

УДК 621.311.6

DOI 10.46960/2658-6754\_2020\_2\_54

В.Л. Осокин

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ – ЭЛЕКТРОГАЗОРАЗРЯДНЫЙ РЕАКТОР» В MATHCAD

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет

Широкое использование озона в промышленности возможно только при работе надежных электрогенераторов озона. Электрогенератором озона или озонатором служит электрогазоразрядный реактор. Эффективность работы озонаторов во многом определяется параметрами высоковольтных источников питания. Это обуславливает необходимость рассматривать источник питания и озонатор в целом как единую систему «источник питания – озонатор».

Разработана программа решения нелинейных дифференциальных уравнений в форме Коши, описывающих процесс в системе «источник питания – электрогазоразрядный реактор» (СИПЭР). Приведены нелинейные дифференциальные уравнения, описывающие процессы в СИПЭР, и программа для их решения в интегрированном пакете MathCad. Нелинейная характеристика озонатора задается с применением функции с условием. Для решения использован метод Рунге-Кутты с фиксированным шагом интегрирования. Приведены результаты решения в виде мгновенных значений напряжений и токов в озонаторе при различных значениях питающего напряжения.

Кривая тока озонатора имеет несинусоидальный характер. Показано, что форму кривой тока озонатора можно улучшить за счет демпфирования индуктивной катушкой гармонических составляющих, что повышает его электромагнитную совместимость.

**Ключевые слова:** вольт-амперная характеристика озонатора, газовый промежуток, диэлектрический барьер, озонатор, электрогазоразрядный реактор, электрогенератор озона, электронно-ионная технология.

### 1. Введение

Применение озона в большинстве отраслей промышленности и в агропромышленном комплексе дает существенный экономический эффект. Многие технологии с применением озона продолжают успешно развиваться. За этим направлением закрепилось название – электронно-ионная технология; сфера его применения в последнее время значительно расширилась. Современная техническая база и новые полупроводниковые приборы позволили за счет автоматизации процессов повысить интенсивность работы аппаратов электронно-ионной технологии и сделать их более надеж-

ными. В настоящее время рассматривается вопрос не только о насыщении воздуха отрицательными аэроионами, но и его обеспыливания и очистке от болезнетворных бактерий путем воздействия озона. Для решения этих проблем и достижения указанных целей как нельзя лучше подходит способ электрогазоочистки, который позволяет в одном аппарате решать одновременно три задачи: обеспыливание, ионизация и озонирование воздуха. Эти задачи очень непростые и требуют дальнейших глубоких теоретических исследований.

Широкое использование озона возможно только при работе надежных электрогенераторов озона. Разработка таких электрогенераторов требует углубленного анализа их работы и дальнейшего совершенствования конструкций. Эффективность работы озонаторов определяется, в первую очередь, параметрами применяемых высоковольтных источников питания. Поэтому следует не анализировать процессы по отдельности в каждом элементе, а рассматривать электрогенератор озона как сложное устройство, включающее в себя электрогазоразрядный реактор и высоковольтный источник для его питания, проводить анализ этой сложной системы.

Многие вопросы создания теории электрического разряда в электрогазоразрядных реакторах при электросинтезе озона в настоящее время еще не решены до конца и требуют более глубокого изучения. Проблемам повышения энергетических показателей, расширения частотного диапазона и функциональности полупроводниковых преобразователей посвящены работы таких ученых, как А.М. Бамдас, В.И. Пантелеев, Ю.М. Голембиовский, Д.А. Тихомиров, Г.С. Зиновьев, А.С. Серебряков, Л.Э. Рогинская, Н.Ю. Лысов, С.В. Шапиро, N. Marham, А.И. Метельков, Шэнь Цин Тун, С. В. Вендин, А.Г. Возмилов, В.Ф. Сторчевой [1-8].

