

УДК 621.375

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.126356

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ ПО СПЕКТРУ ПОМЕХИ

Гуцол Т. Д., Михайлова Л. Н., Козак А. В., Косуліна Н. Г., Черенков А. Д.

Объектом исследования является процесс подавления помехи в пассивном радиометрическом приёмнике, сосредоточенной по спектру помехи, со случайной или изменяющейся частотой. Помехоустойчивость можно повышать с помощью специальных схем, предотвращающих перегрузку приемника и использующих различия в характеристиках полезных сигналов и помех для подавления последних. Как правило, никогда точно неизвестна частота колебаний помехи и, кроме того, реальная помеха никогда не бывает чисто гармонической. Поэтому возникла необходимость теоретического рассмотрения степени подавления помехи входной цепью радиометра при неизвестном значении частоты помехи и конечной ширине спектра, а также теоретически обосновать возможные способы построения адаптивных устройств подавления реальной узкополосной помехи.

Получено выражение для коэффициента подавления сосредоточенной по спектру помехи, которое показывает, что помеха будет подавляться автоматически при оптимальном выборе параметров k_u , τ , T следящей системы.

В работе приведена функциональная схема радиометрического приёмника, которая использует адаптивную систему для подавления сосредоточенной по спектру помехи. Адаптивная система была основана на включении в схему радиометрического приёмника дополнительной компенсирующей помеху цепи. Компенсирующая помеху цепь позволяет повысить чувствительность приёмника до 10^{-20} Вт с точностью до $0,1$ °С и быстродействием $2...4$ с. Кроме подавления помехи компенсирующим звеном, стоящим после усилителя промежуточной частоты, обеспечивается подавление помехи и входной цепью. При этом общий выигрыш в помехоустойчивости исследуемого радиометрического приёмника по сравнению с компенсационным, как показывают расчеты для типовых характеристик, будет не хуже, чем в 30 дБ.

Ключевые слова: радиометрический приёмник, подавление сосредоточенной по спектру помехи, компенсирующие помеху цепи.

1. Введение

Систематический контроль за состоянием здоровья сельскохозяйственных животных становится необходимым условием функционирования животноводческих комплексов, а его совершенствование одной из важнейших задач ветеринарной науки и передовой практике [1]. В настоящее время основным показателем состояния животных служит температура. В

ветеринарной практике применяют контактные (термометры) и бесконтактные (тепловизоры) методы измерения температуры. Применение термометров приводит к ранениям или разрыву прямой кишки. Для применения тепловизоров требуется фиксация животных и специальная подготовка поверхности кожи [2]. Поэтому предпочтение следует отдать дистанционному методу, основанному на приёме собственного теплового излучения органов животного. Мощность теплового электромагнитного излучения тканей и органов животных составляет величину 10^{-15} – 10^{-20} Вт. Ветеринарная диагностическая система радиотеплового картирования предназначена для диагностирования нарушений кровообращения, опухолей, воспалительных процессов внутренних органов животных. Анализ существующих радиометрических приёмников показывает, что их параметры не отвечают требованиям по точности, чувствительности и помехозащищённости. Чувствительность существующих радиометрических приёмников в миллиметровом диапазоне не превышает величины 10^{-10} Вт. Радиометрическая система миллиметрового диапазона для измерения собственного электромагнитного излучения животных, имеющая сравнительно широкую полосу приема, может быть подвергнута воздействию совокупности помех [3]. Основными источниками помех для радиометрической системы, в зоне измерения с животными, являются промышленные помехи [4]. Практический анализ показывает, что одной из опасных является помеха, сосредоточенная по спектру, со случайной или изменяющейся частотой, которую можно подавить с помощью специальных схем, использующих различия в характеристиках полезных сигналов и помех [5]. Поэтому подавление сосредоточенной по спектру помехи, со случайной или изменяющейся частотой, является актуальной задачей.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объект исследования – процесс подавления помехи в пассивном радиометрическом приёмнике, сосредоточенной по спектру помехи, со случайной или изменяющейся частотой. Из анализа пассивных радиометрических приёмников супергетеродинного, модуляционного и аддитивно-шумового типов следует, что их чувствительность измерений зависит от действия сосредоточенной по спектру помехи с изменяющейся частотой [3]. Учитывая высокую вероятность воздействия помех на систему в районе проведения измерений, как активных, так и пассивных, необходимо при построении системы предусмотреть повышение ее помехоустойчивости в условиях воздействия возможных видов помех. В основу подавления помехи сосредоточенной по спектру необходимо использовать следующие меры [5]:

- разработка новых схем;
- совершенствование известных схем (расширение полосы пропускания по высокой частоте, увеличение времени интегрирования, увеличение коэффициента усиления, применение линии задержки во входной цепи).

