

**И.В.НИЖЕВСКИЙ**, инженер, СКБ «Электрощит», Харьков;  
**В.И. НИЖЕВСКИЙ**, канд. техн. наук., доц., НТУ "ХПИ"

### К ВОПРОСУ РАСЧЕТА СОБСТВЕННЫХ И ВЗАИМНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРЕХ ВЗАИМОВЛИЮЩИХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

Запропоновано два методи розрахунку власних і взаємних опорів трьох взаємодіючих заземлювачів за наслідками вимірювань. Застосування цього підходу показано на прикладі фізичної моделі. Дано порівняння результатів експериментальних вимірювань і розрахунків. З метою підвищення точності розрахунку рекомендовано продовжити вдосконалення методів розрахунку.

Предложено два метода расчета собственных и взаимных сопротивлений трех взаимодействующих заземлителей по результатам измерений. Применение этого подхода показано на примере физической модели. Дано сравнение результатов экспериментальных измерений и расчетов. С целью повышения точности расчета рекомендовано продолжить совершенствование методов расчета.

Two methods of calculation of own and mutual resistances are offered three interfering grounders on results measurings. Application of this approach is rotined on the example of physical model. Comparison of results of the experimental measurings and calculations is Given. With the purpose of increase of exactness of calculation it is recommended to continue perfection of methods of calculation.

Проектирование любой электроустановки предусматривает использование методов расчета, в частности, заземляющих устройств. Монтаж и эксплуатация электроустановок предусматривают осуществление не только первичных измерений электрических параметров заземлителей, но и периодический их контроль в процессе эксплуатации согласно нормативам. И при расчетах, и при измерениях должна быть решена главная задача – достоверность получаемых результатов. В связи с этим постоянно ведутся исследования заземлителей с целью повышения точности расчетов и измерений путем совершенствования методов их расчета и измерения электрических параметров. Данная работа также посвящена этой цели.

**Использование электростатической аналогии в расчетах заземлителей.** В силу математической аналогии потенциальных полей разной физической природы для каждого из них можно указать аналог электрической емкости (фрагмент работы [1]). Так, например, для стационарных электрического, магнитного и теплового полей такими аналогами являются соответственно электрическая, магнитная и тепловая проводимости. При заданных геометрических параметрах системы тел значения величин-аналогов и электрической емкости пропорциональны,

причем коэффициентами пропорциональности служат отношения соответствующих физических параметров среды к диэлектрической проницаемости. В частности, для двух тел

$$G = \frac{\gamma}{\varepsilon} C ; \quad (1)$$

$$G_M = \frac{\mu}{\varepsilon} C ; \quad (2)$$

$$G_T = \frac{\lambda}{\varepsilon} C , \quad (3)$$

где  $G$  – электрическая проводимость между рассматриваемыми телами в однородной среде с удельной электрической проводимостью  $\gamma$ ;  $G_M$  – магнитная проводимость между телами в однородной среде с магнитной проницаемостью  $\mu$ ;  $G_T$  – тепловая проводимость между телами в однородной среде с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ ;  $C$  – емкость между телами в однородной среде с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ .

Такие же соотношения связывают частичные проводимости и частичные емкости в системе многих тел.

Рассмотренная аналогия делает расчет емкости эквивалентным расчету других физических параметров, в частности:

- а) магнитной проводимости различных магнитопроводов;
- б) волнового сопротивления волноводов, полосковых линий, антенн и других передающих и излучающих систем;
- в) тепловой проводимости между различными нагретыми телами;
- г) сопротивления растеканию электродов, соединяющих электрические цепи с проводящей средой (например, заземлителей).

Электростатическая аналогия позволяет использовать для расчета сложных заземлителей (фрагмент работы [2]) уравнения Максвелла:

$$\varphi_k = \sum_{i=1}^n \alpha_{ki} I_i. \quad (4)$$

В этом уравнении величины  $\alpha_{ki}$ , которые называются в электростатике потенциальными коэффициентами, представляют собой собственные (при  $k=i$ ) и взаимные ( $k \neq i$ ) сопротивления. По принципу взаимности  $\alpha_{ki} = \alpha_{ik}$ .