## **II. Цель и задачи исследования**

В известных работах анализ процессов в озонаторе с учетом нелинейности его характеристик проводится, как правило, методом припасовывания. По данному методу весь цикл работы системы «источник питания – электрогазоразрядный реактор» (СИПЭР) делится на отдельные стадии, в течение которых свойства отдельных элементов системы не меняются, и процессы в каждой отдельной стадии описываются одними и теми же дифференциальными уравнениями. При этом начальные условия в каждой последующей стадии формируются из конечных условий предыдущей стадии.

Аналитическое решение нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в электрогазоразрядном реакторе, указанным методом припасовывания достаточно трудоемко и дает невысокую точность при расчетах из-за вносимых в расчет упрощений. Целью исследо-

вания является разработка программы для решения численным методом Рунге-Кутта с фиксированным шагом нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих процесс в СИПЭР, с помощью интегрированного пакета MathCad для анализа процессов при электросинтезе озона и улучшения электромагнитной совместимости рассматриваемой системы.

### III. Материалы и методы

При анализе процессов в электрогазоразрядном реакторе будем считать, что высоковольтный источник питания имеет синусоидальную форму выходного питающего напряжения, а его внутреннее активное сопротивление равно  $R$ . Индуктивность источника питания принимаем равной нулю. Уравнение баланса мгновенных значений напряжений для схемы замещения СИПЭР:

$$R \cdot i + u_{\text{СП}} + u_{\text{СБ}} = u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t), \quad (1)$$

где  $i$  – ток;  $U_m$  – амплитуда питающего напряжения;  $\omega$  – угловая частота;  $t$  – текущее время.

Мгновенное значение тока из (1):

$$i = \frac{u(t) - u_{\text{СБ}} - u_{\text{СП}}}{R}. \quad (2)$$

Для решения нелинейных дифференциальных уравнений в интегрированном пакете MathCad численным методом необходимо задать выражения для производных искомых величин, т.е., записать данные уравнения в форме Коши. Интегрирование дифференциальных уравнений проводим методом Рунге-Кутта четвертого порядка с шагом интегрирования – rkfixed.

Электрический ток цепи:

$$i = C_{\text{Б}} \cdot \frac{du_{\text{СБ}}}{dt}, \quad (3)$$

где  $C_{\text{Б}}$  – емкость диэлектрического барьера.

Используя (2) и (3), выразим производную напряжения на диэлектрическом барьере:

$$\frac{du_{\text{СБ}}}{dt} = \frac{1}{C_{\text{Б}}} \cdot i = \frac{1}{C_{\text{Б}}} \cdot \left( \frac{u(t) - u_{\text{СБ}} - u_{\text{СП}}}{R} \right). \quad (4)$$

Соответственно, производная напряжения на газовом промежутке при отсутствии электрического разряда:

$$\frac{du_{\text{СП}}}{dt} = \frac{1}{C_{\text{П}}} \cdot i = \frac{1}{C_{\text{П}}} \cdot \left( \frac{u(t) - u_{\text{СБ}} - u_{\text{СП}}}{R} \right), \quad (4)$$

где  $C_{\text{П}}$  – емкость газового промежутка.

При электрическом разряде напряжение на газовом промежутке (в случае его электрического пробоя) будет неизменным в течение интервала горения разряда. При этом производная напряжения на газовом промежутке:

$$\frac{du_{\text{СП}}}{dt} = 0. \quad (5)$$

На рис. 1 показаны матрицы начальных условий ( $x$ ) и производных напряжений на конденсаторах СБ и СП  $D(t, x)$ , используемые для решения дифференциальных уравнений. Начальные условия (НУ) приняты нулевыми, поскольку в исходный момент времени напряжение на конденсаторах равно нулю.

