

УДК 621.3.089.62

DOI: 10.35211/2500-0586-2025-2-51-23-29

*Д. Ю. Кетов¹, А. И. Нефедьев^{1,2}***ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФА**¹Волгоградский государственный медицинский университет²Волгоградский государственный технический университет

ya_st@bk.ru, nefediev@rambler.ru

Автор, ответственный за переписку: Алексей Иванович Нефедьев, nefediev@rambler.ru

В статье приводятся результаты оценки погрешности информационно-измерительной системы, предназначенной для контроля технического состояния электроэнцефалографа. Разработанная информационно-измерительная система позволяет обеспечить автоматизированный контроль электроэнцефалографов и уменьшить погрешность измерения с 5–7 % до 0,00187 %. Разработана методика дистанционной автоматизированной поверки электроэнцефалографов, которая позволяет проводить дистанционный контроль технического состояния электроэнцефалографов на месте их эксплуатации, что уменьшает затраты на контроль технического состояния на 50 %.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, методика, неисправность, дистанционная диагностика, поверка, автоматизированный контроль

*D. Yu. Ketov¹, A. I. Nefed'ev^{1,2}***ERROR ASSESSMENT OF THE INFORMATION AND MEASURING SYSTEM
FOR CONTROLLING THE TECHNICAL CONDITION OF AN ELECTROENCEPHALOGRAPH**¹Volgograd State Medical University²Volgograd State Technical University

The article presents the results of the error assessment of the information and measuring system designed to monitor the technical condition of the electroencephalograph. The developed information and measuring system allows for automated monitoring of electroencephalographs and reduces the measurement error from 5–7 % to 0,00187 %. A method for remote automated verification of electroencephalographs has been developed, which allows for remote monitoring of the technical condition of electroencephalographs at the place of their operation, which reduces the costs of monitoring the technical condition by 50 %.

Key words: information and measuring system, methodology, malfunction, remote diagnostics, verification, automated control

В настоящее время в качестве испытательного оборудования для оценки состояния электроэнцефалографического оборудования в медицинских учреждениях используют функциональные генераторы ГФ-05 и Диатест-04. Они имеют ограниченный функционал, не позволяющий в полной мере реализовывать описанные в эксплуатационной документации методики контроля технического состояния. Ввиду отсутствия у данных генераторов возможности моделирования сигналов необходимой формы и с нужными характеристиками встает вопрос о необходимости поиска нестандартных решений, что не всегда дает необходимый результат. В ГФ-05 есть возможность формировать многообразие тестовых сигналов, но при этом в нем отсутствует подтверждение полученной модели тестового сигнала соответствия реальной элек-

троэнцефалограмме (то есть можно сформировать сигнал, не имеющий никакого отношения к реальной электроэнцефалограмме) [1; 2].

Также при контроле за техническим состоянием необходимо выбирать адекватную методику испытаний, которая бы учитывала параметры, отраженные в нормативно-технической и эксплуатационной документации на изделие Р 50.2.087-2013 [3]. В данной рекомендации в качестве тестовой приводится только одна форма сигнала, реализующая возможность анализа амплитудно-временных зависимостей, которая при этом не дает никакой информации о правильности воспроизведения формы сигнала. Для решения поставленной задачи была разработана информационно-измерительная система, структурная схема которой представлена на рис. 1.

На рис. 1 изображена схема, отображающая принцип работы автоматизированного ком-

плекса для проведения контроля технического состояния электроэнцефалографа [4].

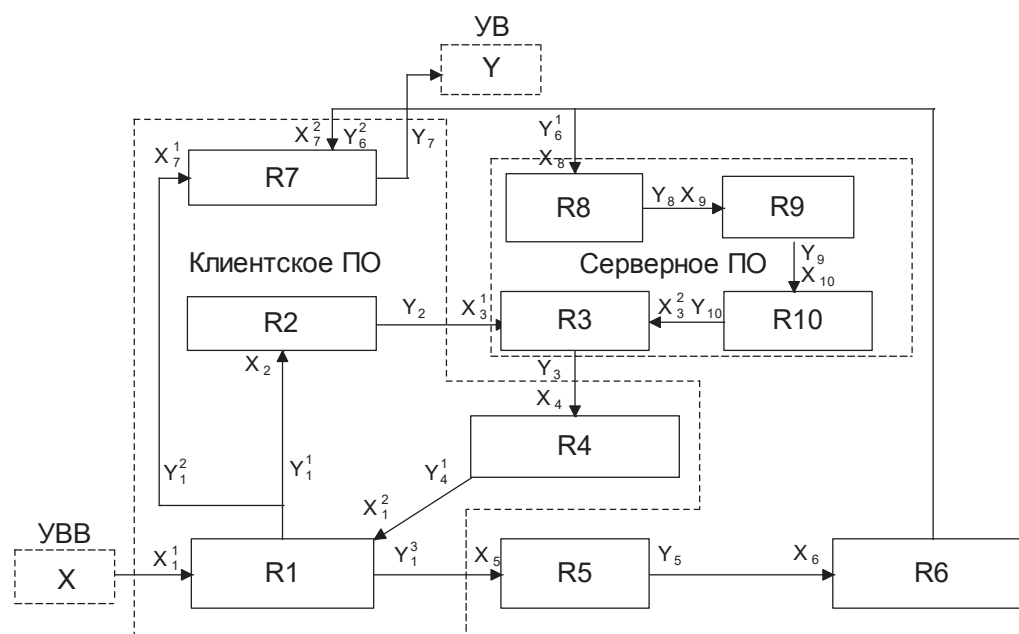


Рис. 1. Структурная схема проведения сетевого инструментального контроля технического состояния ЭЭГ-прибора

На рисунке обозначены: УВВ – устройство ввода; УВ – устройство вывода; R_1 – функция формирования испытательного ЭЭГ-сигнала; R_2 – функция расчета статистических характеристик испытательного ЭЭГ-сигнала; R_3 – функция сравнения значений статистических характеристик испытательного сигнала с имеющимися в БД; R_4 – функция обработки ответа с БД; R_5 – функция функционального генератора (ФГ); R_6 – функция электроэнцефалографа; R_7 – функция сравнения двух ЭЭГ-сигналов; R_8 – функция сегментирования ЭЭГ-сигнала; R_9 – функция расчета статистических характеристик просегментированного ЭЭГ-сигнала; R_{10} – функция БД.

В итоге после оптимизации системы была получена конечная структурная схема (рис. 2):

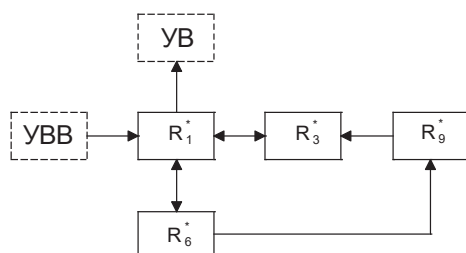


Рис. 2. Общая структурная схема автоматизированного комплекса для проведения сетевого инструментального контроля технического состояния электроэнцефалографа

Далее рассчитаем полную относительную погрешность автоматизированного комплекса для проведения контроля технического состояния электроэнцефалографа. В тех случаях, когда погрешности вызываются несколькими независимыми друг от друга случайными причинами, то складываются не сами погрешности, а их квадраты. Поэтому полная относительная погрешность измеряемой величины через ее случайную и приборную погрешности выражается формулой:

$$\delta_n = k \sqrt{\delta_{\text{эвм}}^2 + \delta_{\text{dac}}^2 + \delta_{\text{us}}^2 + \delta_{\text{фнч}}^2 + \delta_{\text{см}}^2},$$

где k – коэффициент, определяемый доверительной вероятностью P . Для $P = 0,95$ коэффициент $k = 1,1$; $\delta_{\text{эвм}}^2$ – относительная погрешность представления числа в ЭВМ с плавающей запятой; δ_{dac}^2 – полная относительная погрешность ЦАП; δ_{us}^2 – относительная погрешность операции усиления; $\delta_{\text{фнч}}^2$ – относительная погрешность фильтра низкой частоты; $\delta_{\text{см}}^2$ – относительная погрешность смещения.

Здесь предполагается, что погрешностям соответствуют приблизительно одинаковые доверительные вероятности. Из формулы следует, что в случае, когда одна из погрешностей даже в небольшое число раз меньше другой, то ее

вклад в полную погрешность оказывается незначительным. В таком случае меньшей погрешностью можно пренебречь. В некоторых случаях при многократных измерениях получается одно и то же значение измеряемой величины. Это означает, что случайная погрешность не превышает наименьшего значения, которое может быть измерено данным прибором.

