

УДК 621

UDC 621

**РАСЧЕТ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ В ЭЛЕКТРООЗОНАТОРЕ ПРИ ГОРЯЩЕМ РАЗРЯДЕ**

**CALCULATION OF RESONANT FREQUENCY IN AN ELECTRO-OZONIZER AT THE BURNING CURRENT**

Шевченко Андрей Андреевич  
доцент, [mnpkkgau@mail.ru](mailto:mnpkkgau@mail.ru)  
Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

Shevchenko Andrey Andreevich  
associate professor, [mnpkkgau@mail.ru](mailto:mnpkkgau@mail.ru)  
Kuban state agrarian university, Krasnodar, Russia

В статье представленные вопросы теоретического исследования процессов электрического резонанса генератора озона и определено их влияние на производительность и КПД электроозонатора

In the article the presented questions of theoretical research of processes of an electric resonance of the generator of ozone were discussed and their influence on productivity and electro-ozonizer efficiency was also defined

Ключевые слова: ГЕНЕРАТОР ОЗОНА, КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС

Keywords: OZONE GENERATOR, EFFICIENCY, ELECTRIC RESONANCE

Исследования, проведенные на кафедре ЭТиВИЭ Кубанского ГАУ, показали, что при горящем разряде в озонирующем блоке появляется активная составляющая, представленная на схеме замещения (рисунок 1) в виде сопротивления [7].

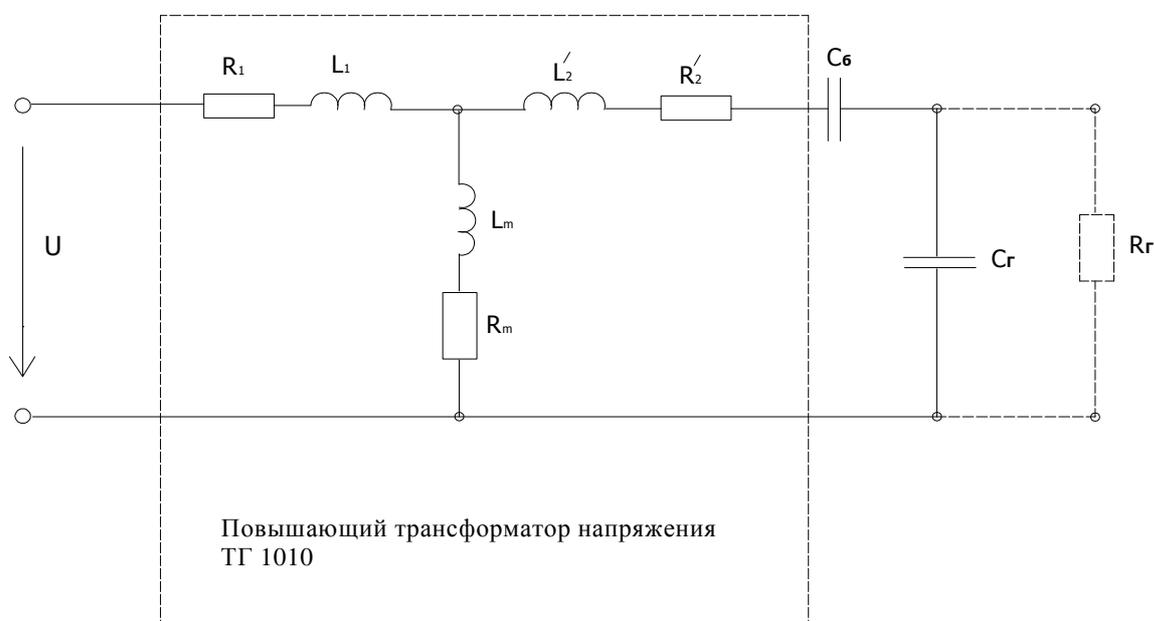


Рисунок 1 - Схема замещения электроозонатора

где  $R_1$  – активное сопротивление рассеяния первичной обмотки трансформатора;  $R'_2$  – приведенное активное сопротивление рассеяния

вторичной обмотки трансформатора;  $R_m$  – активная сопротивление рассеяния контура намагничивания;  $L_1$  – индуктивность рассеяния первичной обмотки трансформатора;  $L'_2$  – приведенная индуктивность рассеяния вторичной обмотки трансформатора;  $L_3$  – индуктивность рассеяния контура намагничивания;  $C_6$  – емкость барьеров пластинчатого озонатора;

$C_r$  – емкость газового промежутка электроозонатора;  $R_r$  – активная составляющая газового промежутка электроозонатора;  $u(t)$  – напряжение питающей сети.

В связи, с появлением активной составляющей, изменятся электрические параметры, необходимые для расчета частоты резонанса при горящем разряде в озонаторе, поэтому сопротивление газоразрядного промежутка  $z_r$  примет следующий вид [6]:

$$z_r = \frac{R_2}{1 + j\omega C_2 R_2}, \quad (1)$$

Изменение сопротивления газового промежутка приведет к изменению напряжения  $U_3$ , подаваемого на озонирующий блок:

$$\begin{aligned} \dot{U}_3 &= \frac{\dot{U} \cdot \frac{1}{R_1 + j\omega L_1}}{\frac{1}{R_1 + j\omega L_1} + \frac{1}{R_3 + j\omega L_3} + \frac{1}{R_2 + j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_6} + \frac{R_2}{1 + j\omega C_2 R_2}}} = \\ &= \frac{\dot{U}}{1 + \frac{R_1 + j\omega L_1}{R_3 + j\omega L_3} + \frac{R_1 + j\omega L_1}{R_2 + j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_6} + \frac{R_2}{1 + j\omega C_2 R_2}}}, \quad (2) \end{aligned}$$

Значение тока при этом определяется по формуле:

$$I_2 = \frac{\dot{U}_3}{R_2 + j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_6} + \frac{R_2}{1 + j\omega C_2 R_2}} = \frac{\dot{U}}{A + j\omega B}, \quad (3)$$

Зная ток  $I_2$ , протекающий через озонирующий блок и напряжение  $\dot{U}_3$ , приложенное к разрядному промежутку, мы можем рассчитать падение напряжения на диэлектрических барьерах и газовом промежутке озонирующего блока при горящем разряде. Выполнив преобразования, получим:

$$u_6(t) = \frac{U_m}{\sqrt{A_1^2 + \omega^2 B_1^2}} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1 - 90), \quad (4)$$

$$u_2(t) = \frac{U_m \cdot R_2}{\sqrt{A_1^2 + \omega^2 B_1^2} \cdot \sqrt{1 + \omega^2 C_2^2 R_2^2}} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1 - \arctg \omega C_2 R_2), \quad (5)$$

В формулах (4), (5) коэффициент  $\varphi_1$  равен:

$$\varphi_1 = \varphi_0 - \arctg \frac{\omega B}{A}, \quad (6)$$

Полученные данные позволяют выполнить расчет резонансной частоты для питания электроозонатора при горящем разряде.

Применение эффекта резонанса в озоногенераторах позволит добиться повышения эффективности работы озонатора: снизить энергозатраты, повысить  $\cos \varphi$ , уменьшить реактивное сопротивление и, как следствие, увеличить активную мощность [2, 4].

При горящем разряде озонирующий блок описывается следующей зависимостью:

$$I = U_0 * C_6 * \omega * \cos \omega t, \quad (7)$$

где  $I$  – текущее значение тока;  $U_0$  – напряжение питания озонирующего блока.

По утверждению Филиппова Ю.В., на практике более важно не мгновенное значение тока, а средний ток. Его можно получить, интегрируя предыдущее уравнение за полупериод [5]:

$$I_{cp} = (2/T) * \int_0^{T/2} Idt, \quad (8)$$

При интегрировании надо учесть, что функция тока от времени имеет разрывы в точках зажигания и погасания разряда. Они экспериментально наблюдаются на осциллограммах тока. Расчет среднего тока сделан в работе [5].

$$I_{cp} = \frac{2}{\pi} * \omega * C_{\delta} * (U_0 - U_c) = \frac{2}{\pi} * \omega * C_{\delta} * U_0, \quad (9)$$

При горящем разряде емкостью озонатора является емкость диэлектрического барьера, которая равна:

$$C_{\delta} = \frac{I_{cp}}{\frac{2}{\pi} * \omega * U_0}, \quad (10)$$

где  $\omega$  – круговая частота, зависящая от частоты источника тока;  $\omega = 2 * \pi * f$ .

Следовательно, емкость озонатора имеет вид:

$$C_{\delta} = \frac{I_{cp}}{4 * f * U_0}, \quad (11)$$

Используя выражение (11), мы можем вывести уравнение для определения резонансной частоты озонирующего блока при горящем разряде:

$$\omega_{рез.} = \frac{1}{\sqrt{L * \frac{I_{cp}}{4 * f * U_0}}}, \quad (12)$$

Иначе, это выражение можно записать следующим образом:

$$\omega_{рез.} = \frac{I}{\sqrt{\frac{L}{4 * f * \frac{U_0}{I_{cp}}}}}, \tag{13}$$

Зная, что  $\frac{U_0}{I_{cp}}$  можно выразить как:

$$\frac{U_0}{I_{cp}} = \sqrt{R^2 - \left(\frac{I}{\omega * C_{об}}\right)^2}, \tag{14}$$

где R – эквивалентное сопротивление озонирующего блока.

Следовательно, получим:

$$\omega_{рез.} = \frac{I}{\sqrt{L * \frac{I}{4 * f * \sqrt{R^2 - \left(\frac{I}{\omega * C_{об}}\right)^2}}}}, \tag{15}$$

Подставим в уравнение (15)  $C_{об}$  и L, получим выражение 16:

$$\omega_{рез.} = \frac{I}{\sqrt{\frac{\mu_0 * w^2}{2} * \frac{d^2}{D + \sqrt{D^2 - d^2}} * \frac{I}{4 * f * \sqrt{R^2 - \left(\frac{I}{2 * \pi * f * \epsilon_0 * (n-1) \sqrt{\frac{\epsilon_0 * S_0}{d_0} * \frac{\epsilon_2 * S_2}{d_2} * \frac{U_2}{U_0}}}\right)^2}}}}, \tag{16}$$

Используя выражения (4) и (5), определим величину соотношения действующих значений напряжений озонирующего блока  $\frac{u_2(t)}{u_0(t)}$ , так как их величины имеют большее практическое значение [3]:

$$\frac{u_2(t)}{u_0(t)} = \frac{\sqrt{1 + (\omega R_2 C_2)^2}}{\omega R_2 C_0} \cdot \frac{\sin(\omega t + \varphi_1 - 90)}{\sin(\omega t + \varphi_1 - \arctg \omega R_2 C_2)}, \tag{17}$$

Рассмотрим соотношение углов сдвига фаз в выражении (18):

$$\begin{aligned} & \frac{\sin(\omega t + \varphi_1 - 90)}{\sin(\omega t + \varphi_1 - \arctg \omega R_2 C_2)} = \\ & = \frac{-\cos(\omega t + \varphi_1)}{\sin(\omega t + \varphi_1) \cdot \cos(\arctg \omega R_2 C_2) - \cos(\omega t + \varphi_1) \cdot \sin(\arctg \omega R_2 C_2)} =, \quad (18) \\ & = \frac{1}{\sin(\arctg \omega R_2 C_2) - \tg(\omega t + \varphi_1) \cdot \cos(\arctg \omega R_2 C_2)} \end{aligned}$$

Таким образом, получим преобразованное соотношение напряжений газового промежутка:

$$\frac{u_2(t)}{u_6(t)} = \frac{\sqrt{1 + (\omega R_2 C_2)^2}}{\omega R_2 C_6} \cdot \frac{1}{\sin(\arctg \omega R_2 C_2) - \tg(\omega t + \varphi_1) \cdot \cos(\arctg \omega R_2 C_2)}, \quad (19)$$

При горящем разряде в газоразрядном промежутке появляется активная составляющая сопротивления  $R_r$ . Таким образом, значение активной составляющей всего озонирующего блока примет вид  $R = R_6 + R_r$ . Однако величина  $R_6$  будет незначительной, так как диэлектрические барьеры в момент разряда работают как конденсатор. Следовательно, можно сделать вывод, что  $R \approx R_r$ . Используя закон Ома, мы можем определить  $R$  [1].

В момент зажигания разряда емкостную составляющую разрядного устройства следует описывать емкостью диэлектрических барьеров (11), это происходит из-за того, что при разряде возрастает активная составляющая газоразрядного промежутка (появляется стример), а емкостная составляющая стремится к 0.

Сделав допущение, что  $C_r$  стремится к нулю, выражение (19) можно записать следующим образом:

$$\frac{u_2(t)}{u_6(t)} = \frac{\sqrt{1 + \left(\omega \frac{U_3}{I_{cp}}\right)^2}}{\omega \frac{U_3}{I_{cp}} C_6} \cdot \frac{l}{\sin(\arctg \omega R_2 C_2) - \operatorname{tg}(\omega t + \varphi_1) \cdot \cos(\arctg \omega R_2 C_2)}, \quad (20)$$

Введем переменную  $\varphi_2$ , равную отношению углов отклонения напряжений разрядного устройства:

$$\varphi_2 = \frac{l}{\sin(\arctg \omega R_2 C_2) - \operatorname{tg}(\omega t + \varphi_1) \cdot \cos(\arctg \omega R_2 C_2)}, \quad (21)$$

