



УДК 615.478

## ПОСТРОЕНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ИМПЕДАНСА БИОЛОГИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

*Бакланов А.Н., Бакланов Д.Н., Гладких С.А.*

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,  
г. Новочеркасск

Важным условием сохранения здоровья является баланс основных компонентов, находящихся во внутренних органах человека. В настоящее время развитие современных технологий позволяет узнать точный состав своего тела, а также внутренних органов, без сложных анализов, с помощью специальных приборов, которые основаны на измерение биоимпеданса живой ткани. В биоимпедансном анализе измеряются реактивное активное сопротивление участков тела человека на различных частотах. На основе которых и рассчитываются характеристики состава тела или внутренних органов. Между тем измерение импеданса человека или его внутренних органов связано с определенными проблемами. Так искажающими факторами могут быть положение человека в пространстве, неправильно подготовленные участки тела, с которых снимаются данные, неправильное расположение электродов, плохой контакт. Целью данной научно-исследовательской работы является построение регрессионной модели устройства измерения импеданса биологического объекта (БО), отражающей вклад импеданса БО в суммарный импеданс всего участка измерения

**Ключевые слова:** электропроводность, импеданс, схема замещения, планирование эксперимента

## CONSTRUCTION OF A REGRESSION DEVICE MODEL MEASUREMENTS OF IMPEDANCE OF A BIOLOGICAL OBJECT

*Baklanov A.N., Baklanov D.N., Gladkikh S.A.*

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk

An important condition for maintaining health is the balance of the main components located in the internal organs of a person. Currently, the development of modern technology allows you to find out the exact composition of your body, as well as internal organs, without complex analyzes, using special instruments that are based on measuring the bioimpedance of living tissue. Bioimpedance analysis measures the reactive resistance of parts of the human body at different frequencies. On the basis of which the characteristics of the composition of the body or internal organs are calculated. Meanwhile, the measurement of the impedance of a person or his internal organs is associated with certain problems. So the distorting factors may be the position of a person in space, improperly prepared parts of the body from which data is taken, improper arrangement of electrodes, poor contact. The purpose of this research work is to build a regression model of a device for measuring the impedance of a biological object (BO), reflecting the contribution of the BO impedance to the total impedance of the entire measurement site.

**Keywords:** electrical conductivity, impedance, equivalent circuit, experimental design.

В качестве модели исследования выбрана схема замещения участка прилегания двух электродов к коже [1-5], кожной ткани и самого биологического объекта (рисунок 1).

Так как изменение значения активного сопротивления у кожной ткани значительно выше, чем изменение реактивного сопротивления, то ее импеданс не будет зависеть от изменения частоты.

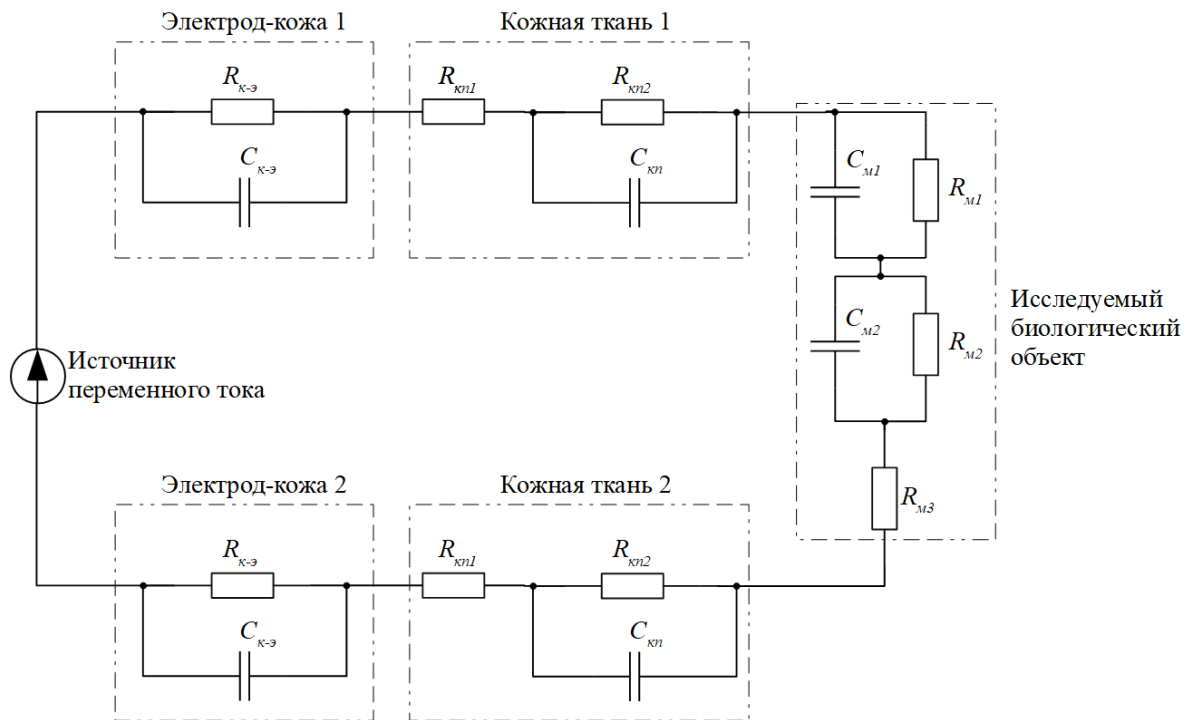


Рис. 1 - Эквивалентная схема

В общем виде формула расчета импеданса имеет вид:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad (1)$$

где  $R$  – активное сопротивление,  $X$  – реактивное сопротивление.

При параллельном соединении формула (1) примет вид:

$$Z = \sqrt{\left(\frac{R \cdot X^2}{R + X}\right)^2 - j \left(\frac{R^2 \cdot X}{R + X}\right)^2}; \quad (2)$$

Избавившись от мнимой части уравнения получим формулу для расчета импеданса участка электрод-кожа следующего вида:

$$Z_{\text{ЭК}} = \sqrt{\left(\frac{R_{\text{ЭК}} \cdot X_{\text{ЭК}}^2}{R_{\text{ЭК}} + X_{\text{ЭК}}}\right)^2 + \left(\frac{R_{\text{ЭК}}^2 \cdot X_{\text{ЭК}}}{R_{\text{ЭК}} + X_{\text{ЭК}}}\right)^2}, \quad (3)$$

где  $R_{\text{ЭК}}$  – активная часть импеданса электрод-кожа,  $X_{\text{ЭК}}$  – реактивная часть импеданса электрод-кожа.

При этом реактивная составляющая этого импеданса зависит от емкости, возникающей в области электрод-кожа. Изменение емкости связано во многом с площадью контакта, свойствами проводящего геля (клея) и качеством контакта (наличия пузырьков воздуха, густоты волосяного покрова и др.). Формула расчета реактивной части импеданса этого контакта, учитывающая частоту зондирующего тока, имеет вид:

$$X_{\text{ЭК}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{\text{ЭК}} \cdot f}, \quad (4)$$

где  $f$  – частота зондирующего тока,  $C_{\text{ЭК}}$  – емкость области контакта электрод-кожа.

Импеданс кожной ткани рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{КТ}} = R_{\text{КТ1}} + \sqrt{\left(\frac{R_{\text{КТ2}} \cdot X_{\text{КТ}}^2}{R_{\text{КТ2}} + X_{\text{КТ}}}\right)^2 + \left(\frac{R_{\text{КТ2}}^2 \cdot X_{\text{КТ}}}{R_{\text{КТ2}} + X_{\text{КТ}}}\right)^2}, \quad (5)$$



где  $R_{кт1}$ ,  $R_{кт2}$  – активная часть импеданса кожной ткани,  $X_{кт}$  – реактивная часть импеданса кожной ткани.

Реактивная составляющая импеданса кожной ткани рассчитывается как:

$$X_{кт} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{кт} \cdot f}, \quad (6)$$

где  $f$  – частота зондирующего тока,  $C_{кт}$  – емкость кожной ткани.