Электростатическая аналогия дает возможность вычислить собственные и взаимные сопротивления для ряда простых элементов, входящих в сложный заземлитель. Такими элементами обычно являются прямолинейный заземлитель (при горизонтальном расположении его обычно называют полосой, а при вертикальном – стержнем), кольцевой заземлитель, пластина.

Сопровитвлением растеканию заземлителя называется частное от деления его потенциала по отношению к бесконечно удаленным точкам земли на ток, стекающий с заземлителя.

Для сложного заземлителя, состоящего из  $n$  простых элементов, эта величина определяется из уравнений Максвелла и дополнительного условия

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \dots = \varphi_k = \dots = \varphi_n = \varphi, \quad (5)$$

которое является следствием обычно принимаемого допущения об отсутствии падения напряжения в материале проводников заземлителя.

Для симметричного заземлителя (т. е. для такого, в котором со всех элементов стекает одинаковый ток) решения системы не требуется, потенциал любого элемента равен

$$\varphi = I \sum_{i=1}^n \alpha_{ki},$$

а сопротивление растеканию всего заземлителя

$$R = \frac{\varphi}{\sum I} = \frac{\varphi}{nI} = \frac{\sum \alpha_{ki}}{n}. \quad (6)$$

Расчет несимметричного заземлителя требует решения системы уравнений. При  $n=2$  получаем в этом случае

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \alpha_{11}I_1 + \alpha_{12}I_2, \\ \varphi_2 &= \alpha_{21}I_1 + \alpha_{22}I_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Взаимное сопротивление  $\alpha_{12}$  всегда меньше собственных сопротивлений  $\alpha_{11}$  и  $\alpha_{22}$ .

Параллельное соединение (сопротивление  $R$ ) заземлителей определяет одинаковый потенциал на них ( $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ ). Тогда при  $\alpha_{12} = \alpha_{21}$

$$\alpha_{11}I_1 + \alpha_{12}I_2 = \alpha_{12}I_1 + \alpha_{22}I_2 = \varphi,$$

или  $\varphi = I_1(\alpha_{11} - \alpha_{12}) = I_2(\alpha_{22} - \alpha_{12})$  и

$$I_1 = \frac{\varphi}{\alpha_{11} - \alpha_{12}},$$

$$I_2 = \frac{\varphi}{\alpha_{22} - \alpha_{12}}.$$

Поскольку  $I_1 + I_2 = \varphi \left( \frac{1}{\alpha_{11} - \alpha_{12}} + \frac{1}{\alpha_{22} - \alpha_{12}} \right)$ , и если обозначить

$$A = \frac{1}{\alpha_{11} - \alpha_{12}} + \frac{1}{\alpha_{22} - \alpha_{12}}, \text{ то в результате } A = \frac{\alpha_{11} - \alpha_{12} + \alpha_{22} - \alpha_{12}}{(\alpha_{11} - \alpha_{12})(\alpha_{22} - \alpha_{12})} \text{ и для}$$

двух параллельно соединенных заземлителей имеем

$$R = \frac{\varphi}{I_1 + I_2} = \frac{1}{A} = \frac{\alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}^2}{\alpha_{11} + \alpha_{22} - 2\alpha_{12}}. \quad (8)$$

Например, при  $\alpha_{11}=2$  и  $\alpha_{22}=3$  без учета взаимовлияния, т.е. при  $\alpha_{12}=0$ , расчет по формуле (8) дает  $R=1,2$ , а при учете взаимовлияния, т.е.  $\alpha_{12}=1$ , получим  $R=1,67$ . Как видим, учет взаимовлияния приводит к увеличению сопротивления  $R$ .

Последовательное включение двух заземлителей в цепь с током  $I$  создает в результате сопротивление, которое снижено за счет взаимовлияния.

Система уравнений в этом случае выглядит так ( $\alpha_{12}=\alpha_{21}$ ):

$$\varphi_1 = I(\alpha_{11} - \alpha_{12}) \text{ и } R_1 = \alpha_{11} - \alpha_{12};$$

$$\varphi_2 = I(\alpha_{22} - \alpha_{12}) \text{ и } R_2 = \alpha_{22} - \alpha_{12}.$$

Соответственно

$$R_1 + R_2 = \alpha_{11} + \alpha_{22} - 2\alpha_{12} \quad (9)$$

Например, при  $\alpha_{11}=2$ ,  $\alpha_{22}=3$  и  $\alpha_{12}=0$ , т.е. без учета взаимовлияния по формуле (9) имеем сопротивление  $R=5$ , а взаимовлияние (например  $\alpha_{12}=1$ ) приводит к сопротивлению  $R=2+3-2=3$ .