#### Решение дифференциальных уравнений озонатора

$U_{\text{м}} := 10000$  Амплитуда питающего напряжения В  $T := 0.1$

$U_{\text{г}} := 4000$  Напряжение горения, В

$R := 5$   $C_{\text{р}} := 1 \cdot 10^{-6}$   $C_{\text{б}} := 4 \cdot 10^{-6}$   $u(t) := U_{\text{м}} \cdot \sin(314 \cdot t)$

$x := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  Начальные условия

$$D(t, x) := \left[ \begin{array}{c} \frac{1}{C_{\text{б}}} \cdot \left( \frac{u(t) - x_0 - x_1}{R} \right) \\ \text{if} \left( \frac{u(t) - x_0 - x_1}{R} > 0, \text{if} \left( x_1 < U_{\text{г}}, \frac{1}{C_{\text{р}}} \cdot \frac{u(t) - x_0 - x_1}{R}, 0 \right), \text{if} \left( x_1 > -U_{\text{г}}, \frac{1}{C_{\text{р}}} \cdot \frac{u(t) - x_0 - x_1}{R}, 0 \right) \right) \end{array} \right]$$

$Z := \text{rkfixed}(x, 0, T, 10000, D)$   $n := 0..10000$   $t_n := \frac{T \cdot n}{10000}$   $ub_n := Z_{n,1}$   $up_n := Z_{n,2}$

$i_n := \frac{u(t_n) - ub_n - up_n}{R}$

Рис. 1. Матрица начальных условий ( $x$ ) и матрица производных напряжений на конденсаторах  $D(t, x)$ :

$C_{\text{б}}$  – емкость линейного конденсатора СБ;  $C_{\text{р}}$  – емкость нелинейного конденсатора СП;  $t$  – текущее время;  $x_0$  и  $x_1$  – переменные

Решение дифференциальных уравнений выдается в виде матрицы  $Z$  из трех столбцов. Первый столбец содержит точки  $t$ , в которых ищется решение, а второй и третий столбцы содержат результаты решения – значения напряжений на конденсаторах СБ и СП схемы замещения озонатора (переменные  $x_0$  и  $x_1$ ). Производная напряжения газового зазора записывается с помощью функции с условием if. В скобках функции if первоначально указывается проверяемое условие – «ток, протекающий в озонаторе, больше нуля?» Затем после запятой указывается выражение функции для случая, когда заданное условие выполняется, а после второй запятой записывается выражение функции для случая, если проверяемое условие не выполняется.

На рис. 2 приведены результаты расчета в виде графиков, на которых показаны мгновенные значения напряжений и токов в электрогазоразрядном реакторе при различных значениях выходного напряжения источника питания. Значение тока определяется из (2). Графики приведены для трех значений амплитуды питающего напряжения источника питания:  $U_{m1} = 6$  кВ,  $U_{m2} = 8$  кВ,  $U_{m3} = 10$  кВ.

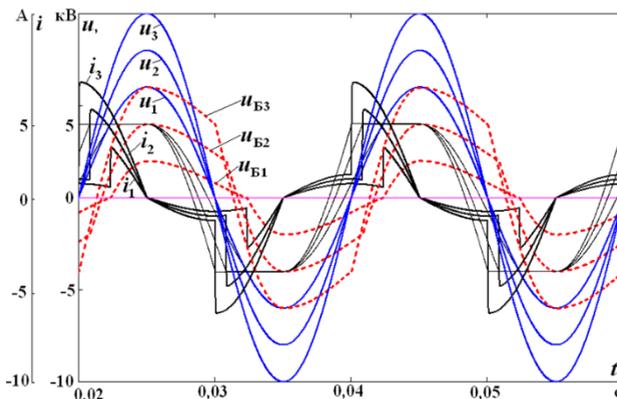


Рис. 2. Мгновенные значения напряжений и токов в электрогазоразрядном реакторе при разных значениях синусоидального напряжения источника питания

Из рис. 2 видно, что чем больше амплитуда питающего напряжения, тем раньше по фазе начинается пробой газового промежутка, при котором ток в электрогазоразрядном реакторе резко возрастает, а напряжение на газовом промежутке становится постоянным. Чем больше питающее напряжение, тем дольше длится разряд газа в озонаторе и больше его производительность. Одновременно с увеличением производительности озона-

тора увеличивается и выделяемая в газовом промежутке электрическая энергия, больше нагревается диэлектрик барьера, и требуется большая мощность для его охлаждения. Приведенные зависимости позволяют оценить производственные характеристики озонатора.