Подставив переменную  $\varphi_2$  в уравнение (20), получим следующую зависимость:

$$\frac{u_2(t)}{u_6(t)} = \frac{\sqrt{1 + \left(\omega \frac{U_3}{I_{cp}}\right)^2}}{\omega \frac{U_3}{I_{cp}} C_6} \cdot \varphi_2, \quad (22)$$

Полученное выражение (22) подставим в уравнение (16) и получим формулу для вычисления резонансной частоты для озонирующего блока пластинчатого типа:

$$\omega_{рез.} = \frac{l}{\frac{\mu_0 \cdot w^2}{2} \cdot \frac{d^2}{D + \sqrt{D^2 - d^2}} \cdot \frac{l}{4 \cdot f \cdot R^2 + \left[ \frac{l}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot (n-1)} \cdot \frac{\varepsilon_6 \cdot S_6}{d_6} \cdot \frac{\varepsilon_2 \cdot S_2}{d_2} \cdot \frac{1 + \left(\omega \frac{U_3}{I_{cp}}\right)^2}{\omega C_6 \frac{U_3}{I_{cp}}} \cdot \varphi_2 \right]^2}}$$

По итогам расчета данного выражения получены следующие зависимости (рисунок 2 и 3):

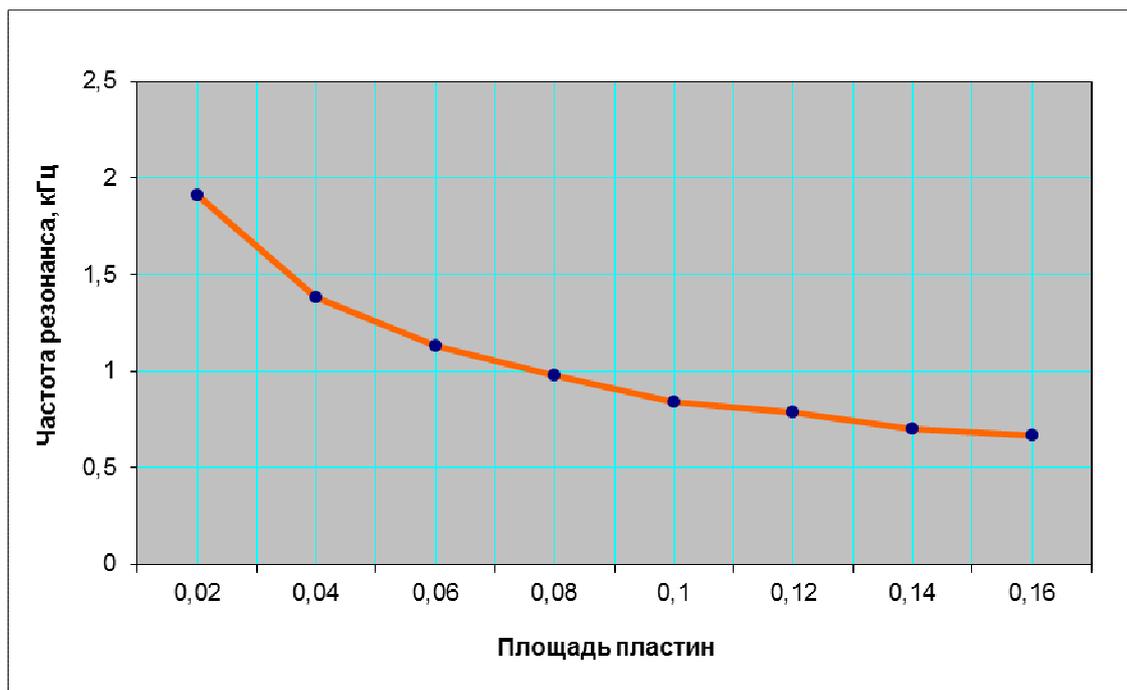


Рисунок 2 - Изменение частоты резонанса от площади диэлектрических барьеров и воздушного промежутка

Анализируя график, можно сказать, что при увеличении площади пластин и постоянном воздушном зазоре 3 мм, частота, на которой разрядный промежуток войдет в режим резонанса, снижается. Так, при площади  $0,02 \text{ м}^2$  резонансная частота составляет 1,8 кГц, а при площади пластин  $0,1 \text{ м}^2$  она снижается до значения 0,8 кГц.

