

## РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УЗЛОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ

*Е.И. Гуревич, А.В. Вилесов*

## CALCULATION AND OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF MEASUREMENT UNITS OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

*E.I. Gurevich, A.V. Vilesov*

Рассматриваются методы контроля и схемотехнические решения измерительных устройств в автоматизированных системах контроля различных объектов, для которых характерны измерения в области сверхмалых токов и напряжений. Предлагаются графоаналитические методы поиска оптимальных значений параметров измерительных узлов на основе уравнений чувствительности с возможностью обработки результатов измерений на микроконтроллере, позволяющие повысить точность и параметрическую устойчивость измерителей. Приводится сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

*Ключевые слова: оптимизация параметров, измерительный узел, микроконтроллер.*

The article discusses the methods of monitoring and measuring, and circuit solutions for automated control systems of various objects, which are characterized by measurement of extremely small currents and voltages. Graphic-analytical methods for optimal parameters searching for measuring units on the basis of the equations of sensitivity with the possibility of processing the results of measurements on the microcontroller are discussed, allowing more accurate and parametric stability of the probes. A comparison of the results with experimental data is presented.

*Keywords: parameter optimization, measuring unit, microcontroller.*

Противоречие между постоянно растущими требованиями к чувствительности измерительных средств и линейности их выходных характеристик традиционно решается применением активных электронных приборов: операционных усилителей, компараторов и т. д. Как правило, это приводит к снижению параметрической устойчивости измерительных устройств и автоматизированных систем контроля (АСК), в целом, частью которых они являются.

В настоящее время актуальной является задача выбора оптимальных параметров элементов схем по заданным требованиям к ее характеристикам, включая и требования по стабильности. В частном случае – оптимизация параметров измерительных узлов автоматизированных систем контроля (АСК) и контрольно-проверочной аппаратуры (КПА) различных объектов контроля (ОК), для которых характерны измерения в области сверхмалых то-

ков и напряжений. К таким контролируемым параметрам относятся:

- сопротивления изоляции цепей питания;
- сопротивления нагрузки;
- качество соединения цепи «корпус».

Использование в таких измерителях пассивных элементов (резисторов) значительно повышает параметрическую устойчивость измерительных устройств и АСК в целом, но, с другой стороны, в связи с уменьшением значений измеряемых параметров предъявляет повышенные требования к выбору значений резисторов измерительных цепей и методам обработки результатов измерений.

Перечисленные выше требования приводят к необходимости решения задачи оптимального параметрического синтеза, состоящей в выборе значений параметров измерительной системы, обеспечивающих максимальную точность измерения контролируемого сигнала.

---

**Гуревич Ефим Израильевич** – канд. техн. наук, начальник сектора ФГУП «ГосНИИ Приборостроения», г. Москва; corund@col.ru

**Вилесов Андрей Владимирович** – инженер-электроник ФГУП «ГосНИИ Приборостроения», г. Москва; corund@col.ru

---

**Gurevich Efim Izrailevich** – PhD, head of sector of FGUP “GosNII Priborostroeniya”, Moscow; corund@col.ru

**Vilesov Andrey Vladimirovich** – electronics engineer of FGUP “GosNII Priborostroeniya”, Moscow; corund@col.ru

Решение этой проблемы позволяет повысить точность и сократить сроки создания первых образцов систем контроля за счет уменьшения времени, необходимого для их отладки и настройки.

Рассмотрим задачу оптимального параметрического синтеза, состоящую в выборе оптимальных значений параметров

$$x_{\text{опт}} = (x_{1\text{опт}}, \dots, x_{n\text{опт}}) \in D_x$$

измерительной системы, обеспечивающих максимальную точность измерения контролируемого сигнала, рассчитываемого по формуле

$$y_i = F_i(u_{\text{вх}}, x_1, \dots, x_n),$$

в заданном диапазоне его изменения

$$a_i \leq y_i(x) \leq b_i, i = 1 \dots m,$$

где  $D_x$  – область допустимых вариаций значений параметров;  $u_{\text{вх}}$  – входной сигнал;  $x = \{x_j\}_1^n$  – вектор параметров системы;  $y = \{y_i\}_1^m$  – вектор выходных контролируемых параметров системы;  $F_i$  – известный оператор, зависящий от топологии измерительной системы;  $a = y_{\text{min}}$  – минимальное значение контролируемого параметра;  $b = y_{\text{max}}$  – максимальное значение контролируемого параметра. Причем область допустимых вариаций значений параметров  $D_x$ , как правило, неизвестна.

Приведенная выше задача может быть решена графическим или аналитическим методом на основе уравнений чувствительности. Рассмотрим метод анализа параметрической чувствительности и стабильности применительно к измерительным схемам.

Параметрическая чувствительность – зависимость динамических свойств системы от вариации её параметров и характеристик. Под вариацией параметров понимают любые отклонения их от значений, принятых за исходные. Эти отклонения могут быть известны полностью и описаны некоторыми функциями или же известны только с точностью до принадлежности к определенному классу (например, ограничены по модулю). Вариации параметров могут быть конечные или бесконечно малые, при этом порядок дифференциального уравнения, описывающего их, может оставаться неизменным или изменяться. В качестве прямых оценок чувствительности принято использовать так называемые функции чувствительности, играющие большую роль в количественной оценке степени влияния вариаций параметров системы на её динамического свойства.

Необходимость учета параметрической чувствительности при решении задач оптимизации параметров обусловлена различными причинами.

Во-первых, часто оптимальный режим находится в области высокой параметрической чувствительности. Это может привести к тому, что неизбежные небольшие изменения входных воздействий существенно повлияют на результирующую величину контролируемого сигнала. В этом случае целесообразно находить такой оптимальный режим, при котором учитывается чувствительность

измерительной системы по каждому входному сигналу в определенном диапазоне его изменения.

Во-вторых, при оптимизации параметров приходится использовать математические модели измерительных узлов, в которые входят параметры, найденные с определенной степенью точности.

В таких случаях приходится идти на компромисс между оптимальностью и чувствительностью. Параметры должны выбираться так, чтобы критерий оптимальности не достигал экстремального значения, но зато был менее чувствительным к некоторым переменным. Практически здесь приходится решать задачу оптимизации по многим параметрам или задачу полиоптимизации.

Для расчетов будем использовать относительные функции чувствительности. Это безразмерные величины, позволяющие сопоставлять и оценивать влияние различных параметров и входных воздействий на выходные контролируемые параметры системы и на критерий оптимизации в любой точке поиска.

Относительные функции чувствительности имеют следующий вид:

$$S_{u_{\text{вх}}}^{y_i} = \frac{\partial y_i}{\partial u_{\text{вх}}} \cdot \frac{u_{\text{вх}}}{y_i}, S_{x_j}^{y_i} = \frac{\partial y_i}{\partial x_j} \cdot \frac{x_j}{y_i} \quad (1)$$

Исследуемое уравнение представим в виде обратной зависимости

$$u_{\text{вх}} = f(y_i, x_j).$$

На основании приведенных выше выражений параметрической чувствительности задача выбора оптимальных значений параметров  $x_{\text{опт}}$  измерительной системы может быть сформулирована следующим образом: определить такие значения  $x_{\text{опт}}$ , при которых удовлетворяются следующие условия:

- максимальной чувствительности функции  $u_{\text{вх}}(y_i)$  относительно каждого выходного контролируемого параметра  $y_i$  (максимально допустимый наклон графика функции  $u_{\text{вх}}(y_i)$ ):

$$\max(S_{y_i}^{u_{\text{вх}}}), \text{ или } \max\left(\frac{\Delta u_{\text{вх}}(y_i)}{\Delta y_i}\right);$$

- ограничение на линейность функции  $u_{\text{вх}}(y_i)$  – минимально возможное отклонение  $u_{\text{вх}}(y_i)$  от теоретической прямой, проходящей через точки  $a$  и  $b$ , соответствующие границам диапазона измерения,

$$\min(\Delta S_y^{u_{\text{вх}}}), \text{ где } \Delta S_y^{u_{\text{вх}}} = S_a^{u_{\text{вх}}} - S_b^{u_{\text{вх}}},$$

или

$$K_{\text{min}} < \frac{\partial u_{\text{вх}}(y_i)}{\partial y_i} < K_{\text{max}} \text{ при условии } a < y_i < b.$$

Рассмотрим подробнее применение аналитического метода для выбора оптимальных параметров схем измерения сопротивлений изоляции цепей питания  $R_{\text{изол.стат}}$ ,  $R_{\text{изол.дин}}$  и нагрузки  $R_{\text{нагр}}$ .

Для измерения величины  $R_{\text{изол.стат}}$  предлагается схема измерения, показанная на рис. 1.

Как видно из рис. 1,  $R_{\text{изол.стат}}$  определяется формулой

$$R_{\text{изол.стат}} = \frac{R1 \cdot R2 \cdot U_{\text{изм}}}{E \cdot R2 - (R1 + R2) \cdot U_{\text{изм}}},$$

где  $R1$  и  $R2$  – эталонные сопротивления, величина

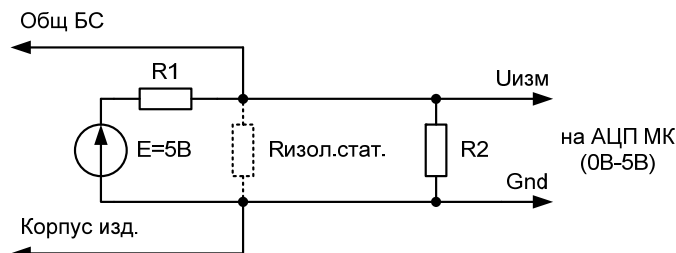


Рис. 1. Схема измерения  $R_{\text{изол.стат}}$  резистивным способом

которых определяется в зависимости от диапазона изменения величин  $R_{\text{изол.стат}}$ .

Определим чувствительности выходного напряжения схемы измерения сопротивления изоляции к входному контролируемому значению  $R_{\text{изол.стат}}$ , а также ее параметрам  $R1$ ,  $R2$ . Для этого запишем функцию в более удобном виде  $U_{\text{изм}} = f(R_{\text{изол.стат}}, R1, R2)$ :

$$U_{\text{изм}} = \frac{R_{\text{изол.стат}} \cdot R2 \cdot E}{R1 \cdot R2 + R_{\text{изол.стат}} \cdot (R1 + R2)}$$

и найдем частные производные функции  $U_{\text{изм}} = f(R_{\text{изол.стат}}, R1, R2)$ :

$$\frac{\partial U_{\text{изм}}(R_{\text{изол.стат}}, R1, R2)}{\partial R_{\text{изол.стат}}} = \frac{E \cdot R1 \cdot R2^2}{(R1 \cdot R2 + R_{\text{изол.стат}} \cdot (R1 + R2))^2}$$

$$\frac{\partial U_{\text{изм}}(R_{\text{изол.стат}}, R1, R2)}{\partial R1} = -\frac{E \cdot R_{\text{изол.стат}} \cdot R2 \cdot (R2 + R_{\text{изол.стат}})}{(R1 \cdot R2 + R_{\text{изол.стат}} \cdot (R1 + R2))^2}$$

$$\frac{\partial U_{\text{изм}}(R_{\text{изол.стат}}, R1, R2)}{\partial R2} = \frac{E \cdot R1 \cdot R_{\text{изол.стат}}^2}{(R1 \cdot R2 + R_{\text{изол.стат}} \cdot (R1 + R2))^2}$$

Найдем выражения, описывающие относительные функции чувствительности по каждому исследуемому параметру измерительной схемы, согласно формулам (1):

$$S_{R_{\text{изол.стат}}}^{U_{\text{изм}}} = \frac{R1 \cdot R2}{R1 \cdot R2 + R_{\text{изол.стат}} \cdot (R1 + R2)}$$

$$S_{R1}^{U_{\text{изм}}} = -\frac{R1 \cdot R2 + R1 \cdot R_{\text{изол.стат}}}{R1 \cdot R2 + R_{\text{изол.стат}} \cdot (R1 + R2)}$$

$$S_{R2}^{U_{\text{изм}}} = \frac{R1 \cdot R_{\text{изол.стат}}}{R1 \cdot R2 + R_{\text{изол.стат}} \cdot (R1 + R2)}$$

$U_{\text{изм}}, \text{ В}$

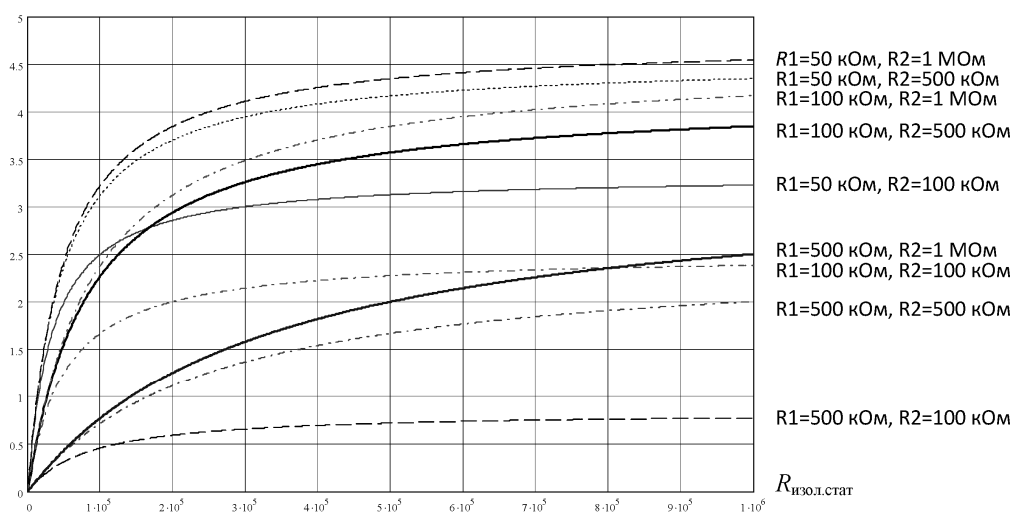


Рис. 2. Результаты расчета  $U_{\text{изм}} = f(R_{\text{изол.стат}})$  для  $R1 = 0,05 \text{ МОм}, 0,1 \text{ МОм}, 0,5 \text{ МОм}$ ;  $R2 = 0,1 \text{ МОм}, 0,5 \text{ МОм}, 1 \text{ МОм}$

В результате подстановки различных наборов значений сопротивлений  $R1, R2$  максимальная относительная чувствительность схемы измерения к контролируемому значению  $R_{\text{изол.стат}}$  составила  $S_{R_{\text{изол.стат}}}^{U_{\text{изм}}} = 0,53$  в начальной точке диапазона при  $a = R_{\text{изол.стат}} = 300 \text{ кОм}$  и  $S_{R_{\text{изол.стат}}}^{U_{\text{изм}}} = 0,18$  в конечной точке диапазона при  $b = R_{\text{изол.стат}} = 1,5 \text{ МОм}$ . Следовательно,  $R1 = 500 \text{ кОм}, R2 = 1 \text{ МОм}$  являются оптимальными величинами для заданного диапазона измерения.

Также с помощью разницы относительных чувствительностей в граничных точках диапазона измерения  $\Delta S_{R_{\text{изол.стат}}}^{U_{\text{изм}}} = S_a^{U_{\text{изм}}} - S_b^{U_{\text{изм}}}$  можно определить максимальную линейность схемы измерения. Применительно к схеме измерения сопротивления изоляции она составляет  $\Delta S_{R_{\text{изол.стат}}}^{U_{\text{изм}}} = 0,34$  при  $R1 = 500 \text{ кОм}, R2 = 1 \text{ МОм}$ .

Рассмотрим результаты расчета  $U_{\text{изм}}$  на основе графического метода, проведенные с использованием интегрированной математической системы Mathcad 11.0a в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.

Как видно из полученных зависимостей  $U_{\text{изм}} = f(R_{\text{изол.стат}})$ , приведенных на рис. 2, наилучшие результаты (в соответствии с условием сформулированной задачи) для диапазона измерения  $0,3 \text{ МОм} < R_{\text{изол.стат}} < 1,5 \text{ МОм}$  могут быть полу-

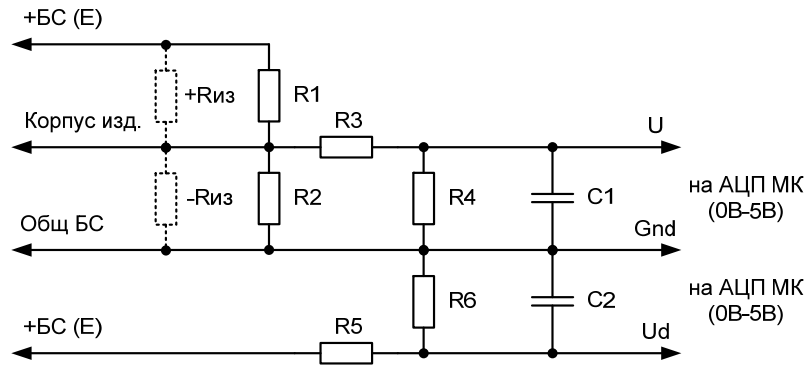


Рис. 3. Схема измерения  $R_{изол.дин}$

чены при следующих значениях:  $R_1 = 0,5 \text{ МОм}$ ,  $R_2 = 1 \text{ МОм}$ .

В этом случае  $\Delta U_{изм}$  составляет 1 В в заданном диапазоне изменения  $R_{изол.стат}$ . Также следует отметить, что при этих значениях  $R_1$  и  $R_2$  достигается и высокая линейность  $U_{изм} = f(R_{изол.стат})$ , что обеспечивает погрешность измерений  $U_{изм}$  менее 5 %.

Таким образом, результаты графического и аналитического методов полностью совпали.

Схема измерения  $\pm R_{изол.дин}$ , характеризующая величину сопротивления изоляции между цепями питания ( $\pm 27 \text{ В}$ ) и корпусом контролируемого изделия в процессе проведения контроля объекта, показана на рис. 3.

Данная схема целесообразна для измерения  $\pm R_{изол.дин}$  при работе с высокоомными цепями контроля.

Расчет  $\pm R_{изол.дин}$  может быть проведен по формулам:

$$R_{из}^- = \frac{1}{\frac{R_4}{R_3+R_4} \left( \frac{E \cdot (R_1+R_{из}^+)}{R_1 \cdot R_{из}^+} \cdot \frac{1}{U_{изм} + R_3} \right) - \frac{R_1+R_{из}^+}{R_1 \cdot R_{из}^+} \cdot \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3}},$$

при  $0 < U_{изм} < U_p$ ; (3)

$$R_{из}^+ = \frac{R_{из}^- \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot (U_{изм} \cdot (R_3+R_4) - E \cdot R_4)}{Q}$$

при  $U_{изм} > U_p$ ,

где

$$Q = R_{из}^- \cdot R_2 \cdot R_4 \cdot E - U_{изм} \cdot [R_1 \cdot R_2 \cdot (R_3 + R_4) + R_{из}^- \cdot ((R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4) + R_1 \cdot R_2)];$$

$$U_p = \frac{R_2 \cdot R_4 \cdot E}{R_2 \cdot (R_3 + R_4) + R_1 \cdot (R_2 + R_3 + R_4)};$$

$$U_d = E \cdot \frac{R_6}{R_5 + R_6}.$$

Решение указанной задачи может быть получено аналитическим методом, а также по графикам  $U_{изм} = f(\pm R_{изол.дин})$ , рассчитанным для различных значений  $R_1$ – $R_6$ . Указанные графики приведены на рис. 4–6.

Как показали расчеты, параметры выходных значений  $U_{изм}$  слабо зависят от резисторов  $R_2, R_5, R_6$ , что позволяет не анализировать графики указанных зависимостей при различных значениях  $R_2, R_5, R_6$ .

С целью решения задачи оптимизации расчет

зависимости  $U_{изм} = f(\pm R_{изол.дин})$  проводился для различных значений  $R_1$  и  $R_3$  (см. рис. 4),  $R_4$ .

Как видно из приведенных на графиках зависимостей  $U_{изм} = f(\pm R_{изол.дин})$ , оптимальными значениями параметров схемы (см. рис. 3) являются  $R_1 = 1 \text{ МОм}$ ,  $R_3 = 1,4 \text{ МОм}$ ,  $R_4 = 280 \text{ кОм}$ .

При низкоомном значении сопротивления контролируемых цепей схема, представленная на рис. 3 преобразуется в схему рис. 1.

Наиболее просто решается задача измерения  $R_{нагр}$ , для которой характерна классическая схема измерения, показанная на рис. 5.

В данном случае расчетной формулой является

$$R_{нагр} = \frac{R_1 \cdot U_{изм}}{E - U_{изм}},$$

где  $R_1$  – эталонное сопротивление.

Проведем аналогичный анализ  $R_{нагр}$  для решения задачи в соответствии со схемой, представленной на рис. 5.

Результаты расчета  $U_{изм} = f(R_{нагр})$ , для диапазона изменения  $20 \text{ Ом} < R_{нагр} < 200 \text{ Ом}$  приведены на рис. 6.

Как видно из полученных зависимостей  $U_{изм} = f(R_{нагр})$ , наилучшие результаты (в соответствии с условием задачи) для диапазона измерения  $20 \text{ Ом} < R_{нагр} < 200 \text{ Ом}$  могут быть получены при значении  $R_1 = 300 \text{ Ом}$ . В этом случае  $\Delta U_{изм}$  составляет 1,75 В в заданном диапазоне изменения  $R_{нагр}$ , при этом максимальная погрешность, определяемая нелинейностью выходной характеристики, составляет менее 6 %.

При проведении расчетов входное сопротивление измерителей не учитывалось.

Экспериментальная отработка параметров измерительных узлов АСК проводилась на макете, разработанном на основе микроконтроллера 1887ВЕ1У со встроенным 8-канальным десятирядным аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Применение микроконтроллера со встроенным АЦП с программно задаваемым коэффициентом усиления входного сигнала обеспечило возможность автоматического изменения диапазона измерения (в отличие от схем на активных элементах), а также позволило разделить задачу контроля на задачу измерения аналогового сигнала и задачу

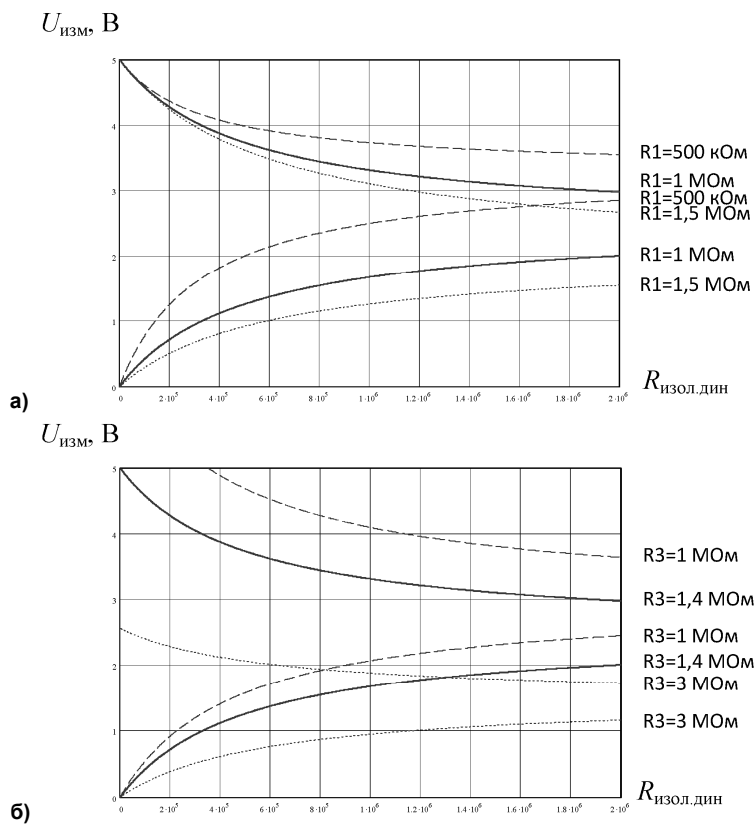


Рис. 4. Зависимость  $U_{изм} = f(\pm R_{изол.дин})$ : а – при  $R_2=2,43$  МОм,  $R_3=1,4$  МОм,  $R_4=280$  кОм,  $R_5=19,6$  кОм,  $R_6=2,8$  кОм; б – при  $R_1=1$  МОм,  $R_2=2,43$  МОм,  $R_4=280$  кОм,  $R_5=19,6$  кОм,  $R_6=2,8$  кОм

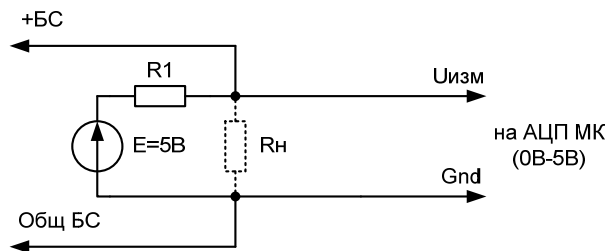


Рис. 5. Схема измерения  $R_{нагр}$

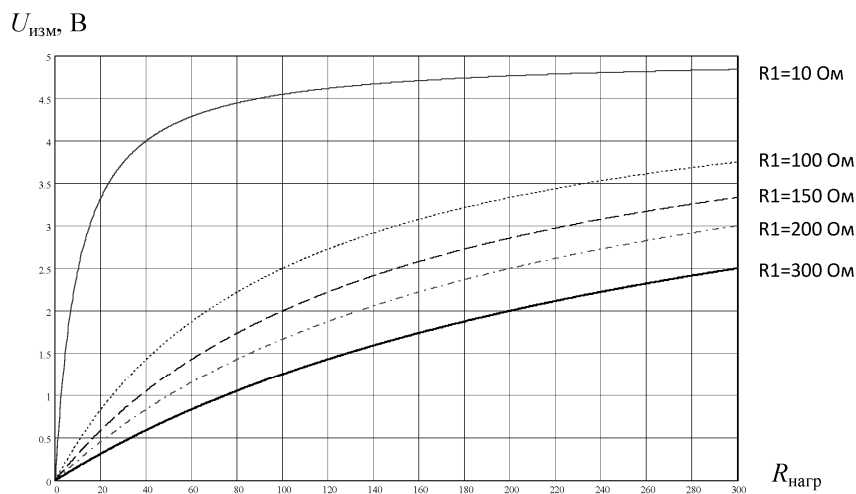


Рис. 6. Результаты расчета  $U_{изм} = f(R_{нагр})$  для диапазона изменения  $20 \text{ Ом} < R_{нагр} < 200 \text{ Ом}$

цифровой фильтрации полученных результатов по известным алгоритмам непосредственно в измерительном устройстве. В итоге данные особенности привели к увеличению параметрической устойчивости автоматизированных систем контроля в целом, за счет исключения влияния помех в измеряемых цепях, а также к сокращению сроков создания первых образцов АСК.

Оценка правильности выбора параметров узла измерения  $R_{\text{изол.стат}}$  проводилась по 7 значениям сопротивлений в соответствии с формулой (2) при значении  $R1 = 500 \text{ кОм}$ ,  $R2 = 1 \text{ МОм}$ , определен-

ных по расчетным кривым (см. рис. 2).

Как видно из приведенных выше графиков (рис. 7), максимальная погрешность измерения значения  $R_{\text{изол.стат}}$  составляет не более 4 %.

На рис. 8 приведены результаты эксперимента по измерению  $\pm R_{\text{изол.дин}}$  для 7 точек в диапазоне от 28 кОм до 1,4 МОм, при этом следует отметить, что погрешности измерений для приведенного диапазона практически отсутствуют, т.е. экспериментальные  $\pm R_{\text{изол.дин}}$  совпадают с расчетными значениями. Расчет  $\pm R_{\text{изол.дин}}$  проводился в соответствии с формулой (3).

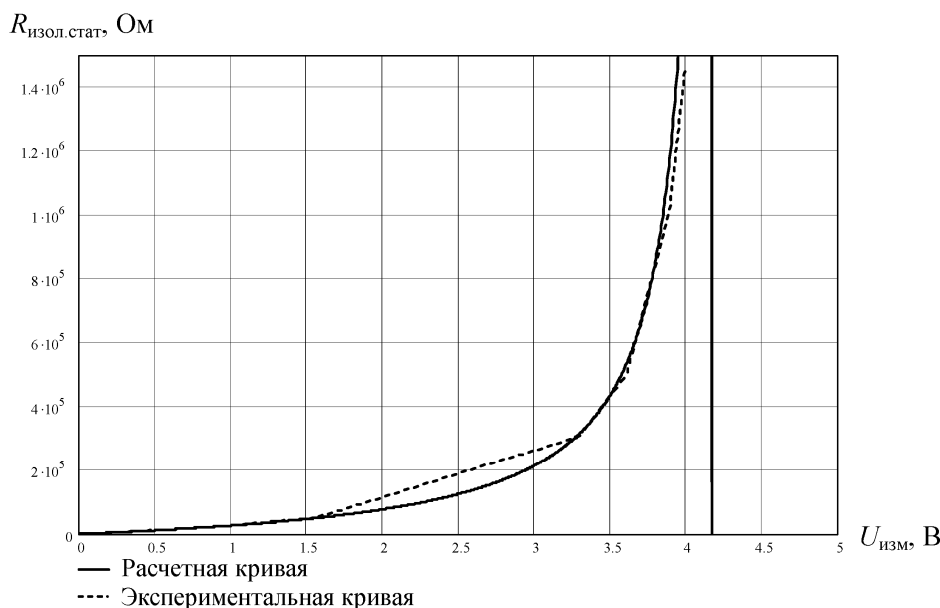


Рис. 7. Экспериментальная кривая измерения  $R_{\text{изол.стат}}$

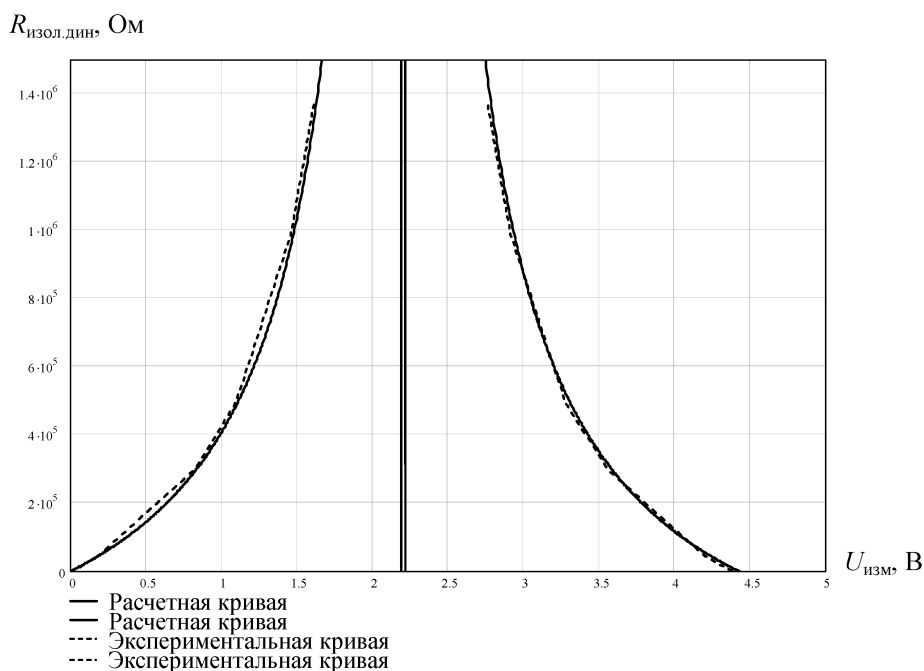


Рис. 8. Экспериментальная кривая измерения  $R_{\text{изол.дин}}$

Полученные в ходе проведенных экспериментов результаты позволили применