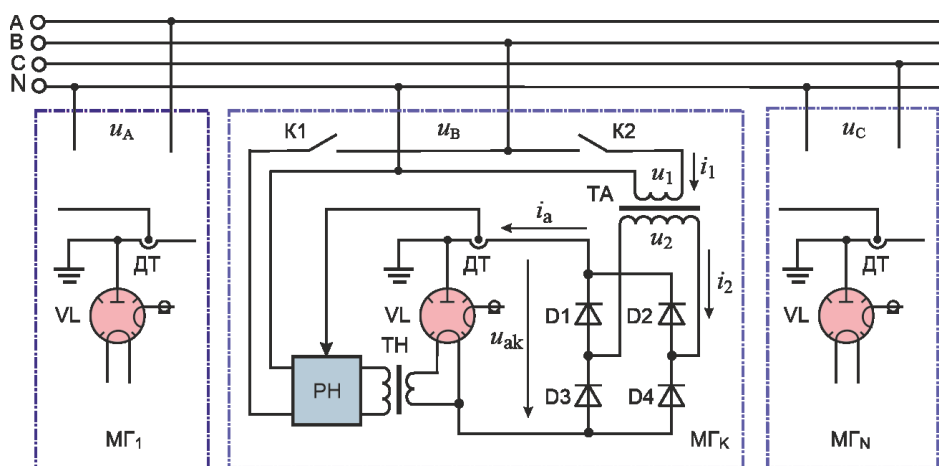


Рис. 1. Схема электропитания группы магнетронов

Необходимое для накала катода напряжение снимается со вторичной обмотки трансформатора ТН, первичная обмотка которого через регулятор напряжения РН и коммутатор К1 подключена к сети. Регулятор напряжения необходим для изменения напряжения накала в процессе разогрева катода и выхода магнетрона VL на рабочий режим.

Для магнетрона 2M164 необходим предварительный прогрев катода в течение некоторого времени (не менее 3 секунд). Поэтому при включении системы электропитания магнетрона VL сначала срабатывает коммутатор К1, в результате чего на цепь накала катода подается напряжение, действующее значение которого составляет 3,6...4,4 В. Затем с помощью коммутатора К2 на анодную цепь подается напряжение, которое создается высоковольтным мостовым выпрямителем D1-D4, присоединенным ко вторичной обмотке повышающего трансформатора ТА.

Имитационная модель системы электропитания

Для разработки и проектирования СВЧ-установки необходима информация об электромагнитных процессах, происходящих в системе электропитания,

о том, как меняется их характер при изменении параметров сети и элементов системы. Такая информация может быть получена путем имитационного моделирования исследуемого объекта в программном комплексе MATLAB+Simulink [13].

Схема модели для исследования системы электропитания СВЧ-установки на базе трех магнетронов 2М164 показана на рис. 2. Заметим, что при ее составлении не учтены элементы цепи накала, так как они потребляют очень малую часть энергии по сравнению с цепями анодного питания.

Сеть промышленной частоты (блок *Three-Phase Source*) представлена тремя источниками переменного напряжения с последовательно соединенными активно-индуктивными сопротивлениями. Такая модель сети позволяет оперативно изменять ее параметры и проводить исследования несимметричных режимов.

Магнетронные генераторы представлены подсистемами *Magnetron Generator* (рис. 3), в состав которых входят блоки, моделирующие пакетированный магнетрон с источником анодного напряжения.