На рис. 3 показаны динамические вольт-амперные характеристики электрогазоразрядного реактора (а, б, в) и зависимость напряжения на диэлектрическом барьере от напряжения на газовом промежутке (г).

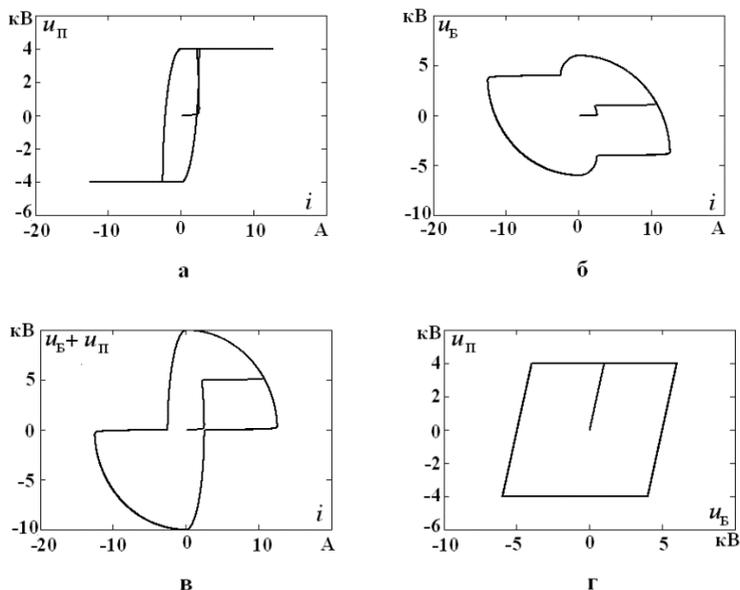


Рис. 3. Динамические вольт-амперные характеристики мгновенных значений электрогазоразрядного реактора (а, б, в) и зависимость мгновенных значений напряжения на диэлектрическом барьере от напряжения на газовом промежутке (г)

В приведенных на рис. 3 зависимостях наблюдается заметная разница в фазах исследуемых величин. Возрастание и убывание тока происходит по несовпадающим ветвям петли. Несовпадение восходящей и нисходящей ветвей объясняется поглощением энергии в газовом промежутке во время пробоя. Эта энергия тратится на электросинтез озона. Зависимость тока от времени имеет несинусоидальную форму. Это ухудшает электромагнитную совместимость озонатора. Улучшить форму тока, протекающего через озонатор, можно за счет включения последовательно с ним индуктивной катушки. Ниже приведен анализ процессов для этого случая.

Если индуктивная катушка соединена последовательно с электрогазоразрядным реактором, то в этом случае в цепи будет три накопителя энергии – линейный элемент – индуктивная катушка и два конденсатора – линейный и нелинейный элементы. Уравнение баланса напряжений для схемы замещения с учетом линейной индуктивной катушки  $L$  имеет вид:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + u_{\text{СП}} + u_{\text{СБ}} = u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t). \quad (6)$$

Запишем (6) в форме Коши:

$$\frac{di}{dt} = \frac{u(t) - R \cdot i - u_{\text{СП}} - u_{\text{СБ}}}{L}. \quad (7)$$

Производные напряжения на конденсаторах СБ и СП остаются такими же, как и раньше.

#### IV. Результаты

На рис. 4 показаны матрица-столбец  $x$  начальных условий и матрица-столбец  $D(t, x)$  производных напряжений на конденсаторах СБ и СП при последовательном включении источника питания и индуктивной катушки.