Импеданс биологического объекта рассчитывается по формуле:

$$Z_{БО} = R_{БО1} + \sqrt{\left(\frac{R_{БО2} \cdot X_{БО1}^2}{R_{БО2} + X_{БО1}}\right)^2 + \left(\frac{R_{БО2}^2 \cdot X_{БО1}}{R_{БО2} + X_{БО1}}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{R_{БО3} \cdot X_{БО2}^2}{R_{БО3} + X_{БО2}}\right)^2 + \left(\frac{R_{БО3}^2 \cdot X_{БО2}}{R_{БО3} + X_{БО2}}\right)^2}, \quad (7)$$

где  $R_{БО1}$ ,  $R_{БО2}$ ,  $R_{БО3}$  – активная часть импеданса биологического объекта,  $X_{БО1}$ ,  $X_{БО2}$  – реактивная часть импеданса биологического объекта.

Реактивная составляющая импеданса биологического объекта рассчитывается как:

$$X_{БО1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{БО1} \cdot f}, \quad (8.1)$$

$$X_{БО2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{БО2} \cdot f}, \quad (8.2)$$

где  $f$  – частота зондирующего тока,  $C_{БО1}$ ,  $C_{БО2}$  – емкости биологического объекта.

Суммарный импеданс всей модели рассчитывается как:

$$Z_{БО} = 2 \cdot Z_{ЭК} + 2 \cdot Z_{кт} + Z_{БО}, \quad (9)$$

Коэффициенты 2 стоят перед импедансом электрод-кожа и импедансом кожной ткани из-за использования двухэлектродной схемы.

Значение отклика рассчитывается как:

$$\gamma = \frac{Z_{БО}}{Z} \cdot 100; \quad (10)$$

#### Проведение эксперимента

Для расчета этих формул воспользуемся программой *MathCad*. В программе *MathCad* разработана модель эквивалентной схемы (рис. 2.1) со следующими формулами для расчета: (3 – 10). Внешний вид рабочего окна этой программы с формулами расчета модели представлен на рисунке 2.

В качестве факторов выбраны частота  $f$ , сопротивление  $R_{ЭК}$ , емкость  $C_{ЭК}$ . В качестве постоянной величины выбирается сопротивление кожной ткани, ее емкость и эти же параметры БО.

В качестве центра плана выбраны средние значения сопротивления и емкости эквивалентных схем, а также среднее значение частоты зондирующего тока. Крайние от средних значений (максимальное отклонение в большую и меньшую сторону от среднего) выбираем как верхние и нижние значения факторов. Данные о выбранных факторах приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения факторов

| Фактор                                   | Минимальное значение | Среднее значение | Максимальное значение | Отклонение от среднего |
|------------------------------------------|----------------------|------------------|-----------------------|------------------------|
| Частота зондирующего тока, кГц           | 1                    | 50               | 99                    | 49                     |
| Сопротивление участка электрод-кожа, кОм | 0,3                  | 0,45             | 0,6                   | 0,15                   |
| Емкость участка электрод-кожа, нФ        | 8                    | 15               | 22                    | 7                      |



Mathcad - [Планирование]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

My Site Go

$R_{кз} := 0.45 \cdot 10^{-3}$   $R_{кп1} := 13 \cdot 10^{-3}$   $R_{кп2} := 0.34 \cdot 10^{-3}$   $C_{м1} := 24 \cdot 10^{-9}$   $R_{м1} := 25.2 \cdot 10^{-3}$   $f := 50 \cdot 10^3$

$C_{кз} := 15 \cdot 10^{-9}$   $C_{кп1} := 72 \cdot 10^{-9}$   $C_{м2} := 48 \cdot 10^{-9}$   $R_{м2} := 4.4 \cdot 10^{-3}$

$R_{м3} := 0.82 \cdot 10^{-3}$

$X_{кз} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{кз} \cdot f} = 212.207$

$X_{кп1} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{кп1} \cdot f} = 44.21$

$X_{см1} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{м1} \cdot f} = 132.629$

$X_{см2} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{м2} \cdot f} = 66.315$

Импеданс кожа-электрод

$Z_{кз} := \sqrt{\left(\frac{R_{кз} \cdot X_{кз}^2}{R_{кз}^2 + X_{кз}^2}\right)^2 + \left(\frac{R_{кз}^2 \cdot X_{кз}}{R_{кз}^2 + X_{кз}^2}\right)^2} = 191.936$

Импеданс кожного покрова

$Z_{кп1} := R_{кп1} + \sqrt{\left(\frac{R_{кп2} \cdot X_{кп1}^2}{R_{кп2}^2 + X_{кп1}^2}\right)^2 + \left(\frac{R_{кп2}^2 \cdot X_{кп1}}{R_{кп2}^2 + X_{кп1}^2}\right)^2} = 1.304 \times 10^4$

Импеданс БО

$Z_{м} := R_{м3} + \sqrt{\left(\frac{R_{м1} \cdot X_{см1}^2}{R_{м1}^2 + X_{см1}^2}\right)^2 + \left(\frac{R_{м1}^2 \cdot X_{см1}}{R_{м1}^2 + X_{см1}^2}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{R_{м2} \cdot X_{см2}^2}{R_{м2}^2 + X_{см2}^2}\right)^2 + \left(\frac{R_{м2}^2 \cdot X_{см2}}{R_{м2}^2 + X_{см2}^2}\right)^2} = 1.019 \times 10^3$

Суммарный импеданс

$Z := 2 \cdot Z_{кз} + 2 \cdot Z_{кп1} + Z_{м} = 2.749 \times 10^4$

$\gamma := \frac{Z_{м}}{Z} \cdot 100 = 3.706$

Рис. 2 - Формулы и данные для расчетов в программе MathCad

Задачей эксперимента является определение влияния частоты зондирующего тока и параметров схемы замещения участка электрод-кожа на вклад импеданса БО в суммарный импеданс рисунок 1. По полученной модели будет возможно определить при какой частоте и каком качестве прилегания электрода мы получим наибольшую чувствительность.

Построим матрицу планирования эксперимента с учетом информации о факторах и выбранном отклике согласно полному факторному эксперименту [6].

Полным факторным экспериментом называется такой эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов.

Если число уровней каждого фактора равно двум, то имеем полный факторный эксперимент типа  $N=2^k$ , где  $k$  – количество факторов. Количество точек факторного пространства для проводимого эксперимента в рамках этого курсового



составит  $N=2^3=8$ . В каждой точке факторного пространства проведем по три эксперимента.

Используя модель из *MathCad* (рисунок 2) определим значения отклика при выбранных значениях факторов согласно таблице 2.

Таблица 2 – Матрица планирования эксперимента

| № п/п | X1 | f, кГц | X2 | R <sub>эк</sub> , кОм | X3 | C <sub>эк</sub> , нФ | γ, %     |
|-------|----|--------|----|-----------------------|----|----------------------|----------|
| 1     | +  | 99     | +  | 0,6                   | +  | 22                   | 3,395    |
| 2     | +  | 99     | +  | 0,6                   | +  | 22                   | 3,36105  |
| 3     | +  | 99     | +  | 0,6                   | +  | 22                   | 3,42895  |
| 4     | +  | 99     | -  | 0,3                   | +  | 22                   | 3,396    |
| 5     | +  | 99     | -  | 0,3                   | +  | 22                   | 3,36204  |
| 6     | +  | 99     | -  | 0,3                   | +  | 22                   | 3,42996  |
| 7     | +  | 99     | +  | 0,6                   | -  | 8                    | 3,366    |
| 8     | +  | 99     | +  | 0,6                   | -  | 8                    | 3,33234  |
| 9     | +  | 99     | +  | 0,6                   | -  | 8                    | 3,39966  |
| 10    | +  | 99     | -  | 0,3                   | -  | 8                    | 3,372    |
| 11    | +  | 99     | -  | 0,3                   | -  | 8                    | 3,33828  |
| 12    | +  | 99     | -  | 0,3                   | -  | 8                    | 3,40572  |
| 13    | -  | 1      | +  | 0,6                   | +  | 22                   | 26,176   |
| 14    | -  | 1      | +  | 0,6                   | +  | 22                   | 25,91424 |
| 15    | -  | 1      | +  | 0,6                   | +  | 22                   | 26,43776 |
| 16    | -  | 1      | -  | 0,3                   | +  | 22                   | 26,596   |
| 17    | -  | 1      | -  | 0,3                   | +  | 22                   | 26,33004 |
| 18    | -  | 1      | -  | 0,3                   | +  | 22                   | 26,86196 |
| 19    | -  | 1      | +  | 0,6                   | -  | 8                    | 26,173   |
| 20    | -  | 1      | +  | 0,6                   | -  | 8                    | 25,91127 |
| 21    | -  | 1      | +  | 0,6                   | -  | 8                    | 26,43473 |
| 22    | -  | 1      | -  | 0,3                   | -  | 8                    | 26,596   |
| 23    | -  | 1      | -  | 0,3                   | -  | 8                    | 26,33004 |
| 24    | -  | 1      | -  | 0,3                   | -  | 8                    | 26,86196 |

### Обработка результатов

Полученные данные отклика, вместе со значениями факторов, внесем в программу *Statistica* с целью их обработки. Таблица (*Spreadsheet*) для обработки этих данных в программе *Statistica* представлена на рисунке 3.