Таким образом, можно сделать вывод, что при построении радиометрических систем в миллиметровом диапазоне следует учитывать следующие определяющие недостатки:

- в силу случайности частоты помехи, а также при наличии перестраиваемой помехи степень ее подавления оказывается непредсказуемой;
- для целей пассивного радиометрического приема отсутствуют способы борьбы с подобными помехами [5, 6];
- невозможность быстро (электронным путем) осуществлять перестройку времени задержки во входной цепи сигнала при работе в миллиметровом диапазоне вол [1, 4].

В этой связи способ, основанный на включении компенсирующей помеху цепь, оказывается более предпочтительным. Компенсирующая помеху цепь устанавливается в тракте усилителя промежуточной частоты после преобразования частоты. Для обоснования данного способа необходимо проведение теоретических исследований.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является теоретический анализ схем в структуре радиометрического приемника для подавления помехи сосредоточенной по спектру, со случайной или изменяющейся частотой.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Обосновать компенсирующую помеху цепь в тракте промежуточной частоты пассивного радиометрического приёмника.
2. Определить коэффициент подавления гармонической помехи по мощности следящей системой радиометрического приёмника.

4. Исследование существующих решений проблемы

Радиометрическая система миллиметрового диапазона для измерения собственного электромагнитного излучения животных, имеющая сравнительно широкую полосу приема, может быть подвергнута воздействию совокупности помех [6]. Основными источниками помех для радиометрической системы, в зоне измерения с животными, являются промышленные помехи [7, 8]. Литературный анализ показывает, что одной из опасных является помеха сосредоточенная по спектру, со случайной или изменяющейся частотой, которую можно подавить с помощью специальных схем, использующих различия в характеристиках полезных сигналов и помех [9].

В работе [10] рассмотрено, что сосредоточенная по спектру помеха будет подавляться входной цепью с различной степенью, в зависимости от величины отстройки несущей частоты помехи от центральной частоты входной цепи. В силу случайности частоты помехи, а также при наличии перестраиваемой помехи степень ее подавления оказывается непредсказуемой [11, 12]. Анализ работ, посвященных пассивному радиометрическому приёму электромагнитных излучений биологических объектов [13, 14] показывает, что

в них отсутствуют способы борьбы с подобными помехами. В работе [15] разработан способ подавления узкополосной, сосредоточенной по спектру помехи, со случайной или изменяющейся частотой, с помощью адаптивной системы. Принцип подавления помехи основан на перестройке времени задержки во входной цепи, до совпадения частот помехи и центральной частоты входной цепи. Однако такой способ имеет ряд недостатков, основным из которых является невозможность быстро (электронным путем) осуществлять перестройку времени задержки во входной цепи при работе в миллиметровом диапазоне волн. В этой связи способ подавления помехи, сосредоточенной по спектру со случайной или изменяющейся частотой, с помощью специальных схем, использующих различия в характеристиках полезных сигналов и помех, оказывается более предпочтительным.

5. Методы исследований

Функциональная схема радиометрического приёмника, которая использует адаптивную систему для подавления сосредоточенной по спектру помехи, приведена на рис. 1.

