

УДК 62.50, 519.6

ОЦЕНКА ВОСПРИИМЧИВОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ К ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЯМ

Н.Г. БУРОМЕНСКИЙ¹

¹16 ЦНИИ МО

В данной статье предложен метод оценки восприимчивости радиоэлектронных средств к импульсным электромагнитным излучениям. Механизм проникновения электромагнитной волны к элементам радиоэлектронных систем и воздействия на них определяется интенсивностью поля излучения на элементах радиоэлектронных систем. Под моделью воздействия импульсов электромагнитных излучений на радиоэлектронные системы понимается физико-аналитическая зависимость между параметрами воздействия импульсов электромагнитных излучений и параметрами образца радиоэлектронных систем. Предложена физико-математическая модель оценки восприимчивости радиоэлектронных средств к импульсным электромагнитным излучениям. В основу разработанной модели была положена физика отказа образца радиоэлектронного средства, представляющая собой описание электромагнитных, электрических и тепловых процессов, приводящих к деградации исходной структуры элементов аппаратуры. Рассмотрены условия, приводящие к общему уравнению процесса функционального поражения радиоэлектронных систем при воздействии импульсов электромагнитного излучения. Рассмотрены внутренние характеристики комплектующих элементов, реагирующих на поражающее воздействие. Получено соотношение для мощности разрушения. Получена зависимость температуры теплового пробоя от длительности воздействующего импульса при различных уровнях мощности. Получено выражение для оценки надежности радиоэлектронной системы при воздействии импульсов электромагнитных излучений как поражающего фактора.

Ключевые слова: восприимчивость, импульсное электромагнитное излучение, радиоэлектронные средства, полупроводниковые приборы, интегральные микросхемы, модель, тепловой пробой.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование технических, информационных, управляющих систем, систем связи развивается по пути их интеллектуализации на основе насыщения различными радиоэлектронными средствами (РЭС). В связи с этим появляется возможность таких воздействий на РЭС, которые ведут к сбоям штатных режимов их работы или разрушению элементов РЭС. Эти так называемые функциональные воздействия осуществляются с использованием мощных импульсов электромагнитных излучений (ИЭИ).

Механизм проникновения электромагнитной волны к элементам РЭС и воздействия на них определяется интенсивностью поля излучения на элементах РЭС (масштаб – $\sim 1\text{кВ/м}$, $\sim 1\text{Вт/см}^2$), доставляемой к этим элементам энергии, а также спектральным составом потока излучения. В сравнении с монохроматическим, широкополосное и сверхширокополосное электромагнитное излучения (0,1–10 ГГц) оказывают комплексное воздействие на объект (прямое проникновение сквозь нарушения сплошности электромагнитных экранов, создание индуцированных токов в металлических элементах конструкции и защитных экранах) и поэтому имеют более высокую проникающую способность.

РЭС, как известно, конструктивно и технологически состоят из аппаратуры, приборов и оборудования (далее – аппаратура), восприимчивость которых к ИЭИ в конечном счете определяется восприимчивостью комплектующих элементов (КЭ), и прежде всего активной их частью – полупроводниковых приборов (ППП) и интегральных микросхем (ИМС).

Между тем элементная база РЭС насыщена ППП и ИМС и характеризуется чрезвычайно малой энергией полезных сигналов, которая на несколько порядков меньше энергии нежелательных электромагнитных воздействий. Данное обстоятельство потенциально обуславливает заметную восприимчивость РЭС к ИЭИ. Под восприимчивостью РЭС будем понимать свойство сохранять параметры, характеризующие ее способность выполнять требуемые функции в за-

данных режимах и в пределах норм, установленных в техническом задании, стандартах и технических условиях во время и после воздействия ИЭИ.

Очевидно, что поражающая способность ИЭИ зависит от диапазона излучения и энергии в импульсе, а диапазон частот, используемый образцом РЭС, является важнейшим критериальным параметром, определяющим его восприимчивость.

Цель работы – разработать модель оценки влияния ИЭИ на РЭС.

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Под моделью воздействия ИЭИ на РЭС будем понимать физико-аналитическую зависимость между параметрами воздействия ИЭИ и параметрами образца РЭС. При разработке модели можно использовать результаты работы [1].

В основу физико-математической модели положим физику отказа образца РЭС, которая представляет собой описание электромагнитных, электрических, тепловых и других процессов, приводящих к деградации исходной структуры элементов аппаратуры, нарушению ее нормального функционирования.

Сам отказ наступает тогда, когда в результате воздействия ИЭИ некоторая характеристика элемента (группы элементов) РЭС достигает своего критического для элемента (группы элементов) уровня. Значение характеристик элемента чаще всего определяется расчетными техническими параметрами, допускающими его применение в той или иной функциональной схеме (усилитель, преобразователь и т. п.). Именно это его значение и определяет уровень прочности (электрической, тепловой), используемых в РЭС ППП и ИМС.

Поражающее действие ИЭИ на РЭС проявляется следующим образом:

- сохраняется работоспособное состояние;
- сохраняется работоспособное состояние, но возможно накопление дефектов (повреждений);
- происходит отказ.

Каждому из этих состояний РЭС соответствуют следующие значения характеристик ИЭИ:

- значение характеристик ИЭИ меньше некоторого максимального, при котором технические параметры элемента РЭС не превышают рабочего значения;
- значение характеристик ИЭИ меньше некоторого максимального, при котором технические параметры РЭС не превышают критического значения, но выше рабочего;
- значение характеристик ИЭИ превышает максимальное, при котором технические параметры элемента РЭС выше некоторого критического значения.

С учетом изложенных исходных предпосылок, рассмотрим условия, приводящие к общему уравнению процесса функционального поражения РЭС при воздействии ИЭИ.

Одним из условий, обеспечивающим правильное отображение моделью реального процесса, является максимально возможное совпадение критериальных величин, по которым анализируется процесс. Поэтому необходимо найти форму такого описания, где бы это требование выполнялось. Для этого нужно составить схему взаимодействия «ИЭИ – объект воздействия». В нашем случае объектом поражения является РЭС. Для описания такого взаимодействия можно выделить группу переменных, которые будем называть сопряженными переменными. Анализ схемы взаимодействия показывает, что достаточно выделить группу из 3-х сопряженных параметров. А вот по каким сопряженным параметрам будет строиться модель, будет зависеть от постановки задачи исследования и состава сопряжения параметров. Анализ алгоритма функционального поражения показывает, что группа сопряженных параметров при воздействии ИЭИ на РЭС может быть больше трех. Назовем такой анализ методом сопряженных параметров. В таблице приведены тройки сопряженных параметров, характеризующих взаимодействие системы «ИЭИ – объект воздействия».

**Сопряженные параметры, характеризующие взаимодействие системы
«ИЭИ – объект воздействия»**

Выделенный критериальный параметр ИЭИ	Внутренняя характеристика РЭС, отвечающая выделенному параметру воздействия	Реакция образца РЭС
Длина волны излучения	Направленное действие антенны	Изменение характеристик антенно-фидерного устройства (АФУ)
Плотность потока энергии	Электрический заряд, рассеиваемая мощность на КЭ	Изменение теплового, электрического режима активных элементов
Длительность импульса	Электрический заряд	Изменение электрического режима активных элементов
Частота повторения импульсов	Электрический заряд, рассеиваемая мощность	Изменение теплового, электрического режима активных элементов

Метод сопряженных параметров позволяет конкретизировать набор и физическое содержание как внешних, так и внутренних параметров моделей.

МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Для дальнейшего построения модели ИЭИ построим общее уравнение развития отказа. Для этого любой КЭ будем рассматривать как энергетическую систему, характеризующуюся следующими параметрами:

- W – накопленная работа разрушения;
- P – мощность процесса разрушения;
- $X_{qэ}$ – эквивалентный энергетический параметр разрушения;
- a_q – чувствительность процесса разрушения.

Опираясь на физическую сущность перечисленных параметров при определении взаимосвязи между этими параметрами, будем исходить из следующих положений. Пусть образец РЭС находится в некоторых условиях $e, e \in E$, для которых возможно поражающее воздействие ИЭИ.

