

УДК 681.518

Е.С. Нестругина, Е.Ю. Ларина (канд. техн. наук, ст. науч. сотр.),
Н.И. Чичикало (д-р техн. наук, проф.)
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк
кафедра электронной техники
E-mail: tec4@mail.ru

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

В статье разработана методика оценки погрешностей подсистем S-контроля и R-контроля, как составных частей опорно-двигательной системы человека. Разработан критерий максимальной правдоподобности для оценки точности измерений параметров опорно-двигательной системы человека.

Ключевые слова: *эффективность восстановительного лечения, математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, кодированный сигнал.*

Постановка проблемы в общем виде

Для определения эффективности применения лекарственных мероприятий и препаратов при проведении восстановительного лечения двигательной патологии функций опоры и движения человека после травматизма необходимо учитывать общее состояние человека (температуру, пульс, давление), которые находятся в зависимости от состояния биоритмов. Также важно определить оптимальные условия для проведения измерений с целью получения максимально правдоподобных результатов измерений.

В качестве объективной статистически надежной оценки состояния травмированного человека предложены значения математического ожидания μ и дисперсии σ , полученные на основании результатов измерений, выполненных в определенных условиях

Постановка задач исследования

Для оценки погрешностей измерения параметров опорно-двигательной системы человека необходимо оценить эффективность лечения последствий травматизма с помощью информационно-измерительной системы двигательных функций человека (ИИС ДФЧ), определить критерии, характеризующие степень близости последствий травматизма к безопасной (желаемой) ситуации.

Изложение основного материала

Оценка эффективности лечения последствий травматизма с помощью работы ИИС ДФЧ может быть произведена по критерию, характеризующему степень близости последствий травматизма (ПТ) к безопасной (желаемой) ситуации. Рассмотрим неопределённость, которая появляется вместе с известными погрешностями при измерении параметров ОДС.

В ИИС ДФЧ необходимо контролировать две независимых переменных. Этими переменными является величина смещения каждого контролируемого позвонка относительно опорного значения и уровень нагрузок на нижние конечности (равнодействующие сил).

В общем случае ИИС ДФЧ рассматриваем как подсистемы S-контроля и R-контроля, на вход которых подаются независимые переменные. Кроме того, на результат измерения отклика Y влияет случайная погрешность ϵ средства его измерения.

© Нестругина Е.С., Ларина Е.Ю., Чичикало Н.И., 2013

Ее можно интерпретировать как помеха или шум.

Подсистему S-контроля можно представить следующим образом (рис. 1)

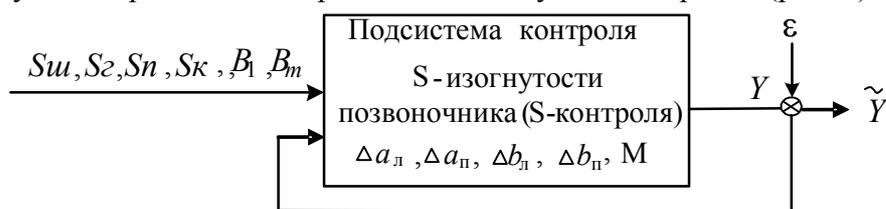


Рисунок 1 - К вопросу определения точности контроля параметров подсистемы S-контроля

Для этого информативными параметрами ИИС ДФЧ в трех координатной системе должны быть: контрольные сегменты позвонков и расстояния в контрольных точках.

Так как точность контроля этих параметров определяется координатными датчиками с последующим отображением в LabVIEW, то рассмотрим для этой подсистемы граф составляющих погрешности.

Для подсистемы определения изогнутости позвоночника (подсистема S-контроля) граф составляющих погрешности приведен на рис. 2.