На рисунке 3 представлена зависимость частоты резонанса от ширины воздушного промежутка. Анализируя этот график, можно сказать, что, чем меньше воздушный промежуток, тем меньше частота, при которой генератор озона войдет в режим резонанса. Однако, следует учитывать, что увеличивается вероятность пробоя диэлектрика, поэтому рекомендуется ширину воздушного промежутка делать менее 2,5 мм.

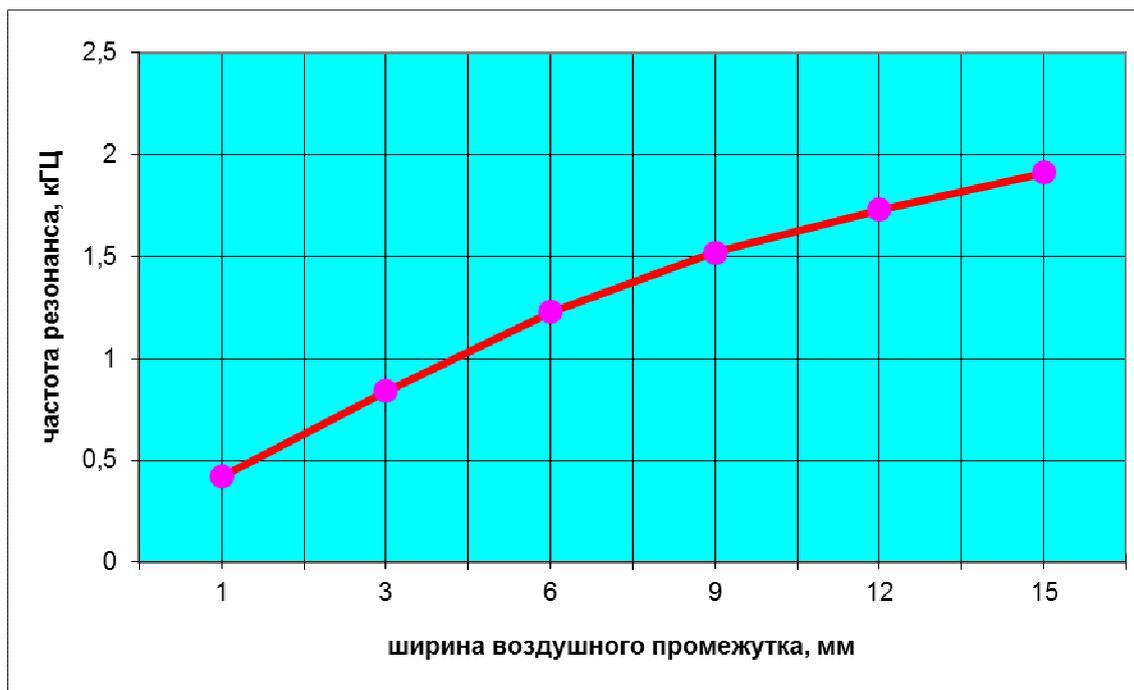


Рисунок 3 - Влияние изменения ширины воздушного зазора между диэлектрическими пластинами озонатора на частоту резонанса разрядного промежутка.

Таким образом, полученная нами формула резонансной частоты для разрядного промежутка позволяет рассчитать частоту, при которой ток, проходящий через разрядный промежуток, достигнет максимального значения, не вызывая изменений в питающей сети. Полученное выражение позволяет рассчитать резонансную частоту в зависимости от размеров озонирующего блока.

Для получения конкретного значения частоты, на которой генератор озона войдет в резонанс, нам необходимо знать лишь напряжение на выходе трансформатора (указывается в паспорте трансформатора), ток, подаваемый на озонирующий блок, и конструктивные параметры озонирующего блока.

Используя компьютерную программу «MathCAD 2011», была составлена математическая модель для расчета резонансной частоты, которая представлена на рисунке 4.