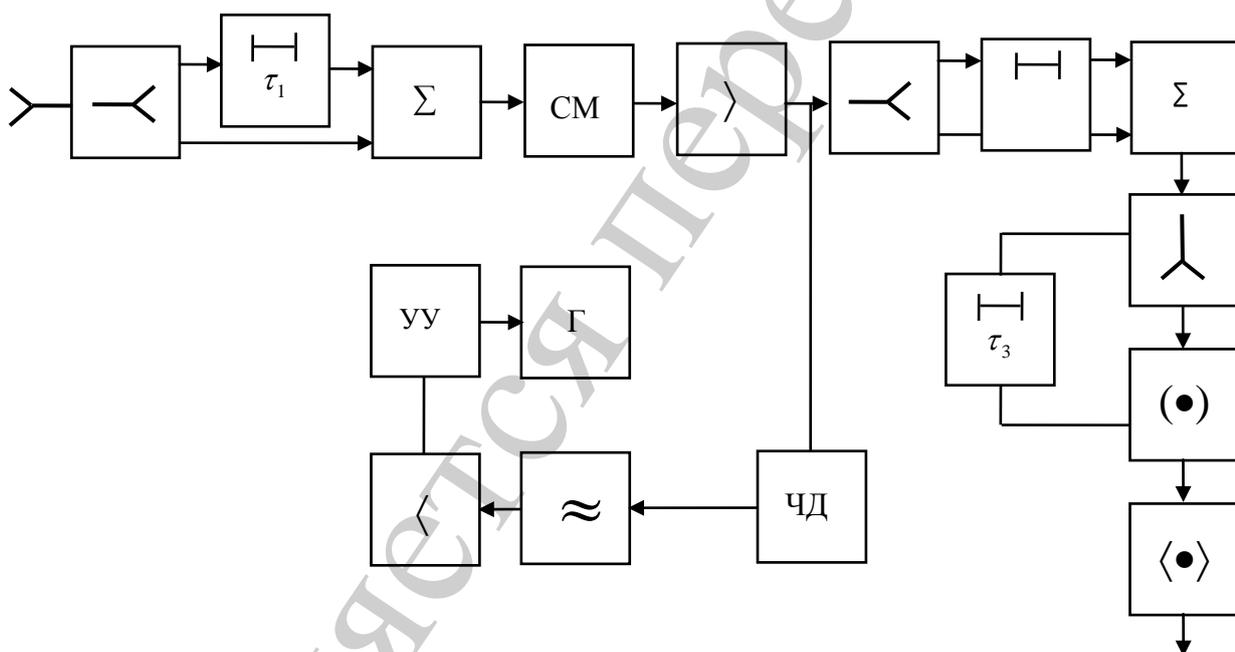


Рис. 1. Функциональная схема радиометрического приёмника с адаптивной системой подавления сосредоточенной по спектру помехой

В схему радиометрического приемника (рис. 1) дополнительно включена компенсирующая помеху цепь, которая устанавливается в тракте усилителя промежуточной частоты (УПЧ) после преобразования частоты, а также схема автоматической подстройки частоты гетеродина по частоте помехи.

Для выяснения возможностей разработанного устройства оценим степень подавления узкополосной помехи, появившейся в средних четвертях полосы УПЧ.

Будем исходить из следующих основных предположений:

1. Управляющий элемент и дискриминатор являются безынерционными устройствами, у которых используются только линейные участки их статических характеристик, и характеризуются крутизной преобразования S_U и S_D соответственно.

2. Величина коэффициента усиления УПЧ (усилителя промежуточной частоты) и УПТ (усилителя постоянного тока) учитывается в значениях крутизны S_D и S_U соответственно. Поэтому полагаем коэффициенты усиления $K_{УПЧ}=K_{УПТ}=1$.

3. Фильтр представляет собой линейный элемент, состоящий из RC цепи, а его передаточная функция определяется выражением:

$$K_P(\omega) = \frac{1}{T_p \omega + 1}, \quad (1)$$

где T – постоянная времени фильтра.

4. Помеха гармоническая и действует на постоянной частоте $f_{II} = const$ с постоянной амплитудой A_{II} , а частота настройки дискриминатора точно совпадает с центральной частотой компенсирующей цепи $f_D = f_{0ПЧ}$, которые также остаются неизменными во времени.

Тогда, с учетом вышесказанного, частота помехи в тракте УПЧ определится из выражения:

$$f_{ПЧ}(t) = f_{II}(t) - f_G(t), \quad (2)$$

где $f_G(t)$ – частота гетеродина, а в установившемся режиме точность совпадения частоты помехи на промежуточной частоте (ПЧ) с центральной частотой компенсирующей цепи может быть выражена через приращения:

$$f_{ПЧ}(t) = -\Delta f_G(t), \quad (3)$$

т. е. определяется ошибкой управления частотой гетеродина.