Решение дифференциальных уравнений озонатора с индуктивной катушкой

$U_m := 8000$  Амплитуда питающего напряжения В  $T := 0.1$

$U_g := 4000$  Напряжение горения, В

$R := 80$   $C_p := 1 \cdot 10^{-6}$   $C_b := 4 \cdot 10^{-6}$   $L := 0.4$   $u(t) := U_m \cdot \sin(314 \cdot t)$

$x := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$  Начальные условия

$D(t, x) := \begin{pmatrix} \frac{u(t) - R \cdot x_0 - x_1 - x_2}{L} \\ \frac{1}{C_b} \cdot x_0 \\ \text{if} \left( \frac{u(t) - x_2 - x_1}{R} > 0, \text{if} \left( x_2 < U_g, \frac{1}{C_p} \cdot \frac{u(t) - x_2 - x_1}{R}, 0 \right), \text{if} \left( x_2 > -U_g, \frac{1}{C_p} \cdot \frac{u(t) - x_2 - x_1}{R}, 0 \right) \right) \end{pmatrix}$

$Z := \text{rkfixed}(x, 0, T, 10000, D)$   $n := 0..10000$   $t_n := \frac{T \cdot n}{10000}$   $ub_n := Z_{n,2}$   $up_n := Z_{n,3}$   $in := Z_{n,1}$

Рис. 4. Матрица-столбец  $x$  начальных условий и матрица-столбец  $D(t, x)$  производных напряжений на конденсаторах СБ и СП при включении последовательно с источником питания индуктивной катушки

На рис. 5 приведены результаты расчетов в интегрированном пакете MathCad в виде мгновенных значений напряжений и токов в электрогазо-разрядном реакторе при последовательном включении индуктивной катушки с источником питания и различных значениях питающего напряжения.

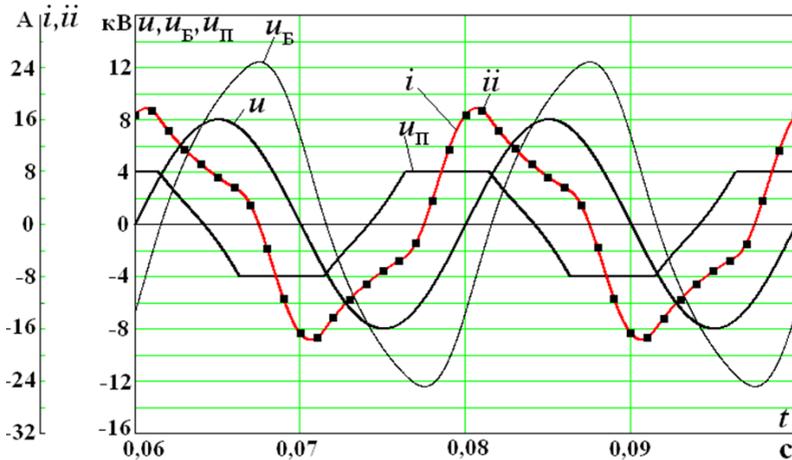


Рис. 5. Мгновенные значения напряжений и тока в электрогазообразном реакторе при включении индуктивной катушки и разных значениях напряжения источника питания

Как видно из рис. 5, форма кривой тока озонатора улучшается за счет демпфирования индуктивной катушкой гармонических составляющих. Гармонический анализ выполнен по формулам, приведенным на рис. 6.

#### Фурье-анализ

$$k := 1, 3 \dots 41$$

$$j := \sqrt{-1}$$

$$A_k := \frac{1}{1000} \cdot \left[ \sum_{n=8000}^{10000} (i_n \cdot \sin(k \cdot 314 t_n)) + j \cdot \sum_{n=8000}^{10000} (i_n \cdot \cos(k \cdot 314 t_n)) \right]$$

$$t_{nn} := 0, 0.001 \dots 0.1 \quad u_n := U_m \cdot \sin(314 t_n)$$

$$ii(t_{nn}) := \sum_k (|A_k| \cdot \sin(k \cdot 314 t_{nn} + \arg(A_k))) \quad K := \sqrt{\frac{\sum_k (|A_k|)^2 - (|A_1|)^2}{(|A_1|)^2}}$$

Рис. 6. Фурье-анализ тока электрогазового разряда реактор с индуктивной катушкой

Амплитудно-частотная характеристика тока озонатора с индуктивной катушкой показана на рис. 7, а коэффициенты гармоник приведены в табл. 1, которая показывает, что в этом случае остаются только две гармоники – третья и пятая.