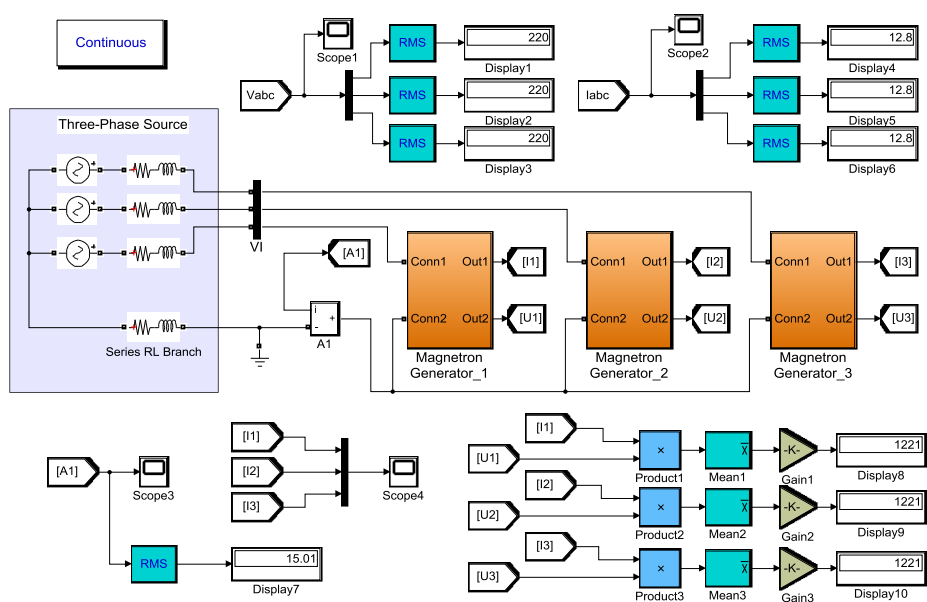


Рис. 2. Имитационная модель системы электропитания

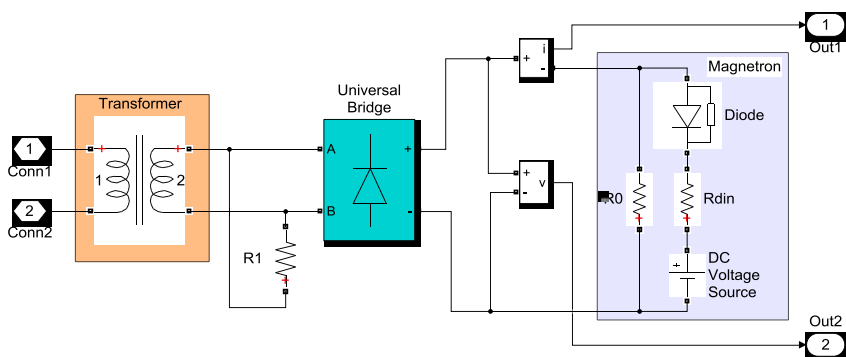


Рис. 3. Схема подсистемы *Magnetron Generator*

При моделировании пакетированного магнетрона использован подход, подразумевающий кусочно-линейную аппроксимацию его вольт-амперной характеристики (ВАХ) [14]. Идеализированная ВАХ магнетрона состоит из двух участков, сопряжение которых происходит в точке, соответствующей пороговому напряжению U_0 . Если напряжение u_{ak} между анодом и катодом магнетрона меньше порогового значения U_0 , то генерации СВЧ-колебаний не происходит. Сопротивление R_0 между анодом и катодом магнетрона составляет сотни кОм. Участок ВАХ магнетрона в этом режиме описывается уравнением

$$u_{ak} = i_a \cdot R_0.$$

При достижении напряжением на магнетроне порогового значения U_0 возникают колебания, следствием которых является протекание анодного тока i_a . Уравнение ВАХ для участка генерации колебаний имеет вид

$$u_{ak} = U_0 + (i_a - I_0) \cdot R_{din},$$

где R_{din} – динамическое сопротивление магнетрона;
 I_0 – анодный ток в точке перегиба ВАХ.

В режиме генерации СВЧ-колебаний происходит резкое уменьшение сопротивление магнетрона как нагрузки источника анодного питания. Поэтому небольшие изменения анодного напряжения приводят к существенным изменениям анодного тока.

Как показано на рис. 3, магнетрон моделируется схемой замещения в виде последовательно соединенных диода (блок *Diode*), динамического сопротивления (блок *Rdin*) и включенного во встречном направлении источника постоянного напряжения (блок *DC Voltage Source*), величина которого соответствует пороговому напряжению U_0 моделируемого магнетрона. Параллельно указанной цепочке включен резистор R_0 . Для магнетрона 2M164 на основании его паспортных характеристик были приняты следующие значения: $U_0=3100$ В; $R_{din}=100$ Ом; $R_0=100$ кОм.

Цепь анодного питания моделируют блоки *Transformer* и *Universal Bridge*. Параметры блока *Transformer* представлены в табл. 1. В настройках блока *Universal Bridge* принято, что падение напряжение на каждом из диодов высоковольтного моста составляет 15 В.