В таких случаях полная погрешность целиком определяется допустимой приборной погрешностью. Вышеприведенное уравнение представляет собой полную погрешность в виде суммы составляющих погрешности, обусловленных соответствующими выполняемыми измерительными преобразованиями [4].

Измерительную процедуру, выполняемую

на ЭВМ, можно представить следующим образом. В ЭВМ числа с плавающей запятой используют формат *IEEE*. Значения с одиночной точностью и типом *float* имеют 4 байта, состоят из бита знака, 8-разрядной двоичной экспоненты *excess-127* (порядок) и 23-битной мантиисы. Мантииса представляет число от 1,0 до 2,0. Поскольку бит высокого порядка мантиисы всегда равен 1, он не сохраняется в числе. Это представление обеспечивает для типа *float* диапазон примерно от $3,4E-38$ до $3,4E+38$ (табл. 1).

Для записи числа в ячейке машины отводятся $k+1$ разряд для фиксации порядка со своим знаком и $n+1$ разряд для мантиисы, то есть место, занимаемое в коде числа кодом мантиисы и кодом порядка, заранее фиксировано (рис. 3).

Таблица 1

Параметры чисел

Тип	Значимые цифры	Число байтов	Длина экспоненты	Длина мантиисы
<i>float</i>	6 - 7	4	8 бит	23 бита
<i>double</i>	15 - 16	8	11 бит	52 бита

	1	...	k-2	k-1	k		1	2	...	n
Знак порядка	Порядок			Знак числа		Мантииса				

Рис. 3. Запись числа в ячейке ЭВМ

В машинах с плавающей запятой абсолютная погрешность представления числа определяется следующим образом:

$$\Delta = \Delta a \cdot 2^m$$

где Δa – погрешность представления мантиисы, которая определяется так же, как абсолютная погрешность представления чисел в машине с фиксированной запятой, то есть

$$\Delta a = 2^{-(n+1)},$$

$$\Delta_{\min} = 2^{-(n+1)} \cdot 2^{-(2k-1)} = 2^{-(n+2k)} = 2^{-(23+8)} \approx 2^{-31} \approx 1 \cdot 10^{-9};$$

$$\Delta_{\max} = 2^{-(n+1)} \cdot 2^{(2k-1)} = 2^{2k-n-2} = 2^{8-23-2} \approx 2^{-17} \approx 1 \cdot 10^{-6}.$$

Относительная погрешность представления чисел в машинах с плавающей запятой определяется по общему правилу:

$$\varepsilon_{\min} = \frac{\Delta a}{a_{\max}} = \frac{2^{-(n+1)}}{1-2^{-n}} = 2^{-(n+1)} = 2^{-(23+1)} \approx 2^{-24} \approx 1 \cdot 10^{-8};$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\Delta a}{a_{\min}} = \frac{2^{-(n+1)}}{2^{-1}} = 2^{-n} = 2^{-23} \approx 1 \cdot 10^{-8}.$$

где m – порядок числа, который изменяется в пределах:

$$-(2^k - 1) \leq m \leq (2^k - 1).$$

Следовательно, в отличие от машин с фиксированной запятой, в машинах с плавающей запятой абсолютная погрешность представления чисел зависит от порядка числа: минимальная при наибольшем отрицательном m и максимальная при наибольшем положительном m , и определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \left| \frac{\Delta}{A} \right| = \frac{\Delta a \cdot 2^m}{a \cdot 2^m} = \frac{\Delta a}{a},$$

то есть ε не зависит от порядка числа и изменяется в пределах:

Относительная погрешность изображения чисел во всем диапазоне представления практически постоянна, и для чисел с нормализованной мантиссой зависит от количества разрядов мантиссы – чем их больше, тем мень-

ше погрешность представления.

В табл. 2 представлены диапазоны изменения и точность стандартных 32-х и 64-х разрядных форматов вещественных чисел с плавающей запятой.