При  $n>2$  решение системы уравнений в общем виде дает распределение тока  $I = \sum_{k=1}^n I_k$  между отдельными простыми элементами сложного заземлителя. Подставив полученные значения в любое уравнение системы можно найти потенциал  $\varphi$ . Сопротивление растеканию сложного заземлителя равняется частному от деления этого потенциала на ток  $I$ .

Таким образом, задача расчета сложного заземлителя сводится к определению собственных и взаимных сопротивлений всех входящих в него простых элементов и решению системы уравнений Максвелла.

**Расчет собственных и взаимных сопротивлений заземлителей входящих в систему трех взаимовлияющих заземлителей [3].** Рассмотрим возможности расчета с учетом изложенных выше положений на примере схемы замещения для системы из трех заземлителей, как показано на рис. 1.

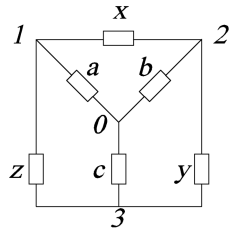


Рис. 1 – Схема для расчета сопротивления заземления: 1 – объект, 2 – токовый электрод, 3 – потенциальный электрод  
a, b, c – собственные сопротивления заземлителей;  
x, y, z – взаимные сопротивления заземлителей

Для расчета всех сопротивлений необходимо выполнить измерения сопротивления между точками 1-2, 1-3, 2-3, 2-3 при закорачивании 1-3, 1-3 при закорачивании 2-3 и 1-3 при закорачивании 1-2. После чего по результатам измерений составляется шесть уравнений.

Для нахождения всех сопротивлений необходимо решить систему шести уравнений с шестью неизвестными. Но при этом возникают некоторые сложности. Они заключаются в том, что при решении систем алгебраических уравнений высокого порядка можно получить не те значения, которые есть в действительности. К тому же на результат расчета сильно влияет погрешность прибора, который используется при измерении сопротивления. Ниже рассмотрен пример расчета сопротивления заземления с помощью системы уравнений.

Сначала были заданы значения всех собственных и взаимных сопротивлений (a, b, c, x, y, z). При подстановке всех этих значений в уравнения были получены правые части уравнений R1-R6 (на практике это есть результаты измерений между указанными на рис. 1 точками). После этого необходимо решить обратную задачу – необходимо по правым частям найти значения всех собственных и взаимных сопротивлений. Для этого рассматривается система шести уравнений с шестью неизвестными. При расчете этой системы была использована программа на основе метода градиентного спуска в оболочке *Excel*. Далее приведена система уравнений и несколько результатов расчета этой системы.

Измерение между точками 1-2:

$$\frac{x \cdot (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)}{x \cdot c + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} \cdot \left[ \frac{z}{z \cdot b + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} + \frac{y}{y \cdot a + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} \right] = R1$$

$$\frac{x}{x \cdot c + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} + \frac{z}{z \cdot b + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} + \frac{y}{y \cdot a + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)}$$

Измерение между точками 1-3:

$$\frac{z \cdot (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)}{z \cdot b + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} \cdot \left[ \frac{x}{x \cdot c + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} + \frac{y}{y \cdot a + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} \right] = R2$$

$$\frac{z}{z \cdot b + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} + \frac{x}{x \cdot c + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} + \frac{y}{y \cdot a + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)}$$

Измерение между точками 2-3:

$$\frac{y \cdot (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)}{y \cdot a + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} \cdot \left[ \frac{x}{x \cdot c + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} + \frac{z}{z \cdot b + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} \right] = R3$$

$$\frac{y}{y \cdot a + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} + \frac{x}{x \cdot c + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} + \frac{z}{z \cdot b + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)}$$

Измерение между точками 2-3 при закорачивании 1-3:

$$\frac{x}{x \cdot c + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} \cdot \frac{y \cdot (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)}{y \cdot a + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} = R4$$

$$\frac{x}{x \cdot c + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} + \frac{y}{y \cdot a + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)}$$

Измерение между точками 1-3 при закорачивании 2-3:

$$\frac{z}{z \cdot b + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} \cdot \frac{x \cdot (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)}{x \cdot c + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} = R5$$

$$\frac{z}{z \cdot b + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} + \frac{x}{x \cdot c + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)}$$

Измерение между точками 1-3 при закорачивании 1-2:

$$\frac{z}{z \cdot b + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} \cdot \frac{y \cdot (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)}{y \cdot a + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} = R6$$

$$\frac{z}{z \cdot b + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)} + \frac{y}{y \cdot a + (b \cdot c + a \cdot c + a \cdot b)}$$

Таблица 1 – Результаты расчета уравнений

№	a		b		c		x		y		z	
	зад.	пол.	зад.	пол.	зад.	пол.	зад.	пол.	зад.	пол.	зад.	пол.
1	1	0,786	2	2,87	3	3,453	4	3,447	5	4,155	6	6,473
2	5	10,82	3	5,168	2	4,17	7	5,765	4	3,096	8	5,57
3	2	2,797	4	0,901	2	3,432	1	1,174	1	1,073	3	2,337
4	4	4,897	6	7,816	8	9,628	3	2,855	5	4,81	3	2,921
5	3	2,064	5	8,83	4	6,968	4	3,83	6	4,794	3	2,891

В табл. 1 заданные значения – это те значения, при подстановке которых в уравнения были получены правые части уравнений (R1-R6). А полученные - это те, которые были получены в результате решения системы уравнений при рассчитанных правых частях R1-R6. Как видно из табл. 1, полученные результаты сильно отличаются от заданных. Это связано со сложностью решения систем уравнений высокого порядка.

При измерениях сопротивлений в реальных условиях могут быть некоторые отклонения в правых частях, которые могут быть связаны с неточностью результатов измерения. Причиной этого является погрешность приборов, которые используются для измерений.

Если принять во внимание еще и эти отклонения в правых частях уравнений, которые могут возникнуть при измерениях сопротивлений, то в результате могут быть получены совсем другие значения. В табл. 2 рассмотрены результаты расчета уравнений при небольшом отклонении в правых частях. В первой колонке приведены правые части уравнений и результаты расчета собственных и взаимных сопротивлений. Во второй колонке результаты при некотором отклонении в правых частях.

Таблица 2 – Результаты расчета при погрешности в правых частях

	1			2			
R1	1,791	a	4,897	R1±	1,85	a±	0,953
R2	1,846	b	7,816	R2±	1,761	b±	3,615
R3	2,28	c	9,628	R3±	2,159	c±	2,59
R4	1,542	x	2,855	R4±	1,425	x±	5,052
R5	1,248	b	4,81	R5±	1,48	y±	4,119
R6	1,589	z	2,921	R6±	1,395	z±	6,142

Из табл. 2 видно, что хотя правые части отличаются не более чем на 15%, в результате расчета системы сопротивления могут отличаться в несколько раз.

Но если зафиксировать один из результатов, то есть считать его известным, можно увеличить точность расчетов. Ниже в табл. 3 приведены результаты расчетов при фиксации результатов.

Жирным шрифтом в табл. 3 выделены зафиксированные значения сопротивлений.

Из табл. 3 видно, что если зафиксировать хотя бы один результат, точность расчетов увеличивается.

Таблица 3 – Результаты расчетов при фиксации результатов

Параметр	Результаты					
a=4	<b>2,88</b>	3,599623	3,980452	4,163641	4,161465	4,167905
b=6	5,996234	5,788687	6,121233	5,943849	5,945828	<b>7</b>
c=8	7,991741	8,468014	8,406721	8,26188	<b>8</b>	7,993888
x=3	3,128392	3,068793	<b>3</b>	2,994569	2,989536	2,917414
y=5	4,858834	4,936165	4,949524	<b>5</b>	5,023751	4,919455
z=3	3,095539	<b>3</b>	2,984938	2,975131	2,98756	3,012691

Таким образом, для нахождения сопротивления заземления, этот метод можно использовать, если зафиксировать хотя бы один из результатов.

Можно предложить другой метод расчета, в котором также рассчитывается система шести уравнений с шестью неизвестными, но не через сопротивления, а через распределение напряжения. Схема замещения для расчета сопротивлений приведена на рис. 2.