В составе модели на рис. 2 имеются также блоки *RMS*, предназначенные для расчета действующих значений напряжений и токов. Кривые фазных напряжений и линейных токов можно видеть на экранах виртуальных осциллографов *Scope* с номерами 1 и 2. Их действующие значения отображаются в окнах блоков *Display* с номерами 1–3 и 4–6 соответственно. Информацию о токе нулевого провода позволяют получить *Scope3* и *Display7*. На экране виртуального осциллографа *Scope3* в результате моделирования можно наблюдать анодные токи магнетронов.

В модель включены также элементы (блоки *Product*, *Mean* и *Gain*), с помощью которых вычисляется выходная мощность магнетронного генератора. На основании характеристик магнетрона 2M164 было сделано допущение о том, что его КПД является постоянной величиной. При моделировании эта величина задается в блоке *Gain*. Информация о мощности генераторов отображается дисплеями 8–10.

Параметры блока *Transformer*

Параметр	Единица измерения	Значение
Номинальная мощность	В·А	3200
Частота	Гц	50
<i>Параметры первичной обмотки</i>		
Номинальное напряжение	В	220
Индуктивность рассеяния	Гн	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Сопротивление обмотки	Ом	0,6
<i>Параметры вторичной обмотки</i>		
Номинальное напряжение	В	3100...3500
Индуктивность рассеяния	Гн	1,3
Сопротивление обмотки	Ом	135
<i>Параметры цепи намагничивания</i>		
Индуктивность	Гн	8
Сопротивление	Ом	$1 \cdot 10^4$

Результаты моделирования системы электропитания

Одна из задач моделирования состояла в определении влияния сетевого напряжения на режим работы СВЧ-установки. При проведении численных экспериментов было принято, что индуктивность и активное сопротивление источника энергии составляют 50 мкГн и 0,02 Ом соответственно.

На рис. 4 показаны графики зависимости выходной мощности магнетрона от сетевого напряжения в относительных единицах

$$U^* = U_1 / U_{1\text{ном.}}$$

Зависимости рассчитаны для ряда значений коэффициента трансформации

$$n = w_1 / w_2 ,$$

где w_1, w_2 – количество витков первичной и вторичной обмоток соответственно.

Для удобства восприятия и анализа информации на графиках указаны параметры k , обратные коэффициенту трансформации n .

Графики на рис. 4 показывают, что режим работы магнетрона очень сильно зависит от величины сетевого напряжения. Отклонения сетевого напряжения даже в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения, что допускает ГОСТ 32144-2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», могут привести либо к аварийной ситуации из-за перегрузки магнетрона, либо к существенному уменьшению его выходной мощности. При этом на режим работы магнетрона влияют параметры повышающего трансформатора.

Например, для трансформатора, у которого на холостом ходу напряжение на вторичной обмотке в $k=15$ раз больше напряжения на первичной обмотке, при номинальном значении сетевого напряжения выходная мощность составляет 1400 Вт. При снижении напряжения на 10 % мощность станет менее 800 Вт, т. е. уменьшится более чем на 43 %. Увеличение сетевого напряжения всего на 6 % приведет к работе магнетрона в предельно допустимом режиме.

Изменение параметра k в пределах $\pm 0,9$ относительно значения $k=15$ приводит к изменению мощности на ± 400 Вт относительно значения 1400 Вт. Чтобы

исключить аварийный режим работы, можно выбрать трансформатор с параметром $k=14,1$. Однако в этом случае отклонения сетевого напряжения в пределах, допускаемых ГОСТ 32144-2013, приведут к изменению выходной мощности магнетрона в диапазоне от 500 до 1800 Вт.