Таблица 2

Диапазоны изменения и точность стандартных 32-х и 64-х разрядных форматов вещественных чисел

Формат	32-х разрядный	64-х разрядный
Обозначение типа	<i>float</i>	<i>double</i>
Точность, разрядов	≈6	15
Точность, Эпсилон	$1.192092896 \cdot 10^{-7}$	$2.2204460492503131 \cdot 10^{-16}$
Максимальное число	$3.402823466 \cdot 10^{+38}$	$1.7976931348623158 \cdot 10^{+308}$
Минимальное число	$1.175494351 \cdot 10^{-38}$	$2.2250738585072014 \cdot 10^{-308}$
Максимальная экспонента	≈38	≈308
Минимальная экспонента	≈-37	≈-307

Относительная погрешность представления числа в ЭВМ с плавающей запятой типа *float*:

$$\delta_{\text{эвм}} \approx 1 \cdot 10^{-8} \text{ \%}.$$

Погрешность представления числа в ЭВМ с плавающей запятой в небольшое число раз меньше остальных погрешностей, поэтому ее вклад в полную погрешность оказывается незначительным [5]. В таком случае данной погрешностью можно пренебречь.

Произведем расчет погрешности функционального генератора.

Производители ЦАП обычно указывают характеристики, позволяющие оценить его полную погрешность. Такими характеристиками являются аддитивная погрешность (*Offset*), мультипликативная погрешность, дифференциальная нелинейность (*DNL*), интегральная нелинейность (*INL*). В технической документации на ЦАП представлены:

- разрядность 12 *bit*;
- разрешающая способность 1/4095, или 0,024 5% от полной шкалы, или -72,2 дБ;
- скорость преобразования 1 *MSPS*;

Погрешности ЦАП:

1. Гарантированная монотонность 10 *bit*;
2. Младший значащий разряд (*LSB*) – минимальное входное напряжение, разрешаемое АЦП (единичный шаг в шкале преобразования). Младший значащий разряд определяется формулой:

$$1 \text{ (МЗр)} = 1 \text{ LSB} = U_{\text{оп}}/2^P = 1,8 \text{ В} \cdot 1/4095 = 0,0004 \text{ В},$$

где $U_{\text{оп}}$ – опорное напряжение = 1,8 В, P – разрядность ЦАП = 12 *bit*;

3. Дифференциальная нелинейность

$$\pm 2 \text{ LSB (МЗР)} = \pm 0,0008 \text{ В};$$

4. Интегральная нелинейность

$$\pm 4 \text{ LSB(МЗР)} = \pm 0,0016 \text{ В};$$

Необходимо учитывать инструментальную погрешность – аппаратную погрешность, определяемую нестабильностью ИОН, погрешностью ключей, резистивных матриц и выходных ОУ. Основными факторами, вызывающими возникновение погрешностей элементов, являются: технологический разброс параметров; влияние изменений окружающей среды (в основном температуры); изменение параметров во времени (старение); воздействия внешних и внутренних шумов и помех. Поэтому характеристики преобразования реальных ЦАП отличаются от идеальных формой, значением ступеней и расположением относительно осей координат. Все инструментальные погрешности проявляются в основном в виде параметров, характеризующих степень совпадения реальной статической характеристике (*CX*) с идеальной.

Такими параметрами являются:

- смещение нуля – параллельный сдвиг реальной *CX*;
- изменение коэффициента передачи – отклонение крутизны реальной *CX* от идеальной;
- нелинейность преобразования – отклонение реальной *CX* от идеальной прямой.

1. Аддитивная погрешность по своей природе является смещением передаточной характеристики ЦАП от ее идеального представления (рис. 4):



Рис. 4. Аддитивная погрешность ЦАП

Эта ошибка остается константной для всех входных значений. Она может быть скомпенсирована при калибровке схемы, и равна: $\delta_{Add} = 7,5 \text{ ppm} = 0,00075 \%$ от общего диапазона входных значений ЦАП.

2. Интегральная нелинейность (INL) – это погрешность, которая вызывается отклонением линейной функции передаточной характеристики (рис. 5).

Интегральную нелинейность определяют путем сравнения напряжений, при которых происходят кодовые переходы. Для идеального

АЦП эти переходы будут происходить при значениях входного напряжения, точно кратных МЗР (младшему значащему разряду):

$\delta_{INL} = \pm 0,0014 \%$ от общего диапазона входных значений ЦАП.

3. Дифференциальная нелинейность определяется как отклонение (с учетом знака) расстояния между двумя соседними уровнями $U_{\text{вых}}$ от идеального значения (рис. 6):

$\delta_{DNL} = \pm 0,0007 \%$ от общего диапазона входных значений ЦАП.

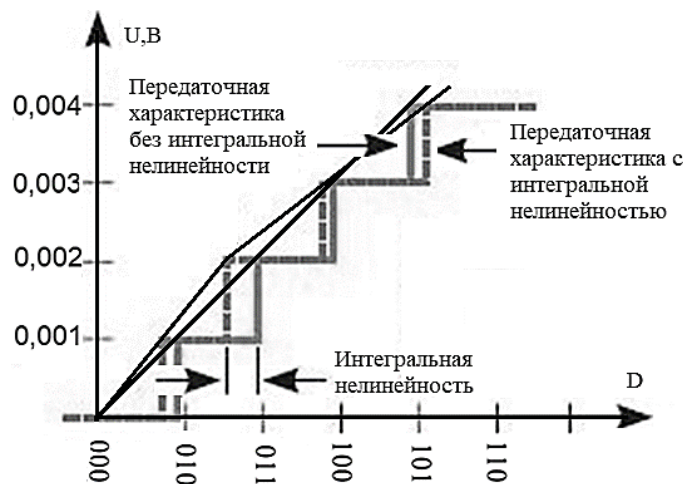


Рис. 5. Интегральная нелинейность ЦАП

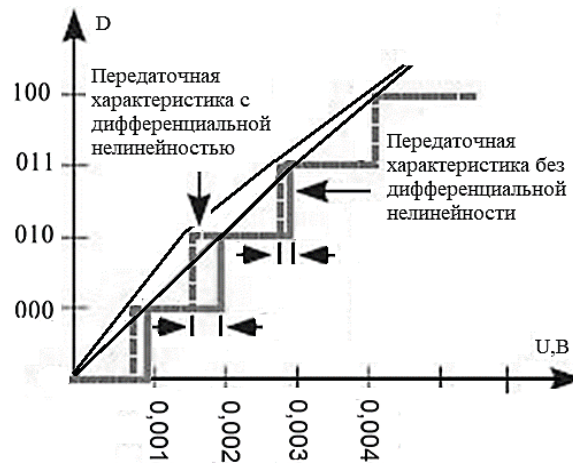


Рис. 6. Дифференциальная нелинейность ЦАП

4. Ошибка от изменения коэффициента передачи/усиления характеризуется отклонением реальной СХ от крутизны идеальной. Так как ошибка от усиления изменяет наклон всей СХ, то относительная ошибка будет на каждом шаге преобразования. Эта ошибка не коррелирована с сигналом и имеет равномерное распределение. Ее среднеквадратическое значение совпадает с среднеквадратичным отклонением распределения и имеет значение: $\delta_{KB} \approx 0,00011\%$ от общего диапазона входных значений ЦАП.

Полная относительная погрешность ЦАП:

$$\delta_{\text{dac}} = \sqrt{\delta_{\text{add}}^2 + \delta_{\text{INL}}^2 + \delta_{\text{DNL}}^2 + \delta_{\text{KB}}^2} = \pm 0,0016\%.$$

Блоки усиления сигнала, фильтрации и смещения были построены на базе малошумящего операционного усилителя TL074 (Texas Instruments). Его основные характеристики:

- входное напряжение смещения ($U_{\text{см}}$): 10 мВ;
- скорость нарастания выходного напряжения (V_U): 13 В/мкс;
- граничная частота усиления ($F_{\text{гр}}$): 3 МГц;
- коэффициент ослабления синфазного сигнала ($K_{\text{осс}}$): 70 дБ.

Для малошумящего операционного усилителя TL074, применяемого в данной системе, ошибка усиления равна $\delta_y = 0,0005\%$ от общего диапазона входных значений, $\delta_T = 0,5 \text{ ppm}/^\circ\text{C} = 0,00005\%/^\circ\text{C}$. Температурное смещение отсчитывается при отклонении температуры от 25°C . Учитывая, что ЦАП работает в нормальных условиях по ГОСТ 8.395–80, температурным смещением можно пренебречь:

$$\delta_{\text{us}} = \sqrt{\delta_y^2 + \delta_t^2} = \pm 0,0005\%$$

Рассчитаем относительную погрешность фильтра низкой частоты, для этого преобразуем схему, исключив из нее конденсаторы. Измененная схема показана на рис. 7.

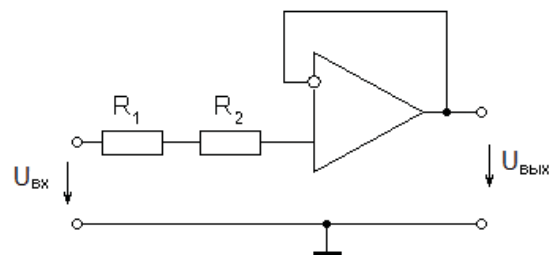


Рис. 7. Преобразованная схема фильтра низкой частоты

Погрешность от неточности коэффициента усиления отсутствует, так как коэффициент равен 1. Погрешность от влияния входных токов также отсутствует, так как коэффициент равен 1.

Погрешность, вызванная напряжением смещения:

$$\delta_{uc} = \frac{U_c}{U_{\text{вхMax}}} 100\% = 0,00005\%,$$

$$\delta_{\text{ФНЧ}} = \sqrt{\delta_{uc}^2} = \pm 0,00005\%.$$

Погрешность фильтра низкой частоты в небольшое число раз меньше остальных погрешностей, поэтому ее вклад в полную погрешность оказывается незначительным. В таком случае данной погрешностью можно пренебречь.

Аналогичным образом рассчитаем погрешность смещения сигнала, которая будет зависеть только от погрешности, вызванной напряжением смещения:

$$\delta_{sm} = \sqrt{\delta_{uc}^2} = \pm 0,00005\%.$$

Погрешность смещения сигнала в небольшое число раз меньше остальных погрешностей, поэтому ее вклад в полную погрешность оказывается незначительным. В таком случае данной погрешностью можно пренебречь.

Тогда полная относительная погрешность измерений:

$$\delta_n = 1,1 \cdot \sqrt{\delta_{эм}^2 + \delta_{дас}^2 + \delta_{ис}^2 + \delta_{ФНЧ}^2 + \delta_{см}^2} = \\ = 1,1 \cdot \sqrt{(0,0016)^2 + (0,0005)^2} \approx 0,00187 \, \%.$$

В процессе исследования была разработана информационно-измерительная система для контроля технического состояния электроэнцефалографа на основе функционального генератора.

Разработанный функциональный генератор сигналов произвольной формы обеспечивает возможность формирования как стандартных форм сигналов, так и сигналов специальной формы, что позволит снизить затраты на эксплуатацию и проведение испытаний, расширить области применения (реальные условия, автономный режим), позволит построить многоканальные распределенные системы, в том числе автоматизированные системы, и обеспечит возможность оперативной передачи измерительных данных.

Проведенный метрологический анализ ИИС для автоматизированного контроля технического состояния электроэнцефалографа показал, что относительная погрешность измерения испытательного сигнала не превышает 0,00187 %, что подтверждает высокую степень соответствия испытательных сигналов реальным сигналам головного мозга. Разработана ИИС для ав-

томатизированного контроля технического состояния электроэнцефалографа, которая позволяет обеспечить автоматизированный контроль электроэнцефалографов и уменьшить погрешность измерения с 5–7 % до 0,00187 %. Разработанная методика дистанционной автоматизированной поверки электроэнцефалографов с использованием разработанной ИИС позволяет проводить дистанционный контроль технического состояния электроэнцефалографов на месте их эксплуатации, что уменьшает затраты на контроль технического состояния на 50 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кетов, Д. Ю.* Информационно-измерительная система автоматизированного контроля технического состояния электроэнцефалографа : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д. Ю. Кетов, 2023. – 179 с.
2. *Ketov, D., Nefedev A., Bezborodov S.* Hardware and Software Equipment for Monitoring the Technical Condition of the Electroencephalograph//Series on Biomechanics. – Vol. 36. – No. 2 (2022). – P. 55–62.
3. *Кетов, Д. Ю.* Применение DDS-генератора для мониторинга технического состояния электроэнцефалографа / Д. Ю. Кетов, А. И. Нефедьев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2022. – № 1(38). – С. 45–49.
4. *Кетов, Д. Ю.* Автоматизированный сетевой стенд для оперативных испытаний энцефалографа / Д. Ю. Кетов, Ю. П. Муха // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 11 (176) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь» ; вып. 12). – С. 84–88.
5. *Кетов, Д. Ю.* Автоматизированный сетевой программный комплекс, предназначенный для проведения инструментального контроля технического состояния электроэнцефалографа / Д. Ю. Кетов, Ю. П. Муха, М. Л. Черножуков, С. С. Либенко // Телекоммуникации. – 2019. – № 4. – С. 42–48. – EDN XAOJCL.