Погрешность измерений δ_s в общем случае складывается из четырех групп составляющих:

1. погрешности места удаления кодируемой площадки от центральной;
2. погрешностей точки срабатывания при движении приводного элемента;
3. разности погрешностей взаимодействия трехкоординатного датчика от установки в направлениях север-юг;
4. погрешности метода

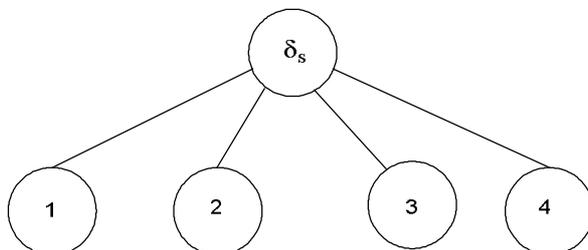


Рисунок 2 - Граф составляющих погрешности при измерении положения сегментов позвоночника

Анализируя составляющие погрешностей, легко установить, что по отношению к кодируемой поверхности датчиков очевидно, что чем ближе к центральной контактной площадке (полюсу) полусферы датчика переместился приводной элемент, тем меньше погрешность. Кодированный сигнал не является аналоговым, поэтому погрешность определения смещения сегмента будет выражена для данного кода в линейных размерах. Так как координата приводного элемента ограничена площадью этой контактной площадки, размеры которой зависят от типоразмера датчика, который в дальнейшем будет минимизирован с помощью нанотехнологий, то сумму всех погрешностей можно считать пренебрежимо малой. Известно, что пренебрежимо малой можно считать составляющую погрешности, учет влияния которой изменяет оцениваемые показатели точности измерений (СКО или границы интервала погрешности) не более, чем на 5 %.

Если математическое ожидание составляющей погрешности равно нулю, то достаточным условием малости составляющей является:

$$\sigma_i \leq \frac{1}{3} \sigma_{\Delta}, \quad (1)$$

где σ_i – СКО данной составляющей погрешности; σ_{Δ} – СКО суммы остальных составляющих.

Для подсистемы контроля равнодействующей на левую и правую ноги (подсистема R-контроля составим граф, который будет отображать погрешность измерений весовых масс δ_R , и приведём его на рис. 3.

Погрешность δ_R имеет семь составляющих по следующим причинам:

1. из-за появления погрешности источника напряжения 1;
2. из-за появления абсолютной погрешности измерения 2;
3. из-за появления аддитивной составляющей относительной погрешности измерения 3;
4. из-за приведенной погрешности от считывания 4;
5. из-за систематической погрешности от входной его величины (перемещения соленоида) 5;
6. из-за изменений систематической погрешности за время между наблюдениями 6;
7. из-за проявления случайной погрешности 7;
8. из-за погрешности неопределённости 8.

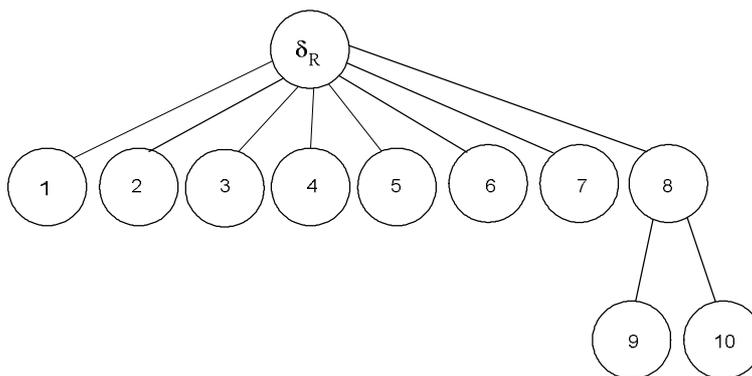


Рисунок 3 – Граф составляющих погрешности при измерении равнодействующих от массы человека на ноги

Неопределенность представляет собой оценку погрешности. Под неопределенностью подразумевается "погрешность, какой она будет, если бы её удалось измерить путем калибровки". После того, как природа неопределенности установлена, ее рассматривают как случайную погрешность. Эта погрешность или неопределенность может быть описана некоторым распределением, например, нормальным и охарактеризована некоторым показателем точности (например, таким как СКО, вероятностная погрешность). При исследовании неопределенностей необходимо рассматривать их на общей основе. Погрешность неопределённости 8 можно представить, как составляющую погрешностей влияния давления 9 и влияния погрешности, связанной со временем измерений 10. Погрешность 9 появляется за счёт холодного воздуха. Он, как и всякое вещество, имеет вес и давит на земную поверхность, на все предметы. Холодный воздух плотнее тёплого, и он обычно давит сильнее. А это значит, что в областях с холодным воздухом возникает повышенное давление, которое и влияет на весовые массы. Погрешность 10 появляется за счёт гравитации.