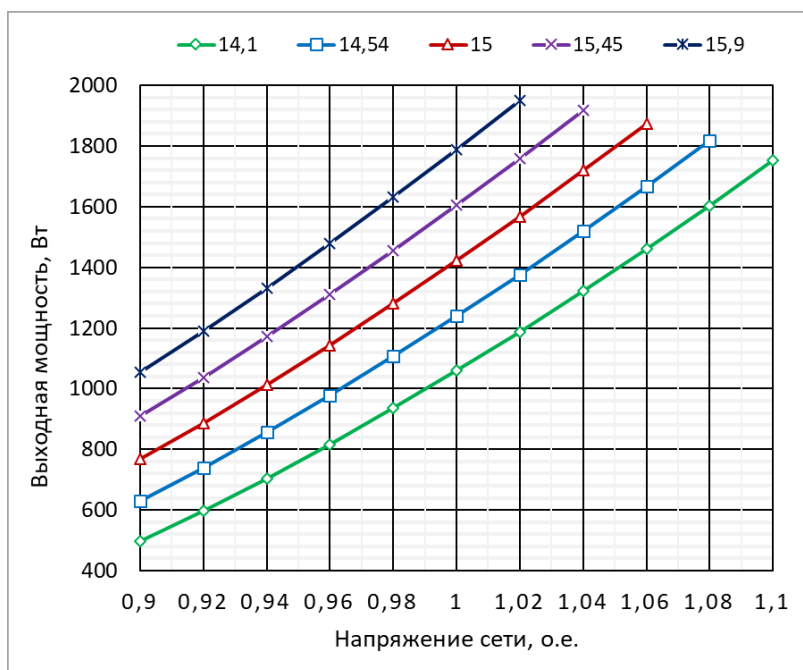


Рис. 4. Зависимость выходной мощности магнетрона от напряжения сети

На основании анализа результатов моделирования может быть дана следующая оценка влияния сетевого напряжения на режим работы СВЧ-установки: изменение напряжения на 1 % приводит к изменению мощности генератора на 4–5 %. Поэтому система электропитания СВЧ-генераторов должна быть оснащена стабилизатором напряжения. Возможные варианты решения проблемы предполагают также использование тиристорных регуляторов напряжения с импульсно-фазовой системой управления [15, 16].

Разработанная модель позволяет исследовать влияние несимметрии напряжений сети на работу СВЧ-установки. В табл. 2 приведены результаты расчета для ситуации, когда на одной из фаз сети напряжение имеет номинальное значение, а на двух других фазах напряжения отличаются на +2 и -2 % от номинального значения. Напряжение на вторичной обмотке трансформатора составляло 3300 В.

Результаты моделирования показывают, что из-за несимметрии напряжений сети мощность СВЧ-генератора, подключенного к фазе В, уменьшилась на 11,7 % относительно мощности генератора, работающего от фазы А. При этом мощность генератора, получающего питание от фазы С, увеличилась на 11,4 %.

Влияние несимметрии напряжений

Фаза	Фазное напряжение, В	Линейный ток, А	Выходная мощность, Вт
A	220	12,81	1221
B	215,6	11,56	1078 (-11,7 %)
C	224,4	14	1361 (+11,4 %)

Осциллограммы анодных токов магнетронов для смоделированной ситуации с несимметрией напряжений показаны на рис. 5.

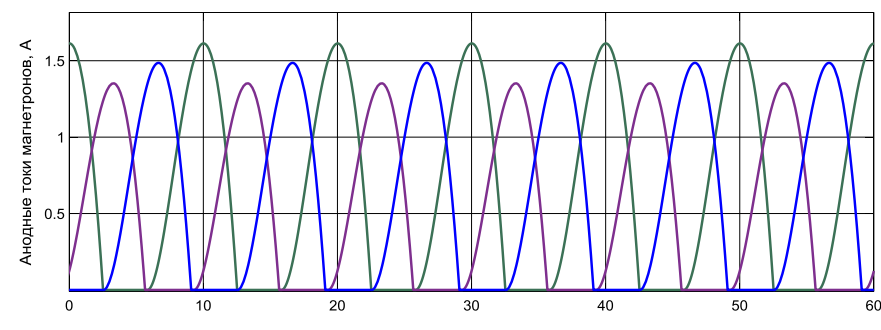


Рис. 5. Осциллограммы анодных токов при несимметрии напряжений сети (по оси абсцисс – время в миллисекундах)

Важным вопросом при разработке СВЧ-установки является определение влияния системы электропитания магнетронов на сеть.

На рис. 6 показаны полученные в результате моделирования осциллограммы напряжений и токов на входе установки, а также нулевого провода. Нелинейность ВАХ магнетрона приводит к импульсному характеру тока, потребляемого из сети. Поэтому в спектре потребляемого тока наряду с основной гармоникой присутствуют высшие гармоники с нечетными номерами.

С помощью встроенного в MATLAB инструмента FFT (быстрое преобразование Фурье) произведен гармонический анализ кривой тока, потребляемого из сети (рис. 7). Результаты анализа показали, что наиболее интенсивной является третья гармоника. Для рассмотренного варианта моделирования системы электропитания она составила 42,58 % относительно первой гармоники. Суммарный коэффициент гармонических составляющих потребляемого тока равен 43,58 %.

Наличие третьей гармоники в потребляемых токах приводит к тому, что по нейтральному проводу протекает ток, частота которого равна 150 Гц, а действующее значение соизмеримо с действующим значением линейных токов. Для рассмотренного примера моделирования действующие значения потребляемых токов составили 12,8 А. Ток нейтрального провода достиг значения 15 А.

Протекание тока 150 Гц значительной величины по нейтральному проводу необходимо учитывать при проектировании сети, от которой предполагается питание мультигенераторной СВЧ-установки рассмотренного типа.

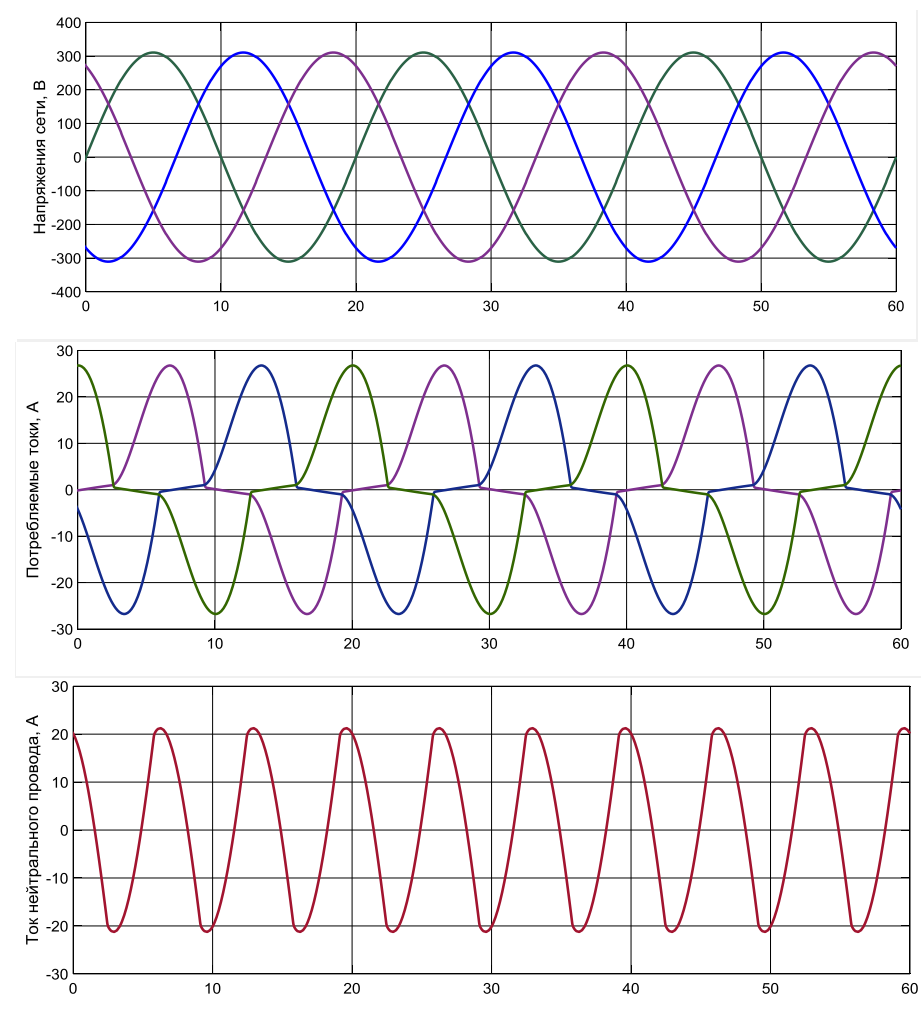


Рис. 6. Осциллограммы напряжений и токов
(по оси абсцисс – время в миллисекундах)