Тогда каждому моменту времени $0 \leq t \leq \tau$ соответствует свое значение накопленной работы разрушения:

$$\left. \begin{array}{l} t = 0 \quad W(0) = 0 \\ \text{при } t > 0 \quad W(t, e) > 0 \\ t = \tau \quad W(\tau, e) = W_{\max} \end{array} \right\}. \quad (1)$$

В соответствии с условием (1) в момент $t = \tau$ накопленная работа разрушения достигла максимального значения W_{\max} , что означает поражение образца РЭС.

Скорость разрушения может быть определена теперь как скорость накопления работы разрушения W :

$$\frac{dW}{dt} = P(t). \quad (2)$$

Величина $P(t)$ является мощностью процесса разрушения.

Рассмотрим теперь внутренние характеристики КЭ, реагирующие на поражающее воздействие.

Возможность применения любого КЭ в РЭС определяется его техническими параметрами $x_T = \{x_1, \dots, x_n\}$, которые зависят от физических свойств материала, из которого изготовлен этот элемент $x_\phi = \{x_{\phi_1}, \dots, x_{\phi_n}\}$. При воздействии эти свойства меняются:

$$x_\phi = x_{\phi_0} \pm \Delta x_\phi = x_{\phi_0} + \varphi(e), \quad (3)$$

где f_{ϕ_0} – исходные физические свойства материала.

Параметры процессов, протекающих в материале КЭ, зависят от текущего состояния материала, его физических свойств и параметров ПФ:

$$П = \psi(f_\phi, e) = \psi[f_{\phi_0} + \varphi(W_e), e]. \quad (4)$$

Мощность процесса разрушения, в свою очередь, зависит от параметров процессов, протекающих в материале КЭ:

$$P = P(П) = P\{\psi[f_{\phi_0} + \varphi(W_e), e]\} = \Phi(f_{\phi_0}, W, e) \quad (5)$$

или $\frac{dW_e}{dt} = \Phi(f_{\phi_0}, W_e, e)$.

Полученное дифференциальное уравнение служит общим уравнением разрушения материала КЭ и описывает аperiodический процесс периода перехода КЭ в состояние отказа.

Отметим, из общих физических соображений видно, что в основе разрушения лежит значение некоторого энергетического параметра X_q , который одновременно учитывает изменения нескольких параметров КЭ, то есть является эквивалентным энергетическим параметром $X_{qэ}$ процесса разрушения. Эквивалентный энергетический параметр $X_{qэ}$ служит мерой скорости накопленной работы разрушения W_e , то есть мерой мощности P .

Тогда для $X_{qэ}$ справедливо соотношение

$$X_{qэ} = f(x_i, e), \quad (6)$$

а (5) может быть записано в виде

$$P = \sum_v a_v x_v,$$

где x_v – энергетические параметры процессов разрушения;

a_v – чувствительность процессов разрушения к изменению соответствующих энергетических параметров.

Будем далее исходить из того, что ИЭИ представляет амплитудно-модулированное колебание и для его описания справедливо

$$S(t) = E_m (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \sin(\omega_o t + \Theta_o), \quad (7)$$

где $E_m (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t})$ – амплитудно-временная характеристика огибающей, параметры которой E_m, α_1, α_2 зависят от типа источника ИЭИ.

$$\alpha_1 = 0,7 / \tau_\phi; \quad \alpha_2 = 3,25 / \tau_u,$$

где τ_ϕ – длительность фронта импульса;

τ_u – длительность импульса ИЭИ;

ω_o – несущая частота ИЭИ;

Θ_o – начальное значение фазы.

Пусть ИЭИ находится в полосе рабочего диапазона образцов РЭС. Тогда оценку спектральной плотности получим из соотношения

$$S(j\omega) = E_m \cdot \omega_o \left[\frac{1}{(\alpha_1 + j\omega)^2 + \omega_o^2} - \frac{1}{(\alpha_2 + j\omega)^2 + \omega_o^2} \right]. \quad (8)$$

Мощность на входе приемного тракта определяется по формуле

$$W_\Pi = \frac{S_{эфф.а} \cdot \eta}{\pi \rho} \cdot \int_{\omega_1}^{\omega_2} |S(j\omega)|^2 d\omega = \Pi \cdot S_{эфф.а} \cdot \eta, \quad (9)$$

где $S_{эфф.а}$ – эффективная площадь раскрытия антенны;

η – КПД антенны;

ρ – волновое сопротивление свободного пространства;

Π – значение вектора Пойтинга, определяющее поток мощности через единичную площадку, перпендикулярную направлению движения волны. Мощность разрушения может быть получена из соотношения

$$P = \frac{W_\Pi}{\tau_\Pi}. \quad (10)$$

Этой мощности соответствует максимальное напряжение

$$U_m = \sqrt{2P \cdot Z_{ex} \cdot K_{св}}, \quad (11)$$

где Z_{ex} – входное сопротивление приемного устройства;

$K_{св}$ – коэффициент стоячей волны АФУ.