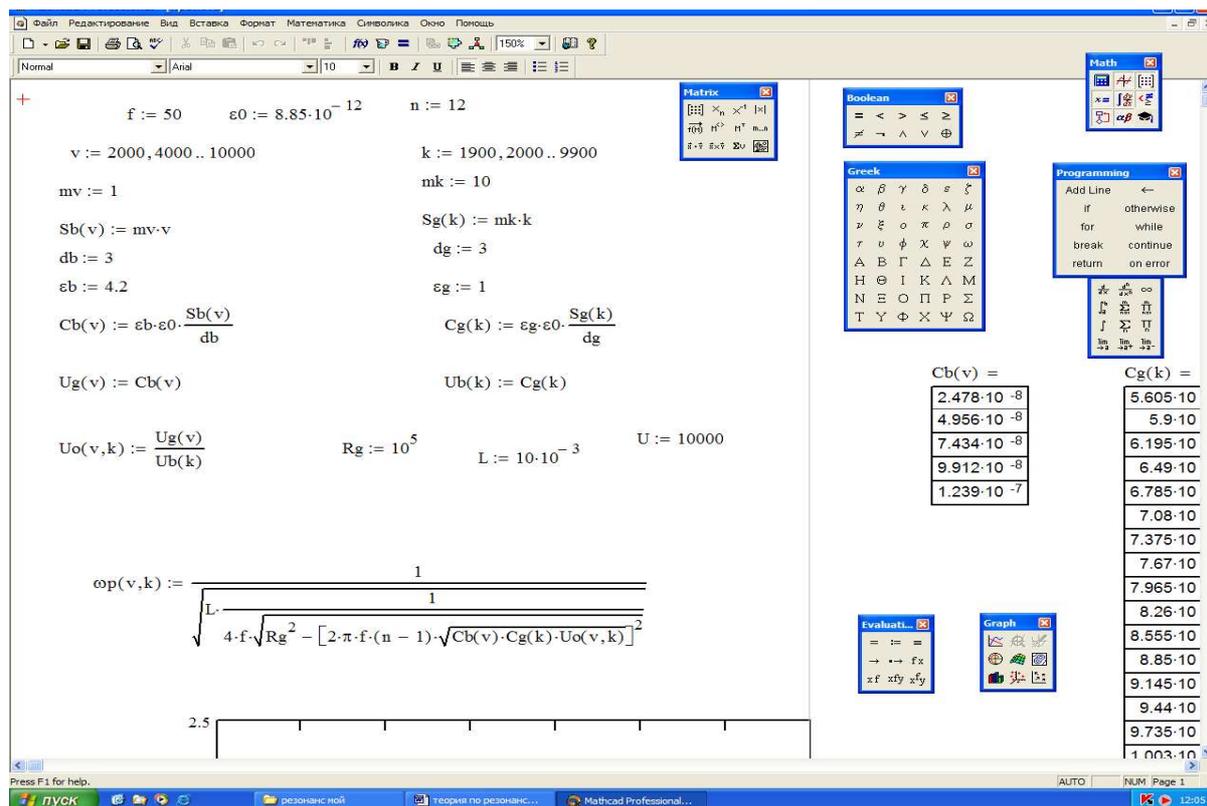


Рисунок 4 - Математическая модель для расчета резонансной частоты

По результатам расчетов математической модели были построены зависимости, представленные ниже (рисунок 5).

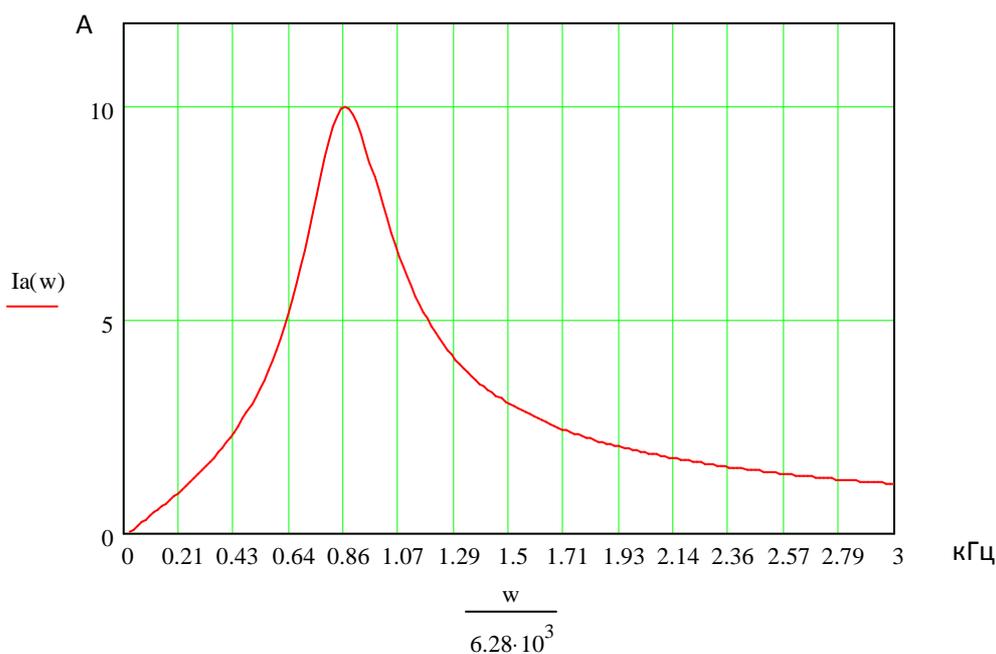


Рисунок 5 - Зависимость тока разрядного промежутка от изменения питающей частоты

Из графика видно, что при частоте питающего сигнала 0,86 кГц, ток на разрядном промежутке возрастает до 10 мА. Это притом, что при стандартной частоте 50 Гц он составляет 50 мкА. Таки образом, мощность разрядного устройства возрастает в 1000 раз, следовательно, возрастет производительность генератора озона.