Ошибка следящей системы представляет собой разность между ее реальным выходным сигналом $f_G(t)$ и требуемым выходным сигналом $f_{G_0}(t)$, которая складывается из ошибки отработки требуемой величины перестройки гетеродина $\Delta f_{ГП}(t)$ и ошибки, являющейся результатом действия шумов системы $\Delta f_{ГШ}(t)$, т. е.:

$$f_G(t) - f_{G_0}(t) = \Delta f_G(t) = \Delta f_{ГП}(t) + \Delta f_{ГШ}(t). \quad (4)$$

Определим ошибку отработки требуемой величины перестройки. Учитывая, что частота помехи постоянна, на основании теории автоматического регулирования ошибка отработки определится выражением:

$$\Delta f_{ГП}(t) = C_0 |f_{0ПЧ} - f_{ППЧ}|, \quad (5)$$

где C_0 – коэффициент ошибки по положению, который определяется через значение передаточной функции системы $W(p)$ в начале координат:

$$C_0 = 1 - W(p).$$

Для цепи автоматического управления частотой гетеродина передаточная функция системы будет иметь вид:

$$W(p) = \frac{k_y}{T_p + k_y + 1}, \quad (6)$$

где $k_{yД} = S_y \cdot S$ – полный коэффициент усиления разомкнутой системы.

Тогда коэффициент ошибки C_0 запишется в следующем виде:

$$C_0 = 1 - \frac{k_y}{k_y + 1} = \frac{1}{k_y + 1},$$

а сама ошибка отработки:

$$\Delta f_{ГП} = \frac{|f_{0ПЧ} - f_{ППЧ}|}{k_y + 1}. \quad (7)$$

Из выражения (7) легко видеть, что ошибка отработки зависит от абсолютного значения требуемой величины перестройки. При обеспечении достаточно большого коэффициента усиления разомкнутой системы $k_y \gg 1$, ошибка может быть достигнута заданной степенью малости.

Определим ошибку системы, являющейся результатом действия шумов. Основным источником шумов, действующих на входе частотного дискриминатора, будут являться внутренние шумы радиометрического приёмника. Известно, что дисперсия сигнала на выходе системы определяется выражением [5]:

$$\sigma_\omega^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty S_x(\omega) A^2(\omega) d\omega, \quad (8)$$

где $S_x(\omega)$ – спектральная плотность сигнала, действующего на входе системы;
 $A(\omega) = |W(j\omega)|$ – модуль комплексной частотной характеристики системы.

Учитывая, что поступающие на вход дискриминатора внутренние шумы радиометрического приёмника являются эргодическим нормальным случайным процессом типа квазизелого шума, со спектральной плотностью S_0 , действующим в полосе УПЧ, а модуль частотной характеристики определяется выражением:

$$A(\omega) = \frac{k_y}{|T_{j\omega} + k_y + 1|},$$

то выражение (8) для схемы управления частотой гетеродина можем переписать в следующем виде:

$$\sigma_\omega^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty S_0 \frac{k_{yПРШ}^2}{|T_{j\omega} + k_y + 1|^2} d\omega = \frac{S_0 \cdot k_{yПРШ}^2}{2\pi} \int_0^\infty \frac{d\omega}{|T_{j\omega} + k_y + 1|^2}, \quad (9)$$

где $\alpha_{ПРШ} = 1 \left[\frac{Pa\delta^2}{Bm} \right]$ – единичный коэффициент, учитывающий преобразование амплитудных шумов в флуктуацию частоты.

После интегрирования окончательно получим:

$$\sigma_\omega^2 = \frac{S_0 k_{yПРШ}^2}{2T(k_y + 1)}. \quad (10)$$

Таким образом, учитывая выражение (3), полученная величина σ_ω^2 будет являться дисперсией флуктуации частоты помехи на входе компенсирующей цепи.

Найдем выражение для дисперсии амплитуды помехи на выходе декомпрессирующей цепи.

В общем случае сигнал помехи представим в виде:

$$U_{II}(t) = A_{II} \cos \left[\omega_{0ПЧ} t + \int_t \Delta\omega(t) dt \right], \quad (11)$$

где A_{II} – амплитуда помехи; $\Delta\omega(t)$ – флуктуации частоты помехи.