Как принято в исходных предпосылках, восприимчивость РЭС связана с отказом ППП первого усилителя (в частности, маломощного устройства). Причиной отказа ППП

является тепловой пробой, параметры которого могут быть оценены по модели Вунца – Белла [2]

$$\frac{P_{II}}{S} = A \frac{\sqrt{S}}{\tau_{II}} + B \frac{1}{\sqrt{\tau_{II}}} + C \frac{1}{\sqrt{S}}, \quad (12)$$

где P_{II} – пороговая мощность отказа;

S – площадь перехода полупроводника;

τ_{II} – длительность импульса СВЧ-излучения;

A, B, C – параметры конкретных полупроводниковых структур.

Выражение (12) может быть представлено в виде пороговой плотности энергии

$$\frac{\mathcal{E}_{II}}{S} = A\sqrt{S} + B\sqrt{\tau_{II}} + C \frac{\tau_{II}}{\sqrt{S}}, \quad (13)$$

где $\mathcal{E}_{II} = P_{II} \cdot \tau_{II}$ – пороговое значение теплового пробоя.

В настоящее время в качестве входных трактов РЭС наиболее часто используются смесительные СВЧ диоды. Поэтому рассмотрим воздействие ИЭИ на них.

Изменение рабочих характеристик этих диодов происходит в том случае, когда имеет место полевой или тепловой пробой зоны перехода. Причем в зависимости от типа пробоя наступает восстанавливаемое или необратимое изменение их характеристик.

Полевой пробой наступает тогда, когда обратное напряжение на диоде превышает некоторое критическое для данного вида пробоя значение U_{II} . В этом случае возрастание обратного тока диода приводит к разогреву перехода, после чего пробой может стать тепловым. Величина обратного тока диода при воздействии импульсного напряжения с амплитудой U и длительностью τ_{II} определяется по формуле

$$I = \frac{I_0}{1 - \left(\frac{U}{U_{II}}\right)^n}, \quad (14)$$

где U_{II} – напряжение лавинного пробоя;

I_0 – начальное значение тока при $U \ll U_{II}$;

$n \cong (3-5)$.

Напряжение теплового пробоя диода связано с его температурой соотношением вида

$$U_T = \alpha \left[e \cdot N \cdot \mu_0 \left(\frac{T_T}{T} \right)^{3/2} \right]^i, \quad (15)$$

где e – заряд электрона;

N – концентрация носителей заряда;

μ_0 – подвижность носителей при температуре теплового пробоя T_T ;

$i = (0,6 - 0,75)$.

Концентрация носителей заряда определяется по формуле

$$N = K_0 \cdot T^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{\varphi_3}{2\varphi_{II}}\right), \quad (16)$$

где φ_3 – ширина запрещенной зоны перехода;
 φ_{II} – температурный потенциал.

$$K_0 = 0,5 \cdot 10^{16} \left(\frac{m_n \cdot m_p}{m^2}\right)^{3/4};$$

m_n, m_p – массы электронов и дырок соответственно;

m – эффективная масса носителей заряда.

Если за время действия импульса температура диода T становится равной температуре теплового пробоя T_T , то уровень напряжения поражающего действия может быть определен по формуле

$$U_{II} = U_T = \frac{3}{\Theta_T \cdot \varphi_3 \cdot R_T \cdot I}, \quad (17)$$

где $\Theta_T = 0,5 - 1,0$;

R_T – тепловое сопротивление диода.