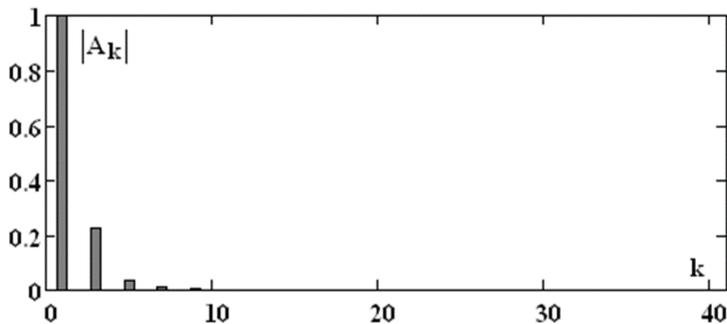


Рис. 7. Зависимость модулей амплитуд гармоник тока электрогазоразрядного реактора с индуктивной катушкой от номера гармоник

Таблица 1.

Коэффициенты гармоник тока озонатора с индуктивной катушкой при разных значениях амплитуды питающего напряжения

$U_m$ , кВ	Коэффициент гармоник, %					
	$K_3$	$K_5$	$K_7$	$K_9$	$K_{11}$	$K$
6	24,01	4,4	0,806	0,647	0,16	2464
8	22,69	3,325	1,011	0,407	0,265	23
10	21,64	2,56	1,08	0,223	0,287	2168

## V. Заключение

Приведены результаты решения численным методом нелинейных дифференциальных уравнений в форме Коши, описывающих процессы, происходящие в системе «источник питания – электрогазоразрядный реактор». Представлены расчеты мгновенных значений напряжений и токов в электрогенераторе озона, а также его вольт-амперные характеристики.

Показано, что электромагнитную совместимость системы СИПЭР можно повысить за счет включения последовательно с источником питания индуктивной катушки.

**Библиографический список**

- [1] Мануйленко А.Н., Вендин С.В. Достоинства и недостатки применения электротехнологии озонирования воздуха в животноводческих помещениях // Актуальные вопросы энергетики, Ноябрь 28, 2018, Майский, Россия. Майский: Белгородский ГАУ, 2019. С. 24-27.
- [2] Возмилов А.Г., Мельников А.В., Астафьев Д.В., Звездакова О.В., Пархомчук Г.Е. Разработка схем замещения однозонного и двухзонного электрофильтров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2018. Т. 14. № 3. С. 37-46.
- [3] Возмилов А.Г., Астафьев Д.В., Илимбетов Р.Ю. Использование озона для дезинфекции яиц и стимулирования эмбрионального развития цыплят в период инкубации // АПК России. 2019. Т. 26. № 5. С. 811-817.
- [4] Белопухов С.Л., Сторчевой В.Ф. Озон и его применение в АПК. Иркутск: ООО «Мегапринт», 2017. – 145 с.
- [5] Бамдас А.М., Разуваев Ю.П., Шапиро С.В. Аналоговое моделирование исполнительных ферромагнитных устройств. М.: Наука, 1975. – 440 с.
- [6] Пантелеев В.И., Серебряков А.С. Тиристорный регулятор напряжения для регулирования на первичной стороне трансформатора // Труды ГПИ им. А. А. Жданова. 1969. Т. XXV, № 15. С. 68-70.
- [7] Серебряков А.С. MATHCAD и решение задач электротехники. 2-е изд. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2019. – 568 с.
- [8] Шамин А.Е., Серебряков А.С., Осокин В.Л., Романов П.Н. Моделирование процесса синтеза озона в интегрированном пакете MATHCAD // Вестник НГИЭИ. 2019. № 5 (96). С. 48-60.