Так же из графика видно, что при увеличении частоты более 0,86 кГц, ток на озонирующем блоке снижается, следовательно, дальнейшее увеличение частоты не целесообразно.

Надо отметить, что при изменении конструктивных параметров озонирующего блока, зависимость тока от частоты тоже изменяется, что показано на рисунке 4.3.

Данный график построен при следующих значениях конструкции генерирующего блока:

- диэлектрические барьеры:  $A_{11}=0,1 \text{ м}^2$ ,  $A_{12}=0,08 \text{ м}^2$ ,  $A_{13}=0,06 \text{ м}^2$  (A - площадь диэлектрического барьера, при толщине 3 мм)
- воздушный промежуток:  $A_{21}=0,1 \text{ м}^2$ ,  $A_{22}=0,08 \text{ м}^2$ ,  $A_{23}=0,06 \text{ м}^2$  (A - площадь воздушного зазора, при его ширине 3 мм)

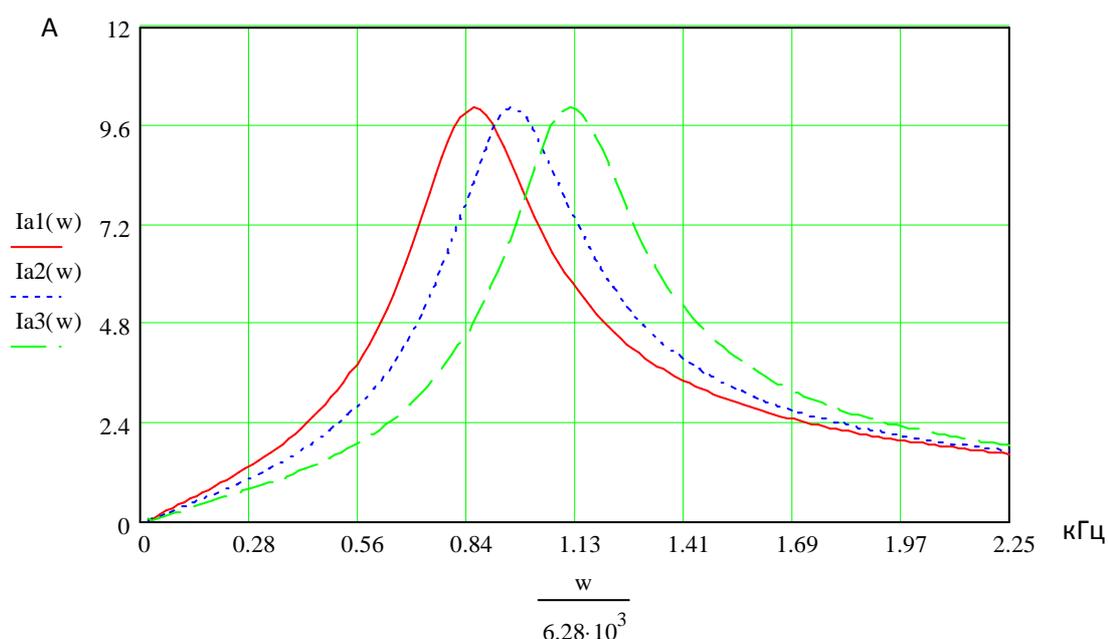


Рисунок 4.3 Зависимость тока от частоты при изменении конструктивных параметров озонирующего блока

Необходимо отметить, что при изменении размеров разрядного устройства изменяется его емкость. Созданная нами математическая модель учитывает это изменение. При выполнении расчета видна следующая зависимость - при увеличении размеров разрядного устройства его емкость увеличивается. Так, при площади диэлектрических барьеров и воздушного промежутка  $0,08 \text{ м}^2$ , емкость барьеров составляет  $5,33 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$ , а емкость воздушного промежутка -  $2,13 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ . При увеличении площади до  $0,1 \text{ м}^2$  емкость барьерного промежутка становится равной  $6,67 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$ , а емкость воздушного промежутка возрастает до  $2,67 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ .

Из графика видно, что при уменьшении площади диэлектрических барьеров и воздушного промежутка, токовый максимум сдвигается в сторону увеличения частоты. Так, при площади диэлектриков  $0,1 \text{ м}^2$ , резонансная частота имеет значение  $860 \text{ Гц}$ , а при их уменьшении до  $0,06 \text{ м}^2$ , она возрастает до  $1120 \text{ Гц}$ , но при этом не изменяется максимальное значение тока. Так, из графика видно, что максимальное значение тока во всех рассмотренных случаях равно  $10 \text{ мА}$ .

### Литература

1. Андрейчук В.К. Озонатор / В.К. Андрейчук, Д.А. Нормов, С.В. Вербицкая, Д.А. Овсянников, В.В. Лисицин, А.А. Шевченко, Т.А. Нормова/ патент на изобретение RUS 2198134 30.10.2001.
2. Григораш О.В. Особенности расчета КПД и массогабаритных показателей статических преобразователей /О.В. Григораш, А.А. Шевченко, А.Е. Усков, В.В. Энговатова/ Труды Кубанского государственного аграрного университета. –Краснодар: КубГАУ, 2011. Т. 1. № 30. С. 248-252.
3. Нормов Д.А. Расчет резонансной частоты электроразрядного промежутка озонатора /Д.А. Нормов, А.А. Шевченко, Р.С. Шхалахов, А.В. Квитко/ Механизация и электрификация сельского хозяйства. – М.: 2007. – №8, С. 23-24.
4. Степура Ю.П. Расчет показателей надежности электротехнических устройств /Ю.П. Степура, А.А. Шевченко, А.В. Квитко, Д.В. Солодкий/ Труды Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар: КубГАУ, 2011. Т. 1. № 31. С. 246-249.
5. Филиппов Ю.В. Влияние величины разрядного промежутка на электрические характеристики озонаторов / Ю.В. Филиппов, В.П. Вендилло // Журнал физической химии. – М.:1959. - Т.33, Вып. 10. - С. 2359-2364.

6. Шевченко А.А. Влияние диэлектрических барьеров на электрические параметры электроозонатора / А.А. Шевченко, А.В. Квитко / Труды Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар: КубГАУ, 2008. – № 1, С. 92-94.

7. Шевченко А.А. Параметры электроозонирования для предпосевной обработки семян кукурузы /А.А. Шевченко/ автореферат на соискание ученой степени кандидат технических наук. – Краснодар: КубГАУ, 2005

### References

1. Andrejchuk V.K. Ozonator / V.K. Andrejchuk, D.A. Normov, S.V. Verbickaja, D.A. Ovsjannikov, V.V. Lisicin, A.A. Shevchenko, T.A. Normova/ patent na izobrenie RUS 2198134 30.10.2001.

2. Grigorash O.V. Osobnosti rascheta KPD i massogabaritnyh pokazatelej staticheskikh preobrazovatelej /O.V. Grigorash, A.A. Shevchenko, A.E. Uskov, V.V. Jengovatova/ Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. –Krasnodar: KubGAU, 2011. T. 1. № 30. S. 248-252.

3. Normov D.A. Raschet rezonansnoj chastoty jelektrozrazjadnogo promezhutka ozonatora /D.A. Normov, A.A. Shevchenko, R.S. Shhalahov, A.V. Kvitko/ Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. – M.: 2007. – №8, S. 23-24.

4. Stepura Ju.P. Raschet pokazatelej nadezhnosti jelektrotehnicheskikh ustrojstv /Ju.P. Stepura, A.A. Shevchenko, A.V. Kvitko, D.V. Solodkij/ Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – Krasnodar: KubGAU, 2011. T. 1. № 31. S. 246-249.

5. Filippov Ju.V. Vlijanie velichiny razrjadnogo promezhutka na jelektricheskie harakteristiki ozonatorov / Ju.V. Filippov, V.P. Vendillo // Zhurnal fizicheskoi himii. – M.:1959. - T.ZZ, Vyp. 10. - S. 2359-2364.

6. Shevchenko A.A. Vlijanie dijelektricheskikh bar'erov na jelektricheskie parametry jelektroozonatora / A.A. Shevchenko, A.V. Kvitko / Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – Krasnodar: KubGAU, 2008. – № 1, S. 92-94.

7. Shevchenko A.A. Parametry jelektroozonirovanija dlja predposevnoj obrabotki semjan kukuruzy /A.A. Shevchenko/ avtoreferat na soiskanie uchenoi stepeni kandidat tehniceskikh nauk. – Krasnodar: KubGAU, 2005