Зависимость температуры теплового пробоя от длительности воздействующего импульса при различных уровнях мощности может быть определена из уравнения теплопроводности [3]:

$$C_\rho \frac{dT}{dt} = K \frac{d^2T}{dX^2} + Q(X, t), \quad (18)$$

где C – теплоемкость вещества диода;

ρ – плотность этого вещества;

Q – энергия импульсного источника тепла;

X – направление распространения тепла, перпендикулярное зоне перехода.

Учитывая, что распространение тепловой энергии в веществе диода носит изотропный характер и сама энергия сохраняется в веществе, а время действия импульса мало по сравнению с характерным временем жизни носителей вещества диода, то решение уравнения (18) можно представить в виде

$$T_T = PK_1 \left(1 - e^{-\tau_H/\tau}\right) + T_0 \quad (19)$$

где P – мощность импульса;

$K_1 = 0,5$ град/МВт;

τ – постоянная времени вещества диода, определяемая коэффициентом C ;

T_0 – температура вещества диода в момент подачи импульсов.

Соотношение (19) позволяет оценить температуру теплового пробоя диода, превышение которой приводит к катастрофическому отказу.

Отметим, что величины P_{II}/S , \mathcal{E}_{II}/S и I в данном случае являются эквивалентными энергетическими параметрами Z .

Приведенную физико-математическую модель будем считать базовой. На ее основе могут быть рассмотрены и другие случаи: внеполосового воздействия, затекание энергии и т. д. Эти модели могут быть даны при определенной апробации базовой модели и внесении в нее соответствующих уточнений.

Получим далее выражение для оценки надежности РЭС при воздействии ИЭИ как поражающего фактора.

Для этого отказ, связанный с выходом параметра за поле допуска или разрушения, вызванный воздействием ПФ, будем называть повреждением РЭС.

С учетом соотношения (1) введем функцию воздействия

$$U(W) = \begin{cases} 1 & W \geq W_{\max}, \\ 0 & W < W_{\max}. \end{cases} \quad (20)$$

Соотношение (20) описывает последовательности воздействий (ПВ). Когда существует возможность внезапного разрушения РЭС в любой момент времени при превышении амплитудой W ПВ критического значения W_{\max} . В литературе [4] такая модель описывается схемой Бернулли.

При условии, что при многократном воздействии ИЭИ на РЭС при $W < W_{\max}$ имеет место накопление усталостных повреждений, функция применения имеет вид

$$U(W) = \begin{cases} 1 & W > W_{\max} \\ N^{-1}(W) & W \leq W_{\max} \end{cases}. \quad (21)$$

Функцию $N(W)$ в литературе [5] называют функцией Велера и определяют ее как однозначную зависимость N из интервала $[1, \infty]$, а W из интервала $[0, W_{\max}]$.

Рассмотрим вопрос о законе распределения времени безотказного применения T^* РЭС в условиях применения ИЭИ.

В простейшем случае

$$T^* = n^* f^{-1},$$

где n^* – число поражающих действий с уровнем $W \geq W_{\max}$;

f^{-1} – частота поражающих действий.

Число n^* определим как $n^* = \min(n)$.

Пусть интервалы времени τ_i между поражающими действиями являются независимыми случайными величинами и подчиняются экспоненциальному распределению. Тогда можно записать

$$T^* = \sum_{i=1}^{n^*} \tau_i, \quad (22)$$

а вероятность безотказной работы $P(t)$ равна вероятности $T^* \geq t$, равна

$$P(e, t) = \exp\left(-\frac{t}{T^*}\right). \quad (23)$$

В данном случае вероятность $P(t)$ является показателем надежности РЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена физико-математическая модель оценки восприимчивости радиоэлектронных средств к импульсным электромагнитным излучениям. В основу разработанной модели была положена физика отказа образца радиоэлектронного средства, представляющая собой описание электромагнитных, электрических и тепловых процессов, приводящих к деградации исходной структуры элементов аппаратуры.