**V.L. Osokin**

**MODELING OF PROCESSES IN SYSTEM  
«POWER SOURCE – ELECTRO-GAS DISCHARGE  
REACTOR» IN MATHCAD**

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics  
Knyaginino, Russia

**Abstract.** Widespread use of ozone in industry is possible only with the operation of reliable ozone generators. An ozone generator or an ozonator serves as an electric-gas discharge reactor. The efficiency of ozonizers is largely determined by the parameters of high-voltage power sources. This makes it necessary to consider the power source and the ozonizer as a whole as a single system "power source - ozonizer".

The article is devoted to the development of a program for solving nonlinear differential equations in the Cauchy form, which describe the process in the system "power supply – electric gas-discharge reactor" (SPSEGDR). Nonlinear differential equations

describing the processes in SPSEGDR and a program for their solution in the integrated package MathCad are presented. The non-linear characteristic of the ozonizer is set using a function with a condition. For the solution, the Runge-Kutta method with a fixed integration step was used. The results of the solution are presented in the form of instantaneous values of voltages and currents in the ozonizer at various values of the supply voltage.

The current curve has a non-sinusoidal character. It is shown that the form of the ozonator current curve can be improved by damping the harmonic components with an inductive coil, which increases its electromagnetic compatibility.

**Keywords:** current-voltage characteristic, dielectric barrier, electric gas-discharge reactor, electron-ion technology, gas gap, ozone generator, ozonizer.

### References

- [1] A.N. Manuilenko and S.V. Vendin, "Advantages and disadvantages of the use of electrotechnology ozonation of air in livestock buildings", in proc. *Aktual'nye voprosy energetiki [Actual questions of electric power industry]*, Nov. 28, 2018, Maysky, Belgorod oblast, Russia, pp. 24-27, 2019 (in Russian).
- [2] A.G. Vozmilov, A.V. Melnikov, D.V. Astafev, O.V. Zvezdakova and G.E. Parkhomchuk, "Substitution schemes development for single-stage and two-stage electric precipitators", *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, no. 3, vol. 14, pp. 37-46, 2018.
- [3] A.G. Vozmilov, D.V. Astafiev and R.Yu. Ilimbetov, "Using ozone to disinfect eggs and stimulate the embryonic development of chickens during the incubation period", *Agro-Industrial Complex of Russia*, vol. 26, no 5, pp. 811-817, 2019.
- [4] S.L. Belopukhov and V.F. Storchevoy, *Ozon i ego primeneniye v APK [Ozone and its use in agriculture]*. Irkutsk: LLC Megaprint, 2017 (in Russian).
- [5] A.M. Bamdas, Yu.P. Razuvaev and S.V. Shapiro, *Analogovoe modelirovanie ispolnitel'nyh ferromagnitnyh ustrojstv [Analog modeling of executive ferromagnetic devices]*. Moscow: Nauka, 1975 (in Russian).
- [6] V.I. Panteleev and A.S. Serebryakov, "Tiristornyj regulyator napryazheniya dlya regulirovaniya na pervichnoj storone transformatora [Tiristornyj regulyator napryazheniya dlya regulirovaniya na pervichnoj storone transformatora]", *Trudy GPI im. A.A. Zhdanova [Proceedings of the GPI n.a. A.A. Zhdanova]*, vol. XXV, no. 15, pp. 68–70, 1969 (in Russian).
- [7] A.S. Serebryakov, *MATHCAD i resheniye zadach elektrotekhniki [MATHCAD and the solution of problems of electrical engineering]*, 2nd ed. Moscow: Fsbi DPO "Educational and methodical center on education in railway transport", 2019 (in Russian).
- [8] A.E. Shamin, A.S. Serebryakov, V.L. Osokin and P.N. Romanov, "Modeling of the process of ozone synthesis in an integrated package MATHCAD", *Bulletin NGIEI*, no. 5 (96), pp. 48-60, 2019.