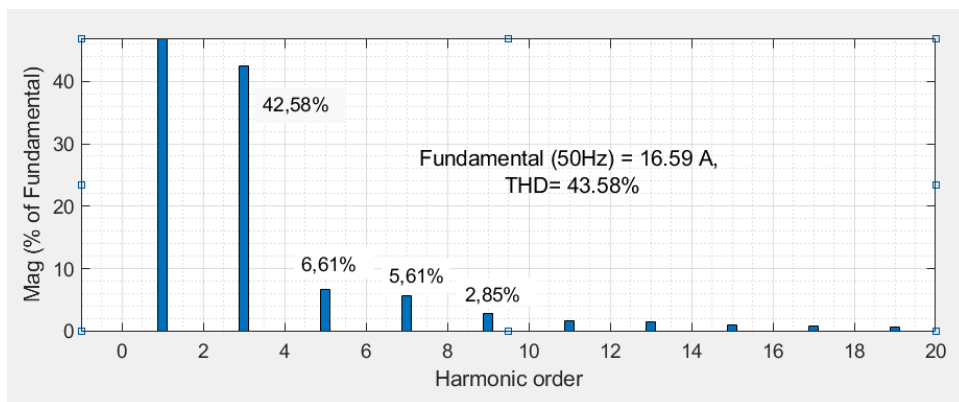


Рис. 7. Гармонический состав потребляемого тока

Необходимость соединения первичных обмоток в «звезду» у повышающих трансформаторов обусловлена тем, что серийные образцы этих трансформаторов изготавливают с первичной обмоткой, рассчитанной на напряжение 220 В. С одной стороны, это позволяет унифицировать оборудование для различных типов СВЧ-установок. С другой стороны, указанное соединение первичных обмоток обеспечивает электробезопасность высоковольтных установок путем заземления одного из выводов первичной обмотки трансформатора.

Заключение

Для исследования системы электропитания, обеспечивающей функционирование пакетированных магнетронов в мультигенераторной СВЧ технологической установке, разработана имитационная модель в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink. При моделировании пакетированного магнетрона использован подход о кусочно-линейной аппроксимации его ВАХ. На основании результатов имитационного моделирования рассчитаны характеристики системы электропитания. Установлено, что в результате отклонения сетевого напряжения на 1 % изменения выходной мощности установки составляют от 4 до 5 %.

Из-за импульсного режима работы магнетронов потребляемые из сети токи имеют несинусоидальную форму. Их спектр содержит нечетные гармонические составляющие, причем наиболее интенсивной является гармоника с номером 3.

Наличие в спектре потребляемых токов третьей гармоники приводит к возникновению тока в нейтральном проводе, причем величина этого тока может превышать линейные токи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Okress E. Microwave Power Engineering. Vol. 1. New York: Acad. Press, 1968.
2. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ электротермии. – Саратов: Научная книга, 2011. – 506 с.
3. Морозов О., Каргин А., Савенко Г., Требух В., Воробьев И. Промышленное применение СВЧ-нагрева // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – № 3. – С. 2–6.
4. Methlouthi A., Rouaud O., Boillereaux L. Microwave Applicator with Conveyor Belt System // Microwave Journal, May 12, 2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.microwavejournal.com/articles/12469-microwave-applicator-with-conveyor-belt-system>.
5. Puangsuwan K., Tongurai C., Chongcheawchamnan M. Design of Microwave Heating Continuous Belt System for Palm fruit // Proceedings of the 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). DOI: 10.1109/APMC.2015.7413502.
6. Massalfa Microwave [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.massalfa.org/factory-22110-microwave-dryer>.
7. Артюхов И.И., Земцов А.И. Направления совершенствования мультигенераторных СВЧ электротехнологических установок // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 1. – № 3(54). – С. 149–154.
8. Bahani B., Bouzit A., Chraygane M., Ferfra M., Ghazal N.El., Belhaiba A. Modeling of a New High Voltage Power Supply for Microwave Generators with Three Magnetrons // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2013. Vol. 3, N. 2. Pp. 164–170.
9. Kako H., Nakagawa T., Narita R. Development of Compact Inverter Power Supply for Microwave Oven // IEEE Transactions on Consumer Electronics. Vol. 37. N. 3. Pp. 611–616.
10. 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.
11. Zhang Y., Chen Y., Zhang B. Modeling and Analysis of the Stable Power Supply Based on the Magnetic Flux Leakage Transformer // 2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition, Shanghai. Pp. 614–618.

12. TOSHIBA Industrial Magnetron 2M164 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind_magnetron/pdf/2M164_E.pdf
13. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
14. 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.
15. Heggannavar M., Kulkarni H. Design of Magnetron Power Source from Three phase Supply // 2015 International Conference on Energy Systems and Applications. Pune, 2015. Pp. 552–556.
16. Артюхов И.И., Земцов А.И., Гордеев Е.С. Имитационная модель регулируемого источника анодного напряжения для пакетированного магнетрона промышленного назначения // Вопросы электротехнологии. – 2016. – № 4(13). – С. 33–38.