В рассматриваемом случае флуктуации частоты $\Delta\omega(t)$ будут являться медленным, по сравнению с $\cos\omega_{0ПЧ} t$, стационарным случайным процессом с дисперсией, определенной выражением (10).

Дисперсию амплитуды помехи на выходе компенсирующей цепи определим в соответствии с (8):

$$D_{II} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty S_{II}(\omega) K^2(\omega) d\omega, \quad (12)$$

где $S_{II}(\omega)$ – спектральная плотность помехи на входе компенсатора; $K(\omega)$ – коэффициент передачи компенсирующей цепи.

6. Результаты исследований

Для исследуемого случая, при нормальном законе распределения флуктуаций частоты смещенный спектр помехи на входе компенсатора имеет вид [6]:

$$\tilde{S}_{II}(\omega) = \frac{A_{II}^2}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\omega}^2}} e^{-\frac{\omega^2}{2\sigma_{\omega}^2}}. \quad (13)$$

Таким образом, подставив в (12) выражение (13) и с учетом того, что $S_{II}(\omega) = 2\pi\tilde{S}_{II}(\omega)$, получим дисперсию амплитуды помехи на выходе системы:

$$D_{II} = \int_0^{\infty} \tilde{S}_{II}(\omega) \tilde{K}^2(\omega) d\omega = \int_0^{\infty} \frac{A_{II}^2}{2} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\omega}^2}} \cdot e^{-\frac{\omega^2}{2\sigma_{\omega}^2}} \times \\ \times \sin^2\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) d\omega = \frac{A_{II}^2}{4} \left(1 - e^{-\frac{\sigma_{\omega}^2\tau^2}{2}}\right), \quad (14)$$

где $\tilde{K}^2(\omega) = \sin^2\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)$.

Окончательно с учетом (10) запишем:

$$D_{II} = \frac{A_{II}^2}{4} \left[1 - e^{-\frac{S_0 k_y^2 \tau^2 \alpha_{II}}{4T(k_y+1)}}\right]. \quad (15)$$

Из выражения (11) определим мощность помехи на входе компенсирующей цепи:

$$P_{II\text{ ВХ}} = \frac{A_{II}^2}{2}. \quad (16)$$

Тогда коэффициент подавления гармонической помехи по мощности следящей системой запишется в виде:

$$K_{II} = \frac{D_{II}}{P_{II\text{ ВХ}}} = \frac{1}{2} \left[1 - \exp\left(-\frac{S_0 k_y^2 \tau^2 \alpha_{II}}{4T(k_y+1)}\right)\right]. \quad (17)$$

Из (17) видно, что при отсутствии внутренних шумов, случай $S_0=0$, коэффициент $K_{II}=0$, т. е. гармоническая помеха будет подавлена полностью. Таким образом, при оптимальном выборе параметров k_y , τ , T следящей системы

подавления узкополосной помехи будет выполняться автоматически при совмещении частоты помехи с центральной частотой компенсирующего звена. Следует отметить, что кроме подавления помехи компенсирующим звеном, стоящим после усилителя промежуточной частоты (УПЧ), будет обеспечиваться подавление помехи и входной цепью. При этом общий выигрыш в помехоустойчивости радиометрического приёмника (рис. 1) по сравнению с компенсационным, как показывают расчеты для типовых характеристик, будет не хуже, чем в 30 дБ.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Для дистанционного определения состояния животных следует использовать пассивный радиометрический приёмник модуляционного типа. Радиометрический приёмник предназначен для измерения теплового электромагнитного излучения тканей и органов животных в диапазоне 30...40 ГГц. Подавление сосредоточенной по спектру помехи, со случайной или изменяющейся частотой, до 30 дБ позволило:

- увеличить чувствительность до 10^{-19} Вт, вместо 10^{-17} Вт;
- увеличить обнаружения температурных полей до 10 см, вместо 5 см;
- повысить быстродействие до 1 с, вместо 2...4 с.;
- повысить на порядок достоверность диагнозов при анализе картины теплового поля животных.