Для того чтобы выявить случайную погрешность измерений необходимо повторить измерение несколько раз. Если каждое измерение дает заметно отличные от других

измерений результаты, мы имеем дело с ситуацией, когда случайная погрешность играет существенную роль.

За наиболее вероятное значение измеряемой величины обычно принимают её среднее арифметическое значение, вычисленное из всего ряда измеренных значений.

Допустим, что сделано $n=5$ измерений. Разумеется, что все они проделаны одним и тем же методом и с одинаковой степенью тщательности. Такие измерения называются равноточными.

Пусть минимальный интервал значений измеряемой величины, через который ведутся отсчеты, будет δx . Среднее её значение – \bar{x} . Вся совокупность измерений может быть представлена в виде:

$$k_1 \bar{x}; k_2 (\bar{x} + \delta x); \dots k_n (\bar{x} + n \delta x); k'_1 (\bar{x} - \delta x); \dots k'_m (\bar{x} - m \delta x).$$

Здесь k_i – целые числа, показывающие, по сколько раз во всем ряду измерений наблюдались соответствующие значения измеряемой величины. Отложив по оси абсцисс величину погрешностей ($\Delta x = n \delta x$), а по оси ординат значения k , получим гистограмму (рис. 4).

Если увеличивать число наблюдений, а интервал стремиться к нулю, то гистограмма в пределе переходит в непрерывную характеристику распределения погрешностей, изображенную пунктиром на этом же рисунке. Обычно принимается, что погрешности подчиняются нормальному закону распределения. Описывающая его формула Гаусса выведена из следующих предположений.

1. Погрешности измерений могут принимать непрерывный ряд значений.
2. При большом числе наблюдений погрешности одинаковой величины, но разного знака встречаются одинаково часто.
3. Частота появления погрешностей уменьшается с увеличением величины. Иначе говоря, большие погрешности наблюдаются реже, чем малые.

Эти, известные предположения [1] приводят к закону распределения погрешностей, описываемому следующей функцией:

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta)^2}{2\sigma^2}},$$

где σ – дисперсия измерений; e – основание натуральных логарифмов; Δ – соответствует разности ($\tilde{y}_i - \bar{y}_i$).

Отметим, что при выводе формулы Гаусса делается ряд допущений, которые не удастся достаточно строго обосновать. Это, например, следует хотя бы из того, что погрешности никогда не могут быть как угодно малыми. Скажем, при измерении длины ограничением всегда являются атомные размеры ($\approx 10^{-8}$ см), при измерении электрического заряда – величина заряда электрона e ($4,8 \cdot 10^{-10}$ CGSE) и т.д.

Форма характеристик Гаусса представлена на рис. 5 для трех значений σ .

С помощью этих характеристик можно установить, насколько часто должны появляться погрешности той или иной величины.

Наряду с нормальным законом распределения погрешностей встречаются и другие распределения. Так, возможен случай, когда равновероятное появление погрешности любой величины внутри некоторого интервала, а за его пределами вероятность распределения погрешностей равна нулю.

Примером такого распределения служит, например, измерение веса с помощью точных весов и разновеса, не имеющего мелких гирь. Если у нас самая мелкая гирька 0,1г и мы убедились, что вес тела больше 1,2 г, но меньше 1,3г, то все значения внутри этого интервала нужно считать равновероятными. Для такого распределения наиболее вероятным значением измеряемой величины служит также среднее арифметическое.

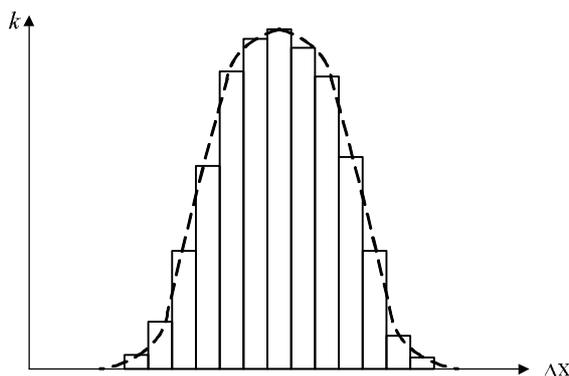
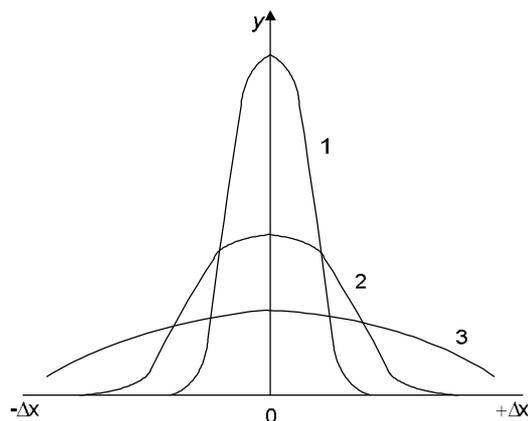