Статья поступила в редакцию 4 октября 2020 г.

SIMULATION AND RESEARCH OF THE POWER SUPPLY SYSTEM FOR MULTIGENERATOR MICROWAVE HEATING INSTALLATION

I.I. Artyukhov¹, A.I. Zemtsov², E.K. Pylskaya¹, S.V. Molot¹

¹Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77, Politechnicheskaya st., Saratov, 410054, Russian Federation

²Syzran Branch of Samara State Technical University
45, Sovetskaya st., Syzran, 446001, Russian Federation

Abstract. *The task is to study electromagnetic processes in the power supply system of a dielectric heating installation, in which a group of industrial packaged magnetrons creates microwave oscillations. A simulation model of the power supply system for multigenerator microwave heating installation was created in the Matlab&Simulink programming environment. The model allows you to obtain information of voltage and current instantaneous and integral values in the power supply system, and to calculate energy characteristics of the system. Simulation was carried out for the case when the sources of microwave oscillations are "2M164" packaged magnetrons. Based on the simulation results, the influence of the mains voltage parameters on the operating mode of the microwave installation was determined also the need for voltage stabilization was shown to ensure the preset operating mode of the installation. It is shown that the pulsed operation mode of magnetrons is the cause of the consumed current distortion and the current presence in the neutral wire.*

Keywords: *microwave installation, magnetron, power supply system, simulation.*

REFERENCES

1. Okress E. Microwave Power Engineering. Vol. 1. New York: Acad. Press, 1968.
2. Arkhangel'skij Yu.S. Spravochnaya kniga po SVCH elektrotermii. Saratov: Nauchnaya kniga, 2011. 506 s. (In Russian).
3. Morozov O., Kargin A., Savenko G., Trebuh V., Vorob'ev I. Promyshlennoe primeneniye SVCH-nagreva // Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes. 2010. № 3. P. 2–6. (In Russian).

Ivan I. Artyukhov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Artem I. Zemtsov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Elena K. Pylskaya (Ph.D. (Phys. & Math.)), Associate Professor.

Svetlana V. Molot, Assistant.

4. *Methlouthi A., Rouaud O., Boillereaux L.* Microwave Applicator with Conveyor Belt System // *Microwave Journal*, May 12, 2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.microwavejournal.com/articles/12469-microwave-applicator-with-conveyor-belt-system>.
5. *Puangsuwan K., Tongurai C., Chongcheawchamnan M.* Design of Microwave Heating Continuous Belt System for Palm fruit // *Proceedings of the 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. DOI: 10.1109/APMC.2015.7413502.
6. *Massalfa Microwave* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.massalfa.org/factory-22110-microwave-dryer>.
7. *Artyukhov I.I., Zemtsov A.I.* Napravleniya sovershenstvovaniya mul'tigeneratornykh SVCH elektrotekhnologicheskikh ustanovok // *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. T. 1. № 3(54). P. 149–154. (In Russian).
8. *Bahani B., Bouzit A., Chraygane M., Ferfra M., Ghazal N. El., Belhaiba A.* Modeling of a New High Voltage Power Supply for Microwave Generators with Three Magnetrons // *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2013. Vol. 3, N. 2. Pp. 164–170.
9. *Kako H., Nakagawa T., Narita R.* Development of Compact Inverter Power Supply for Microwave Oven // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. Vol. 37. N. 3. Pp. 611–616.
10. *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.
11. *Zhang Y., Chen Y., Zhang B.* Modeling and Analysis of the Stable Power Supply Based on the Magnetic Flux Leakage Transformer // *2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition, Shanghai*. Pp. 614–618.
12. *TOSHIBA Industrial Magnetron 2M164*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind_magnetron/pdf/2M164_E.pdf
13. *CHernyh I.V.* Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. Moscow.: DMK Press; St. Petersburg: Piter, 2008. 288 p. (In Russian).
14. *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.
15. *Heggannavar M., Kulkarni H.* Design of Magnetron Power Source from Three phase Supply // *2015 International Conference on Energy Systems and Applications*. Pune, 2015. Pp. 552–556.
16. *Artyukhov I.I., Zemtsov A.I., Gordeev E.S.* Imitatsionnaya model' reguliruemogo istochnika anodnogo napryazheniya dlya paketirovannogo magnetrona promyshlennogo naznacheniya // *Voprosy elektrotekhnologii*. 2016. № 4(13). P. 33–38. (In Russian).