

УДК 621.384

UDC 621.384

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА  
НА РАБОТУ ГЕНЕРАТОРА ОЗОНА**

**INFLUENCE OF ELECTRIC RESONANCE ON  
A GENERATOR OF OZONE**

Шевченко Андрей Андреевич  
доцент, [mnpkkgau@mail.ru](mailto:mnpkkgau@mail.ru)

Shevchenko Andrey Andreevich  
associate professor, [mnpkkgau@mail.ru](mailto:mnpkkgau@mail.ru)

Кожокарь Александр Геннадьевич  
студент, [9284421533@mail.ru](mailto:9284421533@mail.ru)

Kozhokar Alexander Gennadevich  
student, [9284421533@mail.ru](mailto:9284421533@mail.ru)

Федоров Игорь Игоревич  
студент, [9284421533@mail.ru](mailto:9284421533@mail.ru)  
*Кубанский государственный аграрный  
университет, Краснодар, Россия*

Fedorov Igor Igorevich  
student, [9284421533@mail.ru](mailto:9284421533@mail.ru)  
*Kuban state agrarian university, Krasnodar, Russia*

В статье рассмотрены 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 the 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

Явление резонанса в электрических цепях весьма широко используется в современной электротехнике и, особенно в технике высокой частоты.

Генераторы высокой частоты, применяемые в радиотехнике, содержат в себе в качестве основного элемента колебательный контур, колебания тока и напряжения в котором происходят с резонансной частотой или с частотой, весьма близкой к резонансной. Антенны передающих и приемных радиостанций вместе с включенными в их цепь катушками или конденсаторами также представляют собой колебательные контуры [2].

Электрический резонанс можно так же использовать и в электроозонаторах, например, прибегая к эффекту резонансной частоты.

Подбор резонансной частоты позволит вводить в резонанс электроозонаторы любых размеров и, как следствие, повышать их коэффициент полезного действия и производительность [4]. Эта проблема

актуальна, так как коэффициент полезного действия генераторов озона очень мал (до 10%) [1].

Рассмотрим теоретические положения электрического резонанса для электрического контура. Резонанс в контуре наступает при совпадении входного тока и напряжения по фазе, при этом емкостная и индуктивная составляющая равны между собой. Это говорит о том, что резонанса можно достичь, подобрав емкость или индуктивность [5]. Но емкость и индуктивность, как известно, зависят от геометрических размеров, однако конструкция озонирующего блока не всегда позволяет варьировать размером диэлектрических пластин и воздушного зазора. Подбор емкости усложняется также и тем, что озонатор работает на напряжениях от 7 до 10 кВ. Трансформатор с небольшим изменением индуктивности при таких напряжениях значительно увеличивается в размерах, что нежелательно, так как снижается мобильность установки [6].

Одним из выходов из этого положения, как было сказано выше, является подбор частоты, при которой ток и напряжение совпали бы по фазе. Это позволит добиваться эффекта резонанса без существенного изменения конструкции устройства. Современная радиоэлектроника позволяет собрать генератор частоты небольшого размера, который без труда можно установить в блок управления генератора озона [3].

Подбор частоты в зависимости от размеров разрядного устройства и трансформатора позволит без проведения специальных электрических измерений рассчитывать частоту резонанса. Частоту резонанса можно будет рассчитать, зная размеры диэлектрических барьеров, воздушного промежутка и паспортных данных трансформатора.

Этот расчет позволит уменьшить затраты энергии обыкновенного пользователя. Это является актуальным вопросом, так как электроозонаторы в последнее время находят применение в быту и сельском хозяйстве.

Для того, что бы исследовать явление резонанса в озонаторе, необходимо рассмотреть электрическую схему устройства [1]. Составим схему замещения электроозонатора (рисунок 1):

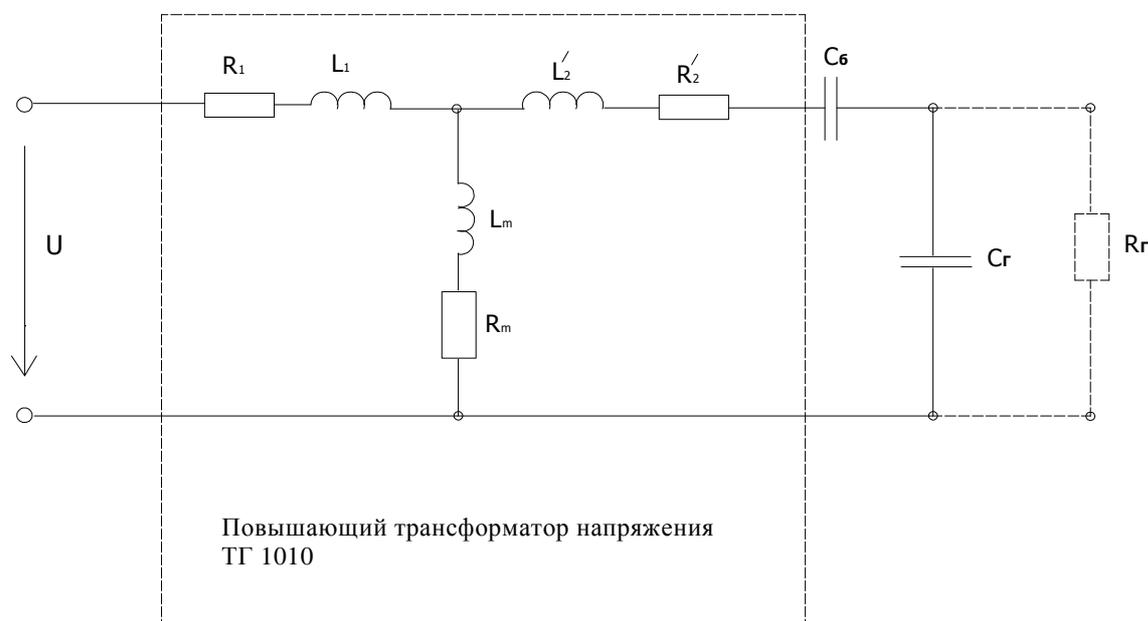


Рисунок 1 - Схема замещения электроозонатора

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;  $C_б$  – емкость барьеров пластинчатого озонатора;

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

Представленная схема содержит трансформатор, емкостные составляющие газоразрядного промежутка и диэлектрических барьеров.

Активное сопротивление газоразрядного промежутка изображено пунктирной линией (рисунок 1), потому что оно появляется в момент зажигания разряда.

Для проведения расчетов схема замещения электроозонатора преобразуется в эквивалентную электрическую схему (рисунок 2) [6]:

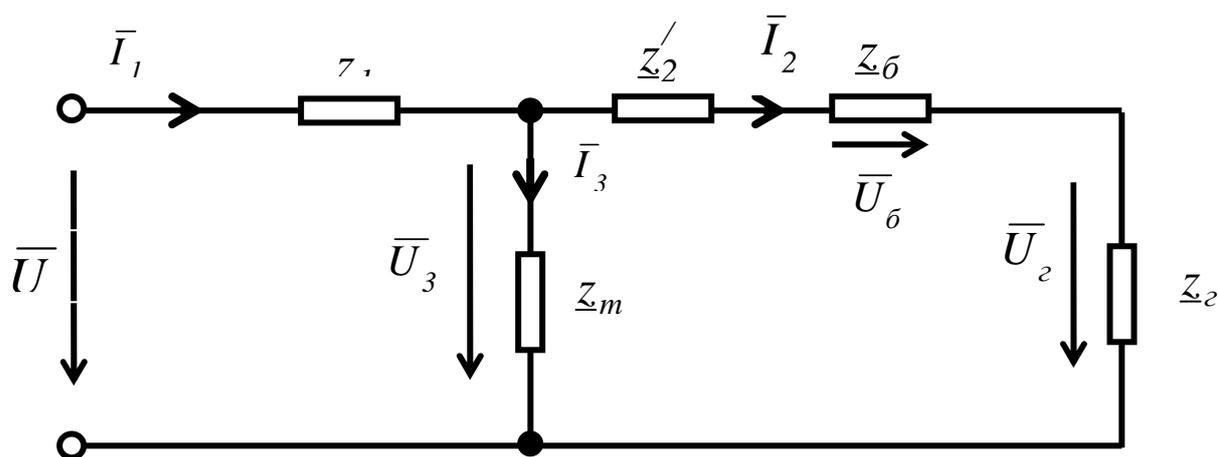


Рисунок 2 - Эквивалентная схема замещения генератора озона

где  $z_1 = R_1 + j\omega L_1$  - комплекс полного сопротивления первичной обмотки трансформатора;  $z_2' = R_2' + j\omega L_2'$  - комплекс полного сопротивления вторичной обмотки трансформатора;  $z_m = R_m + j\omega L_m$  - комплекс полного сопротивления контура намагничивания;  $z_2 = -j \frac{1}{\omega C_2}$ ,  $z_6 = -j \frac{1}{\omega C_6}$  - эквивалентные сопротивления газового промежутка и диэлектрических барьеров озонирующего блока генератора озона;  $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3$  - комплексные токи в электрических ветвях эквивалентной схемы замещения;  $\bar{U}_3, \bar{U}_6, \bar{U}_r$  - падение напряжения на вторичной обмотке трансформатора, на барьерах электроозонатора и в газовом промежутке;  $\bar{U}$  - напряжение питающей сети в комплексном выражении.

Генератор озона питается сетевым напряжением, следовательно, питающее напряжение в формульном выражении имеет вид:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $U_m$  – амплитудное значение питающего напряжения.

Напряжение  $\bar{U}_\delta$ ,  $\bar{U}_z$  и ток, протекающий через озонирующий блок, определяются по формулам:

$$\bar{U}_\delta = \bar{I}_2 \cdot \underline{z}_\delta, \quad (2)$$

$$\bar{U}_z = \bar{I}_2 \cdot \underline{z}_z, \quad (3)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_3}{\underline{z}'_2 + \underline{z}_\delta + \underline{z}_z}, \quad (4)$$

Исходя из метода узловых потенциалов, напряжение  $\bar{U}_3$

$$\bar{U}_3 = \frac{\bar{U} \cdot \frac{1}{\underline{z}_1}}{\frac{1}{\underline{z}_1} + \frac{1}{\underline{z}'_2 + \underline{z}_\delta + \underline{z}_z} + \frac{1}{\underline{z}_m}} = \frac{\bar{U}}{1 + \frac{1}{\underline{z}'_2 + \underline{z}_\delta + \underline{z}_z} + \frac{1}{\underline{z}_m}}, \quad (5)$$

Подставив в выражение (5) значения эквивалентных сопротивлений и питающего напряжения, получим зависимость

$$\bar{U}_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_m \cdot e^{j\varphi_0}}{1 + \frac{R_1 + j\omega L_1}{R'_2 + j\omega \left( L'_2 - \frac{C_\delta + C_z}{C_\delta \cdot C_z} \right)} + \frac{R_1 + j\omega L_1}{R_m + j\omega L_m}}, \quad (6)$$

Таким образом, зная значение напряжения  $U_3$ , определяется ток, проходящий через озонирующий блок озоногенератора

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_3}{\left( 1 + \frac{\underline{z}_1}{\underline{z}'_2 + \underline{z}_\delta + \underline{z}_z} + \frac{\underline{z}_1}{\underline{z}_m} \right) \cdot (\underline{z}'_2 + \underline{z}_\delta + \underline{z}_z)}, \quad (7)$$

Подставив в уравнение (4) значения комплексных сопротивлений, получим

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_3}{R'_2 + j\omega L'_2 - j\omega \left( \frac{C_{\bar{\sigma}} + C_z}{C_{\bar{\sigma}} \cdot C_z} \right)} = \frac{\bar{U}_3}{R'_2 + j\omega \left( L'_2 - \frac{C_{\bar{\sigma}} + C_z}{C_{\bar{\sigma}} \cdot C_z} \right)}, \quad (8)$$

Следовательно, падение напряжения на емкости диэлектрических барьеров и воздушного промежутка

$$\bar{U}_{\bar{\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\bar{U}_m \cdot e^{j\varphi_0} \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_{\bar{\sigma}}} \cdot e^{-j90} \cdot (R_m + j\omega L_m)}{\left( R'_2 + j\omega \cdot \left[ L'_2 - \frac{C_{\bar{\sigma}} + C_z}{C_{\bar{\sigma}} \cdot C_z} \right] \right) \cdot (R_m + R_l + j\omega \cdot [L_m + L_l]) + (R_l + j\omega L_l)}, \quad (9)$$

$$\bar{U}_z = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\bar{U}_m \cdot e^{j\varphi_0} \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_z} \cdot e^{-j90} \cdot (R_m + j\omega L_m)}{\left( R'_2 + j\omega \cdot \left[ L'_2 - \frac{C_{\bar{\sigma}} + C_z}{C_{\bar{\sigma}} \cdot C_z} \right] \right) \cdot (R_m + R_l + j\omega \cdot [L_m + L_l]) + (R_l + j\omega L_l)}, \quad (10)$$

Для упрощения расчетов введем коэффициенты А и В, равные

$$A = \left[ R_l + R_l \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 - \omega^2 \cdot \left( L_2 - \frac{C_{\bar{\sigma}} + C_z}{C_{\bar{\sigma}} \cdot C_z} \right) + (L_3 + L_2) \right], \quad (11)$$

$$B = \left[ R_2 \cdot (L_3 + L_l) + R_3 \cdot \left( L_2 - \frac{C_{\bar{\sigma}} + C_z}{C_{\bar{\sigma}} \cdot C_z} \right) + R_l \cdot \left( L_2 - \frac{C_{\bar{\sigma}} + C_z}{C_{\bar{\sigma}} \cdot C_z} + L_l \right) \right], \quad (12)$$

Таким образом, знаменатель уравнения (9), (10) примет вид

$$A + j\omega B = \sqrt{A^2 + B^2} \cdot e^{j \arctg \frac{\omega B}{A}}, \quad (13)$$

Подставив полученное выражение в уравнения (9) и (10), получим выражение для  $\bar{U}_{\bar{\sigma}}, U'_z$  в комплексной форме

$$\bar{U}_{\bar{\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\bar{U}_m \cdot \sqrt{R_m^2 + \omega^2 L_m^2}}{\omega \cdot C_{\bar{\sigma}} \cdot \sqrt{A^2 + \omega^2 B^2}} \cdot e^{j\varphi_0 - 90 + \arctg \frac{\omega L_m}{R_m} - \arctg \frac{\omega B}{A}}, \quad (14)$$

$$\bar{U}_z = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\bar{U}_m \cdot \sqrt{R_m^2 + \omega^2 L_m^2}}{\omega \cdot C_z \cdot \sqrt{A^2 + \omega^2 B^2}} \cdot e^{j\varphi_0 - 90 + \arctg \frac{\omega L_m}{R_m} - \arctg \frac{\omega B}{A}}, \quad (15)$$

Введем в расчет величину  $\varphi_1$ , имеющую значение:

$$\varphi_1 = -90 + \operatorname{arctg} \frac{\omega L_3}{R_3} - \operatorname{arctg} \frac{\omega B}{A}, \quad (16)$$

Перейдя к мгновенным значениям напряжения, получим:

$$u_{\delta}(t) = \frac{U_m \cdot \sqrt{R_m^2 + \omega^2 L_m^2}}{\omega \cdot C_{\delta} \cdot \sqrt{A^2 + \omega^2 B^2}} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0 + \varphi_1), \quad (17)$$

$$u_2(t) = \frac{U_m \cdot \sqrt{R_m^2 + \omega^2 L_m^2}}{\omega \cdot C_2 \cdot \sqrt{A^2 + \omega^2 B^2}} \cdot \sin(\omega t + \varphi_0 + \varphi_1), \quad (18)$$

Таким образом, используя уравнения (8), (17) и (18), можно определить токи и напряжения озонирующего блока генератора озона. Следовательно, можно рассчитать величину электрических параметров, при которых озонатор войдет в режим резонанса до зажигания разряда.

Электрический резонанс в озонаторе можно получить, если будет соблюдаться условие  $X_L = X_C$ , при этом резонансная частота будет равна:

$$\omega_{\text{рез.}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (19)$$

где  $\omega_{\text{рез.}}$  – частота резонанса;  $L$  – индуктивность контура;  $C$  – полная емкость контура.

Как известно, до зажигания разряда озонирующий блок можно описать следующими уравнениями:

$$U_3 = \frac{U_{\delta}}{\frac{C_{\text{об}}}{C_{\delta}} \cdot \sin \omega t}, \quad (20)$$

$$U_3 = \frac{U_2}{\frac{C_{\text{об}}}{C_2} \cdot \sin \omega t}, \quad (21)$$

где  $U_3$  – действующее значение напряжения на озонаторе;  $U_{\delta}$  – мгновенное значение напряжения на барьере;  $U_2$  – мгновенное значение напряжения в

газовом промежутке;  $C_{об}$  – общая емкость озонирующего блока;  $C_б$  – емкость диэлектрического барьера;  $C_г$  – емкость газового промежутка.

Приравняв правые части уравнений (20) и (21), можно определить емкость  $C_{об}$ :

$$C_{об} = \sqrt{\frac{C_г \cdot C_б}{C_б}} = C_г, \quad (22)$$

Поскольку величина конденсатора зависит от геометрических размеров, емкость его можно определять по формуле

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d}, \quad (23)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $S$  – площадь диэлектрика;  $d$  – расстояние между диэлектриками.

С учетом (23) резонансная частота озонатора до зажигания разряда, если озонирующий блок состоит из двух пластин, будет равна

$$\omega_{рез.} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\epsilon_2 \cdot S_2}{d_2}}}, \quad (24)$$

В случае, когда озонирующий блок состоит более чем из двух диэлектрических пластин, формула приобретает вид:

$$\omega_{рез.} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot \epsilon_0 \cdot (n-1) \cdot \frac{\epsilon_2 \cdot S_2}{d_2}}}, \quad (25)$$

где  $n$  – количество диэлектрических барьеров.

Приведенное значение  $L'_2$  вторичной обмотки трансформатора может быть рассчитано по следующей формуле:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot w^2}{2} \cdot \frac{d^2}{D + \sqrt{D^2 - d^2}}, \quad (26)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость сердечника трансформатора;  $w$  – число

витков обмотки трансформатора;  $d$  – диаметр проволоки обмотки трансформатора;  $D$  – диаметр витка обмотки трансформатора.

Подставив значение индуктивности в выражение (26), получим формулу для определения резонансной частоты электроозонатора до момента зажигания разряда:

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_0 \cdot w^2}{2} \cdot \frac{d^2}{D + \sqrt{D^2 - d^2}} \cdot \epsilon_0 \cdot (n-1) \cdot \frac{\epsilon_2 \cdot S_2}{d_2}}}, \quad (27)$$

При горящем разряде в озонирующем блоке появляется активная составляющая представленная на схеме замещения (рисунок 2) в виде сопротивления. В связи, с появлением активной составляющей, изменятся электрические параметры, необходимые для расчета частоты резонанса при горящем разряде в озонаторе, поэтому сопротивление газоразрядного промежутка  $\underline{z}_r$  примет следующий вид:

$$\underline{z}_r = \frac{R_r}{1 + j\omega C_r R_r}, \quad (28)$$

Что приведет к изменению формулы для определения резонансной частоты:

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_0 \cdot w^2}{2} \cdot \frac{d^2}{D + \sqrt{D^2 - d^2}} \cdot \frac{1}{4 \cdot f \cdot R^2 - \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot (n-1) \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_0 \cdot S_0}{d_0} \cdot \frac{\epsilon_2 \cdot S_2}{d_2} \cdot \frac{U_2}{U_0}}} \right)^2}}}, \quad (29)$$

Расчет данного выражения позволит определить величину частоты питающего сигнала электроозонатора, при которой данное устройство будет входить в режим электрического резонанса.

#### 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. Энгватова/ 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. 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.
6. 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 izobretenie RUS 2198134 30.10.2001.
2. Grigorash O.V. Osobennosti 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 jelektrozrjadnogo promezhutka ozonatora /D.A. Normov, A.A. Shevchenko, R.S. Shhalahov, A.V. Kvitko/ Mehanizacija i jelektifikacija 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. 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.
6. Shevchenko A.A. Parametry jelektroozonirovanija dlja predposevnoj obrabotki semjan kukuruzy /A.A. Shevchenko/ avtoreferat na soiskanie uchenoj stepeni kandidat tehniceskikh nauk. – Krasnodar: KubGAU, 2005