Weaknesses. Недостатком приёмника является то, что он требует доработки по защите от промышленных и широкополосных помех.

Opportunities. Применение радиометрического приёмника для диагностики состояния животных позволило при их лечении:

- уменьшить расход лекарственных средств на 15...20 %;
- разработать рацион кормления и условия их содержания и, как итог, повысить продуктивность на 20... 25 %;
- сэкономить хозяйству (1000 голов коров) 5000...6000 дол. США.

Стоимость доработки не будет больше 10 % от стоимости радиометрического приёмника.

Threats. Стоимость доработки приемника по защите от промышленных и широкополосных помех будет составлять примерно 10 % от стоимости радиометрического приёмника.

8. Выводы

1. Обоснована компенсирующая помеху цепь в тракте промежуточной частоты радиометрического приёмника. Особенность этой цепи заключается в том, что она подавляет на 30 дБ сосредоточенную по спектру помеху, со случайной или переменной частотой.

2. Получено выражение для коэффициента подавления сосредоточенной по спектру помехи, которое показывает, что помеха будет подавляться автоматически при оптимальном выборе параметров k_u , τ , T следящей системы.

References

1. Ioshenko A. N. Noise interference of broadband communication systems with various methods of suppressing the spectrum-concentrated interference // Works of Educational Communication Institutes. 2009. Vol. 55. P. 19–30.
2. Hutsol T. Analysis of schematic variants of radiometric receivers // Bulletin of Kharkov Vasylenko National Technical University of Agriculture. 2017. Vol. 187. P. 107–109.
3. Cherenkov A. D., Kosulina N. G. Theoretical Analysis of Electromagnetic Field Electric Tension Distribution in the Seeds of Cereals // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2015. Vol. 6, No. 6. P. 1686–1694.
4. Hutsol T. D., Cherenkov A. D. Analysis of noise immunity and the electromagnetic environment in the areas of remote diagnostics of the state of animals with radiometric receiver // Bulletin of Kharkov Vasylenko National Technical University of Agriculture. 2017. Vol. 186. P. 144–146.
5. Hutsol T. Research on suppression system analysis of high power narrowband interference operating in presence of heterodyne frequency // Scientific achievements in agricultural engineering, agronomy and veterinary medicine. 2017. Vol. 11, No. 1. P. 264–273.
6. Poradish F. J., Habbl M. Millimeter wave radiometric imaging ext // SPIE. Millimeter Wave Technology. 2010. Vol. 1. 337 p.
7. Ring E. F. J., Ammer K. The technique of infrared imaging in medicine // Infrared Imaging. IOP Publishing, 2014. P. 1–10. doi:10.1088/978-0-7503-1143-4ch1
8. DuBois P. R., Williams D. J. Increased incidence of retained placenta associated with heat stress in dairy cows // Theriogenology. 1980. Vol. 13, No. 2. P. 115–121. doi:10.1016/0093-691x(80)90120-x
9. Skou N. Microwave radiometer systems: Design and analysis. Boston-London: Artech House, 1989. 162 p
10. Jones B. F. A reappraisal of the use of infrared thermal image analysis in medicine // IEEE Transactions on Medical Imaging. 1998. Vol. 17, No. 6. P. 1019–1027. doi:10.1109/42.746635
11. Maldague X. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. New York: Wiley, 2001. 704 p.
12. Zheng L., Tidrow M. Analyses of infrared focal plane array figure of merit and its impact on sensor system trades // Infrared Physics & Technology. 2009. Vol. 52, No. 6. P. 408–411. doi:10.1016/j.infrared.2009.08.001
13. Van Lamsweerde-Gallez D., Meessen A. The role of proteins in a dipole model for steady-state ionic transport through biological membranes // The Journal of Membrane Biology. 1975. Vol. 23, No. 1. P. 103–137. doi:10.1007/bf01870247
14. Ash C. J., Cook J. R., Auner C. R. The use of rectal temperature to monitor heat stroke // Missouri Medicine. 2009. Vol. 89, No. 5. P. 283–291.
15. Togwa T., Nemoto T., Yamazaki T., Kobayashi T. A modified internal temperature measurement device // Medical & Biological Engineering. 1976. Vol. 14, No. 3. P. 361–364. doi:10.1007/bf02478138