После создания таблицы проведем статистическую обработку входящих в нее данных. Для этого выберем из списка *DOE* тип эксперимента *2\*\* (K-p) standard designs (Box, Hunter, & Hunter)* и в новом окне выберем в пункте *Variables* в качестве зависимой переменной отклик (γ), а в качестве независимых переменных – факторы (Частота, R<sub>эк</sub>, C<sub>эк</sub>). В открывшемся окне выбираем вкладку *Model* в которой устанавливаем флаг на тройном взаимодействии при анализе, а также выбираем в пределе ошибки дисперсионного анализа чистую ошибку. После этого, во вкладке *ANOVA/Effects* выбираем *Summary: Effect estimates, Regression coefficients* и *ANOVA table*. Результаты представлены на рисунке 4 а,б,в.



|    | 1       | 2   | 3   | 4        |
|----|---------|-----|-----|----------|
|    | Частота | Рэк | Сэк | У        |
| 1  | 99      | 0,6 | 22  | 3,395    |
| 2  | 99      | 0,6 | 22  | 3,36105  |
| 3  | 99      | 0,6 | 22  | 3,42895  |
| 4  | 99      | 0,3 | 22  | 3,396    |
| 5  | 99      | 0,3 | 22  | 3,36204  |
| 6  | 99      | 0,3 | 22  | 3,42996  |
| 7  | 99      | 0,6 | 8   | 3,366    |
| 8  | 99      | 0,6 | 8   | 3,33234  |
| 9  | 99      | 0,6 | 8   | 3,39966  |
| 10 | 99      | 0,3 | 8   | 3,372    |
| 11 | 99      | 0,3 | 8   | 3,33828  |
| 12 | 99      | 0,3 | 8   | 3,40572  |
| 13 | 1       | 0,6 | 22  | 26,176   |
| 14 | 1       | 0,6 | 22  | 25,91424 |
| 15 | 1       | 0,6 | 22  | 26,43776 |
| 16 | 1       | 0,3 | 22  | 26,596   |
| 17 | 1       | 0,3 | 22  | 26,33004 |
| 18 | 1       | 0,3 | 22  | 26,86196 |
| 19 | 1       | 0,6 | 8   | 26,173   |
| 20 | 1       | 0,6 | 8   | 25,91127 |
| 21 | 1       | 0,6 | 8   | 26,43473 |
| 22 | 1       | 0,3 | 8   | 26,596   |
| 23 | 1       | 0,3 | 8   | 26,33004 |
| 24 | 1       | 0,3 | 8   | 26,86196 |

Рис. 3 - Таблица с данными факторов и отклика в программе Statistica

|                                                                                                                             |          |                      |          |          |                   |                   |          |                    |                   |                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------------------|----------|----------|-------------------|-------------------|----------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Effect Estimates; Var.:Var4; R-sqr=.99982; Adj.:99976 (Spreadsheet6)<br>2**(3-0) design; MS Pure Error=.0353833<br>DV: Var4 |          |                      |          |          |                   |                   |          |                    |                   |                   |
| Factor                                                                                                                      | Effect   | Std.Err.<br>Pure Err | t(16)    | p        | -95,%<br>Cnf.Limt | +95,%<br>Cnf.Limt | Coeff.   | Std.Err.<br>Coeff. | -95,%<br>Cnf.Limt | +95,%<br>Cnf.Limt |
| a) Mean/Interc.                                                                                                             | 14,8838  | 0,038397             | 387,631  | 0,000000 | 14,8024           | 14,9651           | 14,8838  | 0,038397           | 14,8024           | 14,9651           |
| (1)Var1                                                                                                                     | -23,0030 | 0,076793             | -299,544 | 0,000000 | -23,1658          | -22,8402          | -11,5015 | 0,038397           | -11,5829          | -11,4201          |
| (2)Var2                                                                                                                     | -0,2125  | 0,076793             | -2,767   | 0,013740 | -0,3753           | -0,0497           | -0,1062  | 0,038397           | -0,1876           | -0,0249           |
| (3)Var3                                                                                                                     | 0,0140   | 0,076793             | 0,182    | 0,857631 | -0,1488           | 0,1768            | 0,0070   | 0,038397           | -0,0744           | 0,0884            |
| 1 by 2                                                                                                                      | 0,2090   | 0,076793             | 2,722    | 0,015089 | 0,0462            | 0,3718            | 0,1045   | 0,038397           | 0,0231            | 0,1859            |
| 1 by 3                                                                                                                      | 0,0125   | 0,076793             | 0,163    | 0,872734 | -0,1503           | 0,1753            | 0,0062   | 0,038397           | -0,0751           | 0,0876            |
| 2 by 3                                                                                                                      | 0,0020   | 0,076793             | 0,026    | 0,979544 | -0,1608           | 0,1648            | 0,0010   | 0,038397           | -0,0804           | 0,0824            |

|                                                                                                                               |                    |                      |          |          |                   |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------|----------|----------|-------------------|-------------------|
| Regr. Coefficients; Var.:Var4; R-sqr=.99982; Adj.:99976 (Spreadsheet6)<br>2**(3-0) design; MS Pure Error=.0353833<br>DV: Var4 |                    |                      |          |          |                   |                   |
| Factor                                                                                                                        | Regressn<br>Coeff. | Std.Err.<br>Pure Err | t(16)    | p        | -95,%<br>Cnf.Limt | +95,%<br>Cnf.Limt |
| b) Mean/Interc.                                                                                                               | 27,26372           | 0,323791             | 84,2016  | 0,000000 | 26,57731          | 27,95012          |
| (1)Var1                                                                                                                       | -0,24140           | 0,002993             | -80,6450 | 0,000000 | -0,24774          | -0,23505          |
| (2)Var2                                                                                                                       | -1,43350           | 0,659264             | -2,1744  | 0,045023 | -2,83108          | -0,03593          |
| (3)Var3                                                                                                                       | -0,00034           | 0,018227             | -0,0186  | 0,985363 | -0,03898          | 0,03830           |
| 1 by 2                                                                                                                        | 0,01422            | 0,005224             | 2,7216   | 0,015089 | 0,00314           | 0,02529           |
| 1 by 3                                                                                                                        | 0,00002            | 0,000112             | 0,1628   | 0,872734 | -0,00022          | 0,00026           |
| 2 by 3                                                                                                                        | 0,00095            | 0,036568             | 0,0260   | 0,979544 | -0,07657          | 0,07847           |

|                                                                                                             |          |    |          |           |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----|----------|-----------|----------|
| ANOVA; Var.:Var4; R-sqr=.99982; Adj.:99976 (Spreadsh<br>2**(3-0) design; MS Pure Error=.0353833<br>DV: Var4 |          |    |          |           |          |
| Factor                                                                                                      | SS       | df | MS       | F         | p        |
| (1)Var1                                                                                                     | 3174,828 | 1  | 3174,828 | 89726,78  | 0,000000 |
| (2)Var2                                                                                                     | 0,271    | 1  | 0,271    | 7,66      | 0,013740 |
| (3)Var3                                                                                                     | 0,001    | 1  | 0,001    | 0,03      | 0,857631 |
| 1 by 2                                                                                                      | 0,262    | 1  | 0,262    | 7,41      | 0,015089 |
| 1 by 3                                                                                                      | 0,001    | 1  | 0,001    | 0,03      | 0,872734 |
| 2 by 3                                                                                                      | 0,000    | 1  | 0,000    | 0,00      | 0,979544 |
| Lack of Fit                                                                                                 | 0,000    | 1  | 0,000    | 0,0000424 | 0,994886 |
| Pure Error                                                                                                  | 0,566    | 16 | 0,035    |           |          |
| Total SS                                                                                                    | 3175,929 | 23 |          |           |          |

Рис. 4 - Анализ данных в программе Statistica: а) Effect estimates, б) Regression coefficients, в) ANOVA table



Из таблицы рисунка 4.в видно, что по критерию Фишера модель является адекватной, т.к. значение полученного критерия равняется 0.0000424 (пересечение строки *Lack of Fit* со столбцом *F*) и меньше критического, которое равняется 19. При этом в модели есть два значимых фактора (Частота и  $R_{эк}$ ) и также значимо взаимодействие этих факторов (рисунок 4.а, значимые коэффициенты отмечены стрелками).

На основе полученных регрессионных коэффициентов создано уравнение регрессии для кодированных значений:

$$Y = 14.8838 - 23.0030 \cdot X_1 - 0.2125 \cdot X_2 + 0.2090 \cdot X_1 X_2;$$

И для не кодированных значений:

$$y = 27.26372 - 0.2414 \cdot f - 1.4335 \cdot R_{эк} + 0.01422 \cdot f \cdot R_{эк};$$

При перерасчете по этому уравнению получим следующие средние значения отклика с его относительной погрешностью, представленные в табл. 2.4. При этом, если использовать все коэффициенты факторов (включая незначимые), получится добиться более совершенной линейной модели, которая максимально близко описывает аналитическую модель (таблица 3).

Таблица 3 – Отклонение отклика модели от экспериментального

| Номер эксперимента | Экспериментальный отклик (сред. знач.) | Отклик из лин. модели (знач. коэф.) | Погрешность модели, % | Отклик из лин. модели (знач. и незнач. коэф.) |
|--------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|
| 1                  | 3,395                                  | 3,350                               | 1,327                 | 3,395                                         |
| 2                  | 3,396                                  | 3,358                               | 1,126                 | 3,396                                         |
| 3                  | 3,366                                  | 3,350                               | 0,476                 | 3,366                                         |
| 4                  | 3,372                                  | 3,358                               | 0,423                 | 3,372                                         |
| 5                  | 26,176                                 | 26,171                              | 0,020                 | 26,176                                        |
| 6                  | 26,596                                 | 26,597                              | 0,002                 | 26,596                                        |
| 7                  | 26,173                                 | 26,171                              | 0,009                 | 26,173                                        |
| 8                  | 26,596                                 | 26,597                              | 0,002                 | 26,596                                        |

Данную задачу удалось решить полным факторным экспериментом, и полученная в результате линейная модель имеет достаточную точность (погрешность менее 5%), так что построение квадратичной модели не требуется.

Таким образом, были выбраны эквивалентная схема подключения электродов для измерения импеданса биологического объекта. Проведен эксперимент на модели в *Mathcad*, в качестве факторов выступали: частота зондирующего тока, сопротивление и емкость переходов электрод-кожа. Откликом являлся процент импеданса биологического объекта от общего импеданса эквивалентной схемы.

Результаты эксперимента, обработанные в программе *Statistica*, получена адекватная модель в физических и кодированных значениях, а также определены значимые факторы этой модели. На основе регрессионных коэффициентов модели составлено регрессионное уравнение. Определена относительная погрешность полученного регрессионного уравнения. Наибольшая погрешность значения отклика модели не превысила 5% и составила 1,33%. По критерию Фишера полученная модель адекватна, так как полученное значение 0.000043 меньше критического 19.

#### Список цитируемой литературы

1. Блинов А. В., Селиванов Е. П. II Измерительная техника. – 1995. – № 8. – С. 64.
2. Губанов Н.И., Утебергенов А.А. Медицинская биофизика. – М., 1978. – 335-336 с.



3. Коновалова Л.М., Ярошенко А.А. Временная нестабильность характеристик электропроводности кожи человека. // Биофизика. – 1981. – Т. 26. – № 2. – С. 380
4. Поливода В.И. Зависимость электропроводности клеток от состояния клеточных мембран. // IV Межд. биофиз. конгресс. – М., 1972. – С. 411–412.
5. Fricke H. The Maxwell-Wagner dispersion in a suspension of ellipsoids.// J. Phys. Chem. 1993; 57: 934-937.
6. Горбатенко Н.И., М.В. Ланкин, Д.В. Шайхутдинов. Планирование эксперимента. – Новочеркасск.: Оникс+, 2007. – 120 с.

© Бакланов А.Н., Бакланов Д.Н., Гладких С.А., 2020