

УДК 621.374.

Хандола Ольга Юрьевна, асп.

Черенков Александр Данилович, д-р техн. наук, проф.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, г. Харьков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕНЕРАТОРЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ФАЗОВОЙ ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

В данной статье представлены исследования по определению параметров системы преобразования частоты мм генератора которые обеспечивают минимум дисперсии фазы колебаний выходного сигнала.

Ключевые слова: гrena тутового шелкопряда; электромагнитное излучение; крайневисокочастотный диапазон; дисперсия фазы колебаний; параметры системы ФАПЧ.

УДК 621.374.

Хандола Ольга Юрійовна, асп.

Черенков Олександр Данилович, д-р техн. наук, проф.

Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка, м. Харків

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ФЛУКТУАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ГЕНЕРАТОРІ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ НА ОСНОВІ ФАЗОВОЇ ПІДСТРОЙКИ ЧАСТОТИ

У даній статті представлені дослідження для визначення параметрів системи перетворення частоти мм генератора, які забезпечують мінімум дисперсії фази коливань вихідного сигналу.

Ключові слова: гrena тутового шовкопряда; електромагнітне випромінювання; крайневисокочастотний діапазон; дисперсія фази коливань; параметри системи ФАПЧ.

UDK 621.374.

Handola Olga Yurevna, Ph. D. student

Cherenkov Aleksandr Danilovich, Dr. Eng. Sc., Prof.

Kharkov national technical university of agriculture the name of P. Vasilenko, Kharkov

THEORETICAL ANALYSIS OF FLUCTUATION PROCESSES IN MILLIMETER RANGE PHASE-LOCK LOOP GENERATOR

This article presents a research into determination of parameters of the system for frequency conversion in mm generator, which provide minimum fluctuations phase dispersion of the output signal.

Key words: silkworm grain; electromagnetic radiation; superhigh frequency range; fluctuations phase dispersion; PLL system parameters.

Введение

Литературный анализ показывает, что в настоящее время в Украине урожайность шелкопряда находится на низком уровне [1]. Это связано с тем, что дробно-товарное шелководство во многих хозяйствах является нерентабельным и требует внедрения прогрессивных технологий на основе применения электромагнитных излучений. Применение таких технологий требует проведения как теоретических исследований по определению биотропных параметров ЭМП, так и создания генераторов в коротковолновой области миллиметрового диапазона для облучения грены тутового шелкопряда [2].

Из литературных источников следует, что создание высокостабильных по частоте источников ЭМ излучения в коротковолновой части миллиметрового диапазона является довольно сложной научно-технической задачей [3].

В настоящее время существующие полупроводниковые приборы позволяют создавать высокостабильные, перестраиваемые по частоте генераторы миллиметрового диапазона, у которых СВЧ часть построена на основе фазовой перестройки частоты (ФАПЧ), а необходимая частота и мощность в миллиметровом диапазоне может быть получена умножителем частоты на диоде с барьером Шоттки [4].

Цель и задачи исследования. Целью настоящей статьи являются исследования флуктуационных процессов в системе ФАПЧ генератора с определением её основных параметров.

Основная часть

СВЧ часть генератора на основе ФАПЧ, приведенная на рис. 1, требует определения её основных параметров на основе теоретического анализа флуктуационных процессов в системе преобразования частоты.

В приведенной схеме (рис.1): блок $1/p$ отображает операцию интегрирования, соответствующую выражению (3); $F(\varphi)$ – дискриминационная характеристика фазового детектора; $S_{yэ}(p)$ – крутизна регулировочной характеристики СГ; $K_{\phi}(p)$ – коэффициент передачи ФНЧ; $K_{yуч}(p)$, $K_{yнт}$, $K_{СГ}$ – коэффициенты передачи УПЧ, УПТ и СГ.

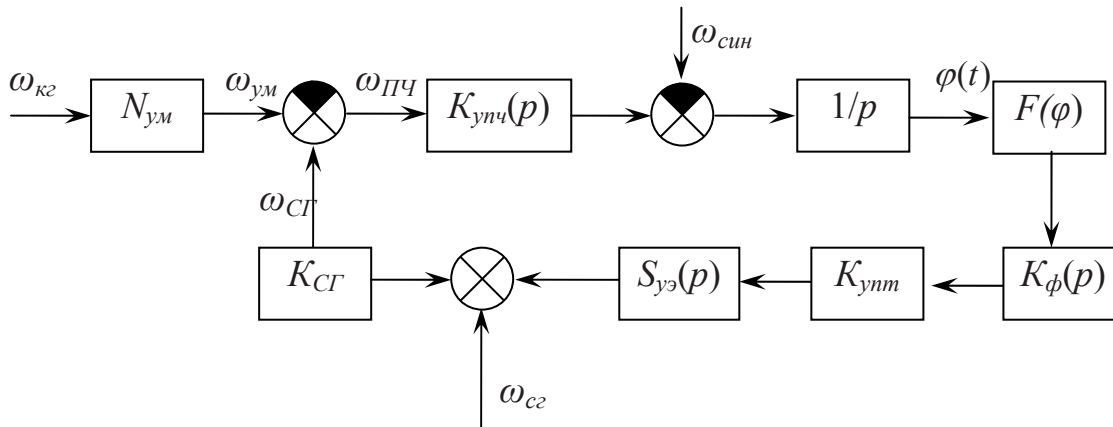


Рис. 1. Структурная схема с генератором на основе ФАПЧ

Из рассмотрения структурной схемы (рис. 2) следует, что показатели системы преобразования частоты (СПЧ) КГ и частоты СГ всецело определяются показателями ФАПЧ: полосами схватывания и удержания, устойчивостью, фильтрующей способностью, числом колец ФАПЧ. На характеристики ФАПЧ оказывают большое влияние: коэффициент умножения частоты $N_{ум1}$, запаздывание в трактах усилителя, умножителя и синтезатора частот, применение пропорционально-интегрирующего фильтра после фазового детектора.

В этой связи возникает задача по теоретическому и практическому исследований стабильности частоты СГ, которая зависит от параметров преобразования частоты [5]. Оптимальные параметры схемы генератора КВЧ диапазона определяются по критерию минимума дисперсии частоты (фазы) колебаний выходного сигнала синхронизируемого генератора с учетом характерных особенностей спектров всех элементов схемы [6]:

$$\sigma_{\varphi_0}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S_{\varphi_0}(\Omega) \frac{1}{1 + (0,5\Omega\tau)^2} d\Omega, \quad (1)$$

где $S_{\varphi_0}(\Omega)$ – энергетический спектр изменения частоты СГ;

τ – интервал времени измерения;

$\sigma_{\varphi_0}^2$ – дисперсия отклонений частоты СГ.

$S_{\varphi_0}(\Omega)$ может быть представлено выражением [4]:

$$S_{\varphi_0}(\Omega) = S_{\varphi_{СГ}}(\Omega) \left| \frac{1}{1 + W(j\Omega)} \right|^2 + S_{\varphi_{СПЧ}}(\Omega) \left| \frac{W(j\Omega)}{1 + W(j\Omega)} \right|^2, \quad (2)$$

где $S_{\varphi_{СГ}}(\Omega)$ – энергетический спектр синхронизируемого генератора при разомкнутой петле ФАПЧ;

$S_{\varphi_{СПЧ}}(\Omega)$ – энергетический спектр всех источников флуктуаций, считая, что они некоррелированы между собой;

$W(j\Omega)$ – передаточная функция разомкнутой системы ФАПЧ.

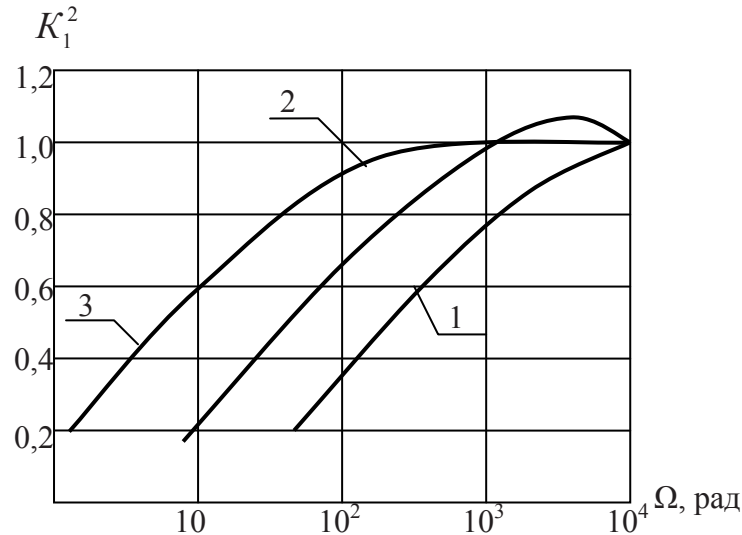


Рис. 2. Зависимость $K_1^2(\Omega)$ для различных постоянных (T) и полосы удержания:

- 1 – $T_1 = 10^{-3}$ с; $T_2 = 10^{-4}$ с; $T_{\PhiД} = 10^{-3}$ с; $T_y = 10^{-6}$ с; $\omega_{y\partial} = 10^6$ рад;
- 2 – $T_1 = 10^{-3}$ с; $T_2 = 10^{-4}$ с; $T_{\PhiД} = 10^{-3}$ с; $T_y = 10^{-6}$ с; $\omega_{y\partial} = 10^5$ рад;
- 3 – $T_1 = 10^{-2}$ с; $T_2 = 10^{-3}$ с; $T_{\PhiД} = 10^{-3}$ с; $T_y = 10^{-6}$ с; $\omega_{y\partial} = 10^4$ рад

С целью упрощения математических выкладок пренебрежением запаздыванием в трактах умножителя и УПЧ, и будем считать коэффициенты передачи всех звеньев, кроме УПЧ, ФД и ФНЧ, независимыми от частоты в полосе пропускания системы. Кроме того, пренебрежем влиянием ветви синтезатора на передаточную функцию системы и ограничимся учетом собственных шумов синхронизируемого генератора, кварцевого генератора и умножителя частоты. Тогда с учетом допущений энергетический спектр частоты флуктуаций синхронизируемого генератора будет определяться выражением:

$$S_{\varphi_0}(\Omega) = S_{\varphi_{CG}}(\Omega) \left| \frac{1}{1 + W(j\Omega)} \right|^2 + [S_{\varphi_{KT}}(\Omega) + S_{\varphi_{YM}}(\Omega)] N_{YM}^2 \left| \frac{W(j\Omega)}{1 + W(j\Omega)} \right|^2, \quad (3)$$

Из рассмотрения структурной схемы (рис.1) следует, что передаточная $W(j\Omega)$ функция разомкнутой системы будет определяться выражением:

$$W(j\Omega) = \frac{\omega_{y\partial} [1 + (j\Omega)T]}{\{[1 + (j\Omega)T_y][1 + (j\Omega)T_{\PhiД}][1 + (j\Omega)T_2]\} j\Omega N_{YM}} = \omega_{y\partial} [1 + (j\Omega)T] \{ [1 + j\Omega(T_y + T_{\PhiД} + T_2 + (j\Omega)^2(T_2T_y + T_yT_{\PhiД} + T_{\PhiД}T_2) + (j\Omega)^3T_yT_{\PhiД}T_2] j\Omega N_{YM} \}^{-1}, \quad (4)$$

где $\omega_{y\partial} = K_y \cdot K_{\PhiД} \cdot K_{УПЧ} \cdot K_{CG} \cdot S_y$ – полоса удержания системы ФАПЧ;

$T_y, T_{\PhiД}$ – постоянные времени усилителя промежуточной частоты и фазового детектора, соответственно.

После подстановки (4) в (3) выражение энергетического спектра синхронизируемого генератора принимает вид:

$$S_{\varphi_0}(\Omega) = S_{\varphi_{CG}}(\Omega) K_1^2(\Omega) + [S_{\varphi_{KT}}(\Omega) + S_{\varphi_{YM}}(\Omega)] N_{YM}^2 K_2^2(\Omega); \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 \text{где } K_1^2(\Omega) = & \left\{ N_{ym} \Omega^2 [N_{ym} (1 + T_y^2 \Omega^2)(1 + T_{\phi D}^2 \Omega^2)(1 + T_2^2 \Omega^2) - \right. \\
 & \left. - (T_y + T_{\phi D} - T_1 + T_2) \omega_{y\partial} + (T_{\phi D} T_1 T_2 + T_y T_{\phi D} T_1 - T_y T_{\phi D} T_2 + T_y T_1 T_2) \Omega^2 \omega_{y\partial} \right\} \times \\
 & \times \left\{ [-N_{ym} (T_y + T_{\phi D} + T_2) \Omega^2 + N_{ym} T_y T_{\phi D} T_2 \Omega^4 + \omega_{y\partial}]^2 + \right. \\
 & \left. + \Omega^2 [N_{ym} - N_{ym} (T_{\phi D} T_2 + T_y T_{\phi D} + T_y T_2) \Omega^2 + T_1 \omega_{y\partial}]^2 \right\}^{-1} + \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & j \{ N_{ym} \Omega [1 - \Omega^2 (-T_1 T_2 - T_{\phi D} T_1 + T_{\phi D} T_2 + T_y T_{\phi D} - T_y T_1 + T_y T_2 + T_y T_{\phi D} T_1 T_2 \Omega^2) \omega_{y\partial} \} \times \\
 & \times \left\{ [-N_{ym} (T_y + T_{\phi D} + T_2) \Omega^2 + N_{ym} T_y T_{\phi D} T_2 \Omega^4 + \omega_{y\partial}]^2 + \right. \\
 & \left. + \Omega^2 [N_{ym} - N_{ym} (T_{\phi D} T_2 + T_y T_{\phi D} + T_y T_2) \Omega^2 + T_1 \omega_{y\partial}]^2 \right\}^{-1} \Big|^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_2^2 = & \left\{ \omega_{y\partial} [\omega_{y\partial} + \Omega^2 (-N_{ym} T_1 + N_{ym} T_{\phi D} - N_{ym} T_1 + N_{ym} T_2) - \right. \\
 & \left. - N_{ym} (T_{\phi D} T_1 T_2 \Omega^2 + T_y T_{\phi D} T_1 \Omega^2 - T_y T_{\phi D} T_2 \Omega^2 + T_y T_1 T_2 \Omega^2 + T_1^2 \omega_{y\partial}) \right\} \times
 \end{aligned}$$

$$\left\{ N_{ym}^2 [(-T_y - T_{\phi D} - T_2) \Omega^2 + T_y T_{\phi D} T_2 \Omega^4 + \omega_{y\partial}]^2 + \right.$$

$$\left. j \{ \Omega [-1 - (T_y T_1 + T_{\phi D} T_1 - T_y T_2 - T_{\phi D} T_2 - T_1 T_2) \Omega^2 + T_y T_{\phi D} T_1 T_2 \Omega^4] \omega_{y\partial} \} \times \right.$$

$$\left. \times \left\{ N_{ym} [(-T_y - T_{\phi D} - T_2) \Omega^2 + T_y T_{\phi D} T_2 \Omega^4 + \omega_{y\partial}]^2 + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \Omega^2 [-N_{ym} + N_{ym} (T_{\phi D} + T_y T_{\phi D} + T_y T_2) \Omega^2 - T_1 \omega_{y\partial}]^2 \right\}^{-1} \Big|^2 \quad (7)$$

Для оценки возможной минимальной дисперсии фазы (частоты) однокольцевой системы ФАПЧ определим максимальное и минимальное возможное значение полосы удержания. Максимальное возможное значение $\omega_{y\partial}$ определяется из условия устойчивости системы:

$$\omega_{y\partial} < \frac{1}{T_3} \quad (8)$$

где T_3 – время задержки в кольце ФАПЧ, определяемое, в основном, постоянной времени контуров усилителя промежуточной частоты, которая определяется из выражения (8).

Полагая число каскадов $n = 3$, $\alpha_{\Delta} = 1 \dots 2$, а $\Delta f = 1$ МГц, величина T_y будет равна:

$$T_y = 3 \cdot \frac{1}{3,14} \cdot \frac{1}{10^6} \text{ с} \quad (9)$$

Из выражения (8) находим, что максимальное значение полосы удержания ФАПЧ будет равно 10^6 рад.

Минимально допустимое значение $\omega_{y\partial}$ будет определяться полосой охватывания (F_{cx}) ФАПЧ:

$$\omega_{y\partial} > 2\pi F_{cx}, \quad (10)$$

$$\text{где } F_{cx} \geq f_{KG} N (\delta_{KG} + \delta_{CG}) .$$

Положим $f_{KG} = 3,5 \cdot 10^8$ Гц; $N = 4,5 \cdot 10^2$; $\delta_{KG} = 10^{-10}$; $\delta_{CG} = 10^{-8}$ при $\tau_u = 100$ с.

Тогда, $F_{cx} \geq 3,5 \cdot 10^8 \cdot 4,5 \cdot 10^2 (10^{-10} + 10^{-8}) = 1575$ Гц, а $2\pi F_{cx} \geq 9891$ рад.

Следовательно, $10^4 \leq \omega_{y\delta} > 10^6$ рад.

Из выражения (4) следует, что каждый источник флуктуаций имеет свой коэффициент ослабления системой ФАПЧ, зависящий от частоты и параметров системы [7]. При выборе постоянной фильтра T_1 надо стремиться к тому, чтобы выполнялось соотношение $T_1 > \frac{1}{\Delta\Omega_{\text{ФАПЧ}}}$, где $\Delta\Omega_{\text{ФАПЧ}}$ – полоса пропускания системы. В этом случае не происходит ухудшения устойчивости системы при необходимой полосе пропускания $\Delta\Omega_{\text{ФАПЧ}} \geq \omega_{y\delta}$. При полосе удержания $\omega_{y\delta} = 10^5$ постоянную фильтра T_1 выбираем в пределах 10^{-3} с.

Как следует из рис. 2 и рис. 3, оптимальными параметрами пропорционально-интегрирующего фильтра будут $T_1 = 10^{-3}$ с, $T_2 = 10^{-4}$ с при полосе пропускания системы $\Delta\Omega_{\text{ФАПЧ}} = 10^5$ рад.

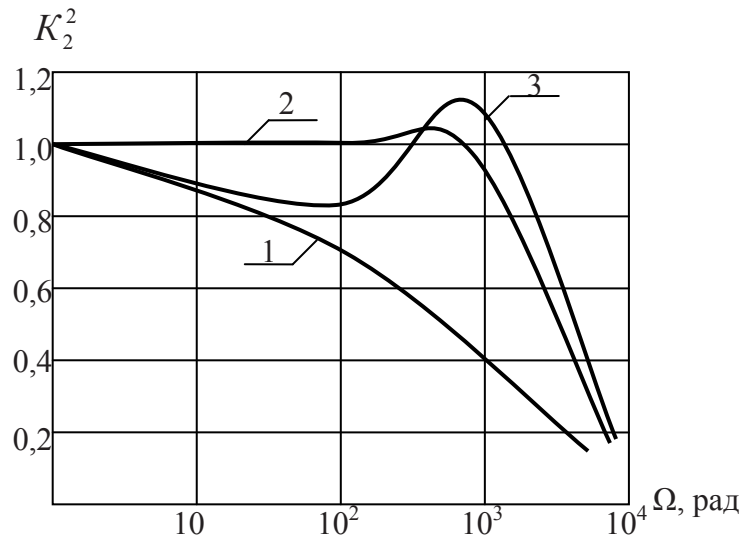


Рис. 3. Зависимость $K_2^2(\Omega)$ для различных постоянных (T) и полосы удержания:
 1 – $T_1 = 10^{-3}$ с; $T_2 = 10^{-4}$ с; $T_{\text{ФД}} = 10^{-3}$ с; $T_y = 10^{-6}$ с; $\omega_{y\delta} = 10^6$ рад;
 2 – $T_1 = 10^{-3}$ с; $T_2 = 10^{-4}$ с; $T_{\text{ФД}} = 10^{-3}$ с; $T_y = 10^{-6}$ с; $\omega_{y\delta} = 10^5$ рад;
 3 – $T_1 = 10^{-2}$ с; $T_2 = 10^{-3}$ с; $T_{\text{ФД}} = 10^{-3}$ с; $T_y = 10^{-6}$ с; $\omega_{y\delta} = 10^4$ рад.

При анализе флуктуаций в схеме ФАПЧ рассматривается медленные и быстрые флуктуации. Медленные уходы частоты синхронизируемого генератора ослабляются тем эффективнее, чем меньше их скорость, больше полоса удержания и меньше постоянная времени фильтра. Быстрые флуктуации частоты кварцевого генератора, умножителя, синтезатора, усилителя влияют тем сильнее, чем больше полоса удержания.

Для оценки дисперсии частоты синхронизируемого генератора зададимся значениями энергетических спектров флуктуаций частоты кварцевого генератора, умножителя и синхронизируемого генератора [4,5]:

$$S_{\text{фкг}}(\Omega) = \frac{A_1}{\Omega} + A_2 \Omega^2, \tag{12}$$

$$S_{\text{фум}}(\Omega) = N_{\text{ум}}^2 \frac{B}{\Omega}, \tag{13}$$

$$S_{\text{фсг}}(\Omega) = \frac{C}{\Omega}. \tag{14}$$

где A_1 – коэффициент, характеризующий действие фликер-шумов, он равен $10^{-9} \dots 10^{-10} \text{ Гц}^2$; A_2 – коэффициент, характеризующий действие аддитивного шума и равный 10^{-13} Гц^{-1} ; $B = 10^{-10} \dots 10^{-13} \text{ Гц}^2$ – параметр, зависящий от типа, интенсивности шума, режима работы транзисторов и добротности контуров; $C = 10^4 \text{ Гц}^3$.

С целью повышения стабильности частоты синхронизируемого генератора (в особенности кратковременной) стремятся выполнить все узлы таким образом, чтобы значение их энергетических спектров (фазовых) частотных флуктуаций сигналов было минимально достижимым.

Подставляя (12,13,14) в (5), было получено выражение энергетического спектра синхронизирующего генератора в следующем виде:

$$S_{\varphi_0}(\Omega) = \frac{C}{\Omega^2} K_1^2(\Omega) + \left[\left(\frac{A_1}{\Omega} + A_2 \Omega^2 \right) + N_{\text{ум}}^2 \frac{B}{\Omega} \right] N_{\text{ум}}^2 K_2^2(\Omega). \quad (15)$$

Нестабильность частоты синхронизируемого генератора для различных параметров системы ФАПЧ была определена из выражения [4]:

$$\frac{\sigma(\langle \varphi \rangle \tau_u)}{\omega_{сг}} = \frac{1}{\omega_{сг}} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S_{\varphi_0}(\Omega) \frac{1}{(1 + 0,5\Omega \tau_u)^2} d\Omega}. \quad (16)$$

Как следует из анализа результатов р, наиболее приемлемыми параметрами системы ФАПЧ, при которых нестабильность частоты синхронизируемого генератора составит 10^{-8} , будут параметры: $T_1 = 10^{-3} \text{ с}$; $T_2 = 10^{-4} \text{ с}$; $T_{\text{ФД}} = 10^{-3} \text{ с}$; $T_y = 10^{-6} \text{ с}$; $\omega_{y\theta} = 10^5 \text{ рад}$; $N_{\text{ум}} = 450$, а отношение мощности сигнала к мощности шумов $\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}$ составило 50,6 дБ.

Список литературы

1. Шовківніцтво В. О., Головка, О. З., Злотін М. Ю., Браславський, І.О. Кириченко. - Харків: РВП «Оригінал», 1998.- 416 с.
2. Бойко В. А. Влияние облучения грены электромагнитными волнами СВЧ-диапазона на некоторые биологические показатели двух поколений тутового шелкопряда BOMBYX MORIL/ В. А. Бойко, В. М. Литвин, О. А. Шаламова, С. В. Суханов // Известия Харьковского энтомологического общества. – 2002. – Т. IX, вып.1.– С. 302–305.
3. Мансур М. Высокостабильные СВЧ генераторы для воздействия на личинную стадию вредных насекомых в сельскохозяйственном производстве / М. Мансур, А. Д. Черенков, Е. Л. Пиротти // Вестник национального технического университета «ХПИ». – Харків: НТУ «ХПИ», 2002. – № 7. – С. 131–135
4. Кварцевые и квантовые меры частоты / [И. И. Акулов и др.] под ред. Б. И. Макаренко. – М.: МО СССР, 1976. – 409 с.
5. Коновалов Г. Ф. Радиоавтоматика / Г. Ф. Коновалов. – М.: Высшая школа, 1990. – 335 с.
6. Филиппов Л. М. Шумовые свойства кремниевых мощных СВЧ транзисторов / Л. М. Филиппов // Радиоэлектроника и электросвязь. – 1974. – № 32. – С. 55–64.
7. Первачев С. В. Радиоавтоматика: Учебник для ВУЗов / С. В. Первачев. – М.: Радио и связь, 1982. – 296 с.

Referense

1. Golovko, V.O., Zlotin, O.Z., Braslavskiy, M.Yu., Kyrychenko, I.O. (1998), *Silkworm breeding. [Shovkivnystvov]*, RVP "Original", Kharkiv, 416 p.
2. Boyko, V.A., Litvin, V.M., Shalamova, O.A., Sukhanov, S.V. (2002), "Influence of irradiation of the grain with electric magnetic waves of UHF range on some biological parameters of two generations of silkworm BOMBYX MORIL", ["Vliyanie oblucheniya greny elektromagnitnymi volnami SVCh-diapazona na nekotorye biologicheskie pokazately dvukh

pokoleniy tutovogo shelkopryada BOMBYX MORIL"], *Bulletin of Kharkiv Entomological Society*, Vol. 9, issue 1, P. 302–305

3. Mansur, M., Cherenkov, A.D., Pirotti, E.L. (2002), "Highly stable UHF generators to affect larval stage of pests in agricultural production", ["Vyskostabilnye SVCh generatory dlya vozdeystviya na lichinnuyu stadiyu vrednykh nasekomykh v selskokhozyastvennom proizvodstve"], *Bulletin of National Technical University "KhPI"*, NTU "KhPI", Kharkiv, No. 7, P. 131–135

4. Akulov, I.I. et al, Makarenko, B.I. (ed) (1976), *Quartz and Quanta frequency measurements [Kvartsevye i kvantovye mery chastoty]*, MO SSSR, Moscow, 409 p.

5. Konovalov, G.F. (1990), *Radio automatics. [Radioavtomatika]*, Vysshaya Shkola, Moscow, 335 p.

6. Fillipov, L.M. (1974), "Noise properties of silicon powerful UHF transistors" ["Shumovye svoystva kremnievykh moshnykh SVCh tranzistorov"], *Radioelektronika i elektrosvyaz*, No. 32 P. 55-64

Поступила в редакцию 20.05 2014 г.