Практическая значимость работы заключается в том, что она позволяет выполнить анализ взаимосвязи физических свойств интегральных микросхем и полупроводниковых приборов и параметров внешних воздействий и на этой основе рассмотреть возможность повышения стойкости РЭА, и при необходимости разработать защиту от наводок ИЭИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буроменский Н.Г. Методические основы построения модели «поражающее действие – стойкость» // Вопросы атомной науки и техники. 2012. Вып. 4. С. 53–57.
2. Ведерников Б.В., Горюнов Н.Н., Чернышев А.А. Причины, механизмы отказов и надежность полупроводниковых приборов. М.: Знание, 1977.
3. Антипин В.В., Годовичин В.А., Громов Д.В. и др. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 1.
4. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 1. М.: Мир, 1984.
5. О надежности сложных систем: сборник трудов семинара Секции надежности Научного совета по комплексной проблеме «Кибернетика» при Президиуме АН СССР. М.: Советское радио, 1966.
6. Зацаринный А.А., Буроменский Н.Г., Гаранин А.И. Живучесть радиоэлектронных систем и ее количественные показатели // Межотраслевая информационная служба. 2015. № 3. С. 68–73.
7. Зацаринный А.А., Буроменский Н.Г., Гаранин А.И. Методические вопросы формирования системы технического обеспечения информационно-телекоммуникационных сетей // Системы и средства информатики. 2013. Т. 23, № 2. С. 154–169.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Буроменский Николай Григорьевич, ведущий научный сотрудник 16 ЦНИИ МО, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, электронный адрес: alex250451@mail.ru.

PERCEPTION LEVEL EVALUATION OF RADIO ELECTRONIC MEANS TO A PULSE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION

Nikolay G. Buromenskii

16 Central Scientific Research Institute of the Ministry of defense of the Russian Federation,
alex250451@mail.ru

ABSTRACT

The method for evaluating the perception level of electronic means to pulsed electromagnetic radiation is considered in this article. The electromagnetic wave penetration mechanism towards the elements of electronic systems and the impact on them are determined by the intensity of the radiation field on the elements of electronic systems. The impact of electromagnetic radiation pulses to the electronic systems refers to physical and analytical parameters of the relationship between exposure to pulses of electromagnetic radiation and the sample parameters of electronic systems. A physical and mathematical model of evaluating the perception level of electronic means to pulsed electromagnetic radiation is given. The developed model was based on the physics of electronics means failure which represents the description of electromagnetic, electric and thermal processes that lead to the degradation of the original structure of the apparatus elements. The conditions that lead to the total equation electronic systems functional destruction when exposed to electromagnetic radiation pulses are described. The internal characteristics of the component elements that respond to the damaging effects are considered. The ratio for the power failure is determined. A thermal breakdown temperature versus pulse duration of exposure at various power levels is obtained. The way of evaluation the reliability of electronic systems when exposed to pulses of electromagnetic radiation as a destructive factor is obtained.

Key words: sensitivity, pulse electromagnetic radiation, radio electronics, semiconductors, integrated circuits, model, thermal break.

REFERENCES

- 1. Buromensky N.G.** Methodical bases of creation of the "striking action firmness" model. Voprosy atomnoj nauki i texniki [Questions of atomic science and technology], 2012, issue 4, pp. 53–57. (in Russian)
- 2. Vedernikov B.V., Goryunov N.N., Chernyshev A.A.** Reasons, mechanisms of failures and reliability of semiconductor items. M.: Znanie [Knowledge], 1977. (in Russian)
- 3. Antipin V.V., Godovichin V.A., Gromov D.V., etc.** Influence of powerful pulse microwave interferences on semiconductor items and integrated microcircuits. Zarubezhnaya radioelektronika [Foreign radiotronics], No. 1, 1995. (in Russian)
- 4. Filler B.** Introduction to probability theory and its applications, T. 1. M.: Mir [V. 1.: M: World], 1984. (in Russian)
- 5.** About reliability of difficult systems. The collection of works of a seminar of Section of reliability of Scientific council on a complex problem "Cybernetics" in case of Presidium of Academy of Sciences of the USSR. M.: Sovetskoe radio [Soviet radio], 1966. (in Russian)
- 6. Zatsarinny A.A., Buromensky N.G., Garanin A.I.** Zhivuchest of radio-electronic systems and her quantitative indices. An interindustry information service, 2015, No. 3, pp. 68–73. (in Russian)
- 7. Zatsarinny A.A., Buromensky N.G., Garanin A.I.** Methodical questions of formation of system of technical supply of information and telecommunication networks. Sistemy i sredstva informatiki [Systems and means of informatics], 2013, vol. 23, No. 2, pp. 154–169. (in Russian)