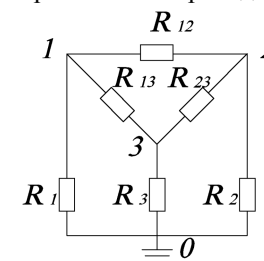


Рис. 2 – Схема для расчета сопротивления заземления

Сначала необходимо провести три варианта измерений.

По заданной схеме можно составить систему уравнений для определения напряжений через потенциалы:

$$\begin{aligned}
 U_{12} &= \varphi_1 + \varphi_2, \\
 U_{32} &= \varphi_3 + \varphi_2, \\
 U_{13} &= \varphi_1 + \varphi_3.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Из системы (10) можно найти значения потенциалов:

$$\begin{aligned}\varphi_2 &= \frac{1}{2}(U_{12} - U_{13} + U_{23}), \\ \varphi_1 &= \frac{1}{2}(U_{12} - U_{32} + U_{13}), \\ \varphi_3 &= -\frac{1}{2}(U_{12} - U_{32} - U_{13}).\end{aligned}\quad (11)$$

Сравнивая систему (10) с результатами эксперимента, который описан ниже, видно что она имеет несколько иной вид. По системе (10) невозможно найти значения потенциалов, потому что по измеренным значениям в результате эксперимента они имеют другие значения. Но если расшифровать значение хотя бы одного потенциала  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  или  $\varphi_3$ , то тогда возможно найти другие два потенциала и предложенный ниже метод можно использовать. По этому методу необходимо выполнить следующие три варианта измерений.

Вариант I: Источник питания подключен к точкам 1-2. Необходимо измерять значения напряжений  $U_{12}$ ,  $U_{32}$ ,  $U_{13}$ . После чего имеем систему (10).

Определение потенциалов  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  и использование их для узловых токов дает:

$$(\varphi_1 - \varphi_3)Y_{13} + \varphi_1 Y_1 = \varphi_2 Y_2 + (\varphi_3 - \varphi_2)Y_{23}; \quad (12)$$

$$(\varphi_1 - \varphi_3)Y_{13} + \varphi_3 Y_3 + (\varphi_3 - \varphi_2)Y_{23} = 0. \quad (13)$$

Вариант II: Источник питания подключен к точкам 2-3.

Значения напряжений  $U_{12}$ ,  $U_{32}$ ,  $U_{13}$  отличаются от измеренных в варианте I, но система (10) сохраняет вид и, соответственно, сохраняются выражения для потенциалов  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ .

Оценка узловых токов позволяет записать:

$$(\varphi_2 - \varphi_1)Y_{12} + \varphi_2 Y_2 = (\varphi_1 - \varphi_3)Y_{13} + \varphi_3 Y_3; \quad (14)$$

$$(\varphi_2 - \varphi_1)Y_{12} + (\varphi_1 - \varphi_3)Y_{13} + \varphi_1 Y_1 = 0. \quad (15)$$

Вариант III: Источник питания подключен к точкам 1-3. Учитывая замечание в варианте II в итоге имеем уравнения:

$$\varphi_1 Y_1 + (\varphi_1 - \varphi_2)Y_{12} = (\varphi_2 - \varphi_3)Y_{32} + \varphi_3 Y_3; \quad (16)$$

$$(\varphi_2 - \varphi_3)Y_{32} + (\varphi_1 - \varphi_2)Y_{12} + \varphi_2 Y_2 = 0. \quad (17)$$

В приведенных уравнениях использованы проводимости  $Y=I/R$ .

В итоге по результатам измерений в вариантах I, II, III получаем систему шести уравнений с шестью неизвестными и расшифровываем коэффициенты при шести проводимостях. Система должна иметь нормальное решение.

**Физический эксперимент.** Был проведен физический эксперимент, в котором на модели схемы были измерены значения напряжений и потенциалов. Значения сопротивлений в схеме рис. 2 приведены в табл. 4. Полученные результаты измерений напряжений и потенциалов на модели схемы (см. рис. 2) приведены в табл. 5.