Рисунок 4 - Гистограмма и характеристика распределения погрешностей

Рисунок 5 - Характеристики Гаусса для трех значений σ .

Наиболее эффективным при аппроксимации имеющихся данных является *критерий минимизации суммы квадратов отклонений*.

По методу наименьших квадратов

$$Q = \sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

Наилучшей оценкой параметра случайной величины является та оценка, которая наиболее вероятна по результатам проведения эксперимента.

Для этого воспользуемся *методом максимальной правдоподобности*, который заключается в выборе такой гипотезы, согласно с которой вероятность получения в процессе измерения величин, которые наблюдаются, была бы максимальной (правдоподобной).

Функция правдоподобности равняется произведению условных вероятностей исходных величин, параметры распределения которых отвечают максимуму вероятности появления имеющегося значения случайной величины:

$$L = \prod_{i=1}^N p(\tilde{y}_i | x_i) \rightarrow \max.$$

С учетом приведенных предположений получим:

$$L = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^N \sigma^N} e^{\sum_{i=1}^N \frac{[-(\tilde{y}_i - \bar{y}_i)]}{2\sigma^2}}.$$

Исследование функции правдоподобности на максимум, выполняют путем ее логарифмирования:

$$\begin{aligned} \ln L &= \ln \left[\frac{1}{(\sqrt{2\pi})^N \sigma^N} \right] - \frac{\sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - \bar{y}_i)^2}{2\sigma^2} \cdot \ln e = \ln 1 - N \ln \sqrt{2\pi} - N \ln \sigma - \\ &- \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - \bar{y}_i)^2 = -N \ln \sqrt{2\pi} - \ln \sigma - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - \bar{y}_i)^2. \end{aligned}$$

Для 5 экспериментов функция максимальной правдоподобности будет следующей:

$$\ln L = -5 \ln \sqrt{2\pi} - \ln \sigma - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^5 (\tilde{y}_i - \bar{y})^2.$$

Выводы

1. Разработан граф составляющих погрешности при измерении положения сегментов позвоночника.
2. Разработан граф составляющих погрешности при измерении равнодействующих от массы человека на ноги.
3. Выполнена оценка погрешностей подсистем S-контроля и R-контроля, как составных частей опорно-двигательной системы человека.

Список использованной литературы

1. Володарський Є.Т. Статистична обробка даних: навч. посібник / Є.Т. Володарський, Л.О. Кошева. - К.:НАУ, 2008. - 308 с.
2. Нестругина Е. С. Концепция эволюции синтеза мультиагентной информационно-измерительной системы процесса реабилитации человека после травматизма / Е. С. Нестругина, Е. Ю. Ларина, Н. И. Чичикало // Журнал «Восточно-Европейский журнал передовых технологий». – 2013. – № 2/9 (62). - С. 10-17.
3. Чичикало Н.И. Мультиагентная системная модель процесса реабилитации / Н.И. Чичикало, Е.С. Нестругина, Е.Ю. Ларина // «Вычислительный интеллект-2013 (результаты, проблемы, перспективы)»: материалы II международной научно-практической конференции (ComInt- 2013). - Черкассы, 2013.
4. Чичикало Н.И. Методы исследования эмоционального состояния человека / Н.И. Чичикало, Е.С. Нестругина, Е.Ю. Купцова Е.Ю. // Вісник Інженерної академії України. – К.: Видавництво Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова. – 2009. – №2. – 322 с.
5. Нестругина Е.С. Разработка индивидуальной модели суточного ритма физиологических процессов человека / Е.С. Нестругина, Н.И. Чичикало // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. – 2011. – №21(183). – 193 с.
6. Нестругина Е.С. Разработка индивидуальной модели суточного ритма физиологических процессов человека / Е.С. Нестругина, Н.И. Чичикало // Системи обробки інформації. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – №3(93). – 254 с.
7. Нестругина Е.С. К вопросу классификации видов возмущающих воздействий и реакций человека на них / Е.С. Нестругина, Н.И. Чичикало // Системи обробки інформації. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – №4(94). – 300 с.
8. Нестругина Е.С. Исследование эмоционального состояния и защиты здоровья студентов в период обучения / Е.С. Нестругина, А.В. Нестругин, Е.Ю. Купцова // тез. докл. науч.-прак. конф., (май 2009 г.). – К: НАУ, 2009. – С. 335–337.
9. Нестругина Е.С. Исследование влияния внешних возмущающих факторов на человека / Е.С. Нестругина, Н.И. Чичикало // тез. докл. науч.-прак. конф., (май 2011 г.). – Х.: ХНЕУ, 2011. – С. 124-125.
10. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений: ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002–ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. – [Введ. 2003-01-01]. – М: Изд-во стандартов, 2003. – 40 с.
11. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий: ГОСТ Р ИСО МЭК 17025-2000. – [Введ. 2003-01-01]. – М: Изд-во стандартов, 2003. – 40 с.
12. Нестругина Е.С. Концепция определения состояния двигательных функций человека в процессе реабилитации после травматизма / Е.С. Нестругина, Н.И. Чичикало // Журн. «Искусственный интеллект». – 2011. – № 2. – С. 60-65.

13. Нестругина Е.С. Контроль процесса реабилитации двигательных функций человека / Е.С. Нестругина, Н.И. Чичикало // тез. докл. науч.-прак. конф., (май 2011 г.). – Донецк, 2009. – С. 11-12.

Надійшла до редакції:
29.05.2013

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. Сорочан А.Г.

О.С. Нестругина, Е.Ю.Ларина, Н.И.Чичикало
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Оцінка похибок вимірювання параметрів опорно-рухової системи людини. У статті розроблено методику оцінки похибок підсистем S-контролю і R-контролю, як складових частин опорно-рухової системи людини. Розроблено критерій максимальної правдоподібності для оцінки точності вимірювань параметрів опорно-рухової системи людини.

Ключові слова: ефективність відновного лікування, математичне сподівання, середньоквадратичне відхилення, кодований сигнал.

E.S. Nestrugina, E.J. Larina, N.I. Chichikalo
Donetsk National Technical University

Evaluation of Measurement Errors of the Human Musculoskeletal System Parameters. In this paper the technique of errors estimation of S-and R-control subsystems as parts of the human musculoskeletal system is developed. Realistic criterion for assessing the measurements accuracy of the human musculoskeletal system is developed. To determine the effectiveness of drugs and medical interventions during rehabilitation of musculoskeletal and motor functions pathology after human injuries, the overall condition of the human must be considered (temperature, pulse, blood pressure), which are dependent on the biorhythms state. It is also important to determine the optimal conditions for measurements in order to obtain maximum likelihood results. As an objective statistically reliable assessment of traumatized human state, mathematical expectation μ and dispersion σ are suggested, obtained on the measurements results basis made in certain conditions. The histograms analysis shows that if we increase the number of observations, and the interval tends to zero, the histogram in the limit becomes a continuous characteristic of the distribution of errors. Sufficient conditions for the error components smallness were defined. To estimate the human musculoskeletal system measurement errors is necessary to evaluate the effectiveness of the treatment effects of traumatism through information-measuring system of human motor functions, to determine the criteria that characterize the degree of closeness of the consequences of traumatism to safe (desired) situation. Evaluating the effectiveness of the treatment effects of traumatism by the operation of IMS DPF can be made by characterizing the degree of closeness of the consequences of traumatism to safe (desired) situation. In IIS DPF it is necessary to control two independent variables. These variables are controlled by the amount of displacement of each vertebra relative to the reference value and the load level on the lower limbs (resultant force).

Keywords: rehabilitation efficacy, mathematical expectation, standard deviation, encoded signal.