Таблица 4 – Сопротивления, использованные в эксперименте

$R_{12}$ , Ом	$R_{23}$ , Ом	$R_{13}$ , Ом	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом
4,9	3	2,8	10,7	19,7	4,9

Таблица 5 – Результаты измерений напряжений и потенциалов, В

I				II				III			
$U_{12}$	10	$\varphi_1$	4,3	$U_{12}$	5,5	$\varphi_1$	6,5	$U_{12}$	5,8	$\varphi_1$	6,4
$U_{23}$	5,2	$\varphi_2$	5,7	$U_{23}$	10	$\varphi_2$	12	$U_{23}$	4,2	$\varphi_2$	0,6
$U_{13}$	4,8	$\varphi_3$	0,5	$U_{13}$	4,5	$\varphi_3$	2	$U_{13}$	10	$\varphi_3$	3,6

В табл. 5 в графах I, II, III результаты измерений соответственно в I, II и III вариантах подключения источника питания.

Как видно из табл. 5 система (10) в первом, втором и третьем вариантах имеет следующий вид:

I вариант	II вариант	III вариант
$U_{12} = \varphi_1 + \varphi_2;$	$U_{12} = \varphi_2 - \varphi_1;$	$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2;$
$U_{23} = \varphi_2 - \varphi_3;$	$U_{23} = \varphi_2 - \varphi_3;$	$U_{23} = \varphi_2 + \varphi_3;$
$U_{13} = \varphi_1 + \varphi_3;$	$U_{13} = \varphi_1 - \varphi_3;$	$U_{13} = \varphi_1 + \varphi_3.$

Определение потенциалов и использование их для узловых токов дает:

$$\begin{aligned}4,8Y_{13} + 4,3Y_1 &= 5,7Y_2 + 5,2Y_{23} \\ 4,8Y_{13} + 0,5Y_3 + 5,2Y_{23} &= 0 \\ 5,5Y_{12} + 12Y_2 &= 4,5Y_{13} + 2Y_3 \\ 5,5Y_{12} + 6,5Y_1 + 4,5Y_{13} &= 0 \\ 6,4Y_1 + 5,8Y_{12} + 4,2Y_{23} + 3,6Y_3 & \\ 4,2Y_{23} + 0,6Y_2 + 5,8Y_{12} &= 0\end{aligned}\quad (18)$$

С математической точки зрения решение полученной системы это нули.

Решить эту систему возможно, если знать одну из проводимостей. Для получения значений проводимостей необходимо в системе задать

одну из проводимостей. После решения системы уравнений получаем значение проводимостей, которые приведены в табл. 6.

Таблица 6 – Результаты расчета системы уравнений (18)

Параметры	$Y_{12}$	$Y_{23}$	$Y_{13}$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
Задано	0,204	0,333	0,357	0,093	0,051	0,204
Рассчитано	0,209	0,341	0,362	0,093	0,047	0,203

В табл. 6 заданные значения – это те, что были заданы в схеме (они отвечают сопротивлениям в табл. 4), а рассчитанные – это те, что были получены в результате расчета системы (18).

Погрешность расчета связана с решением систем высокого порядка, а также с неточностью приборов для измерения.

Таким образом, используя этот метод расчета, расшифровав значения всех потенциалов и задав одно из значений проводимостей, можно найти собственные и взаимные сопротивления заземлителей. Точность результатов расчета больше чем в первом методе, поэтому лучше использовать этот метод.

**Вывод.** Представленные в статье исследования необходимо продолжать. Совершенствование методов расчета позволит измерять сопротивление заземлителей, особенно больших размеров, при размещении измерительных электродов на близком расстоянии от заземлителя.

**Список литературы:** 1. *Иосель Ю. Я.* Расчет электрической емкости / *Ю. Я. Иосель, Э. С. Кочанов, М. Г. Струнский.* - 2-е изд., перераб. и доп. - Л. : Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1981. – 288 с.. 2. *Ослон А. Б.* Заземляющие устройства на линиях электропередачи и подстанциях высокого напряжения / *А. Б. Ослон* // *Итоги науки и техники. Электрические станции, сети и системы.* – М., 1964. – с. 65 – 184. 3. Пат. 19760 Україна, МПК<sup>7</sup> G01R 27/20. Спосіб вимірювання опору розтіканню окремих взаємозв'язаних заземлювачів. *Ніжевський В. І., Ніжевський І. В., Гуль В. І., Ганус О. І.*; заявник та патентовласник *Ніжевський В. І.* - № и 2006 08963; заявл. 11.08.2006; опубл. 15.12.2006. Бюл. № 12

*Поступила в редколлегию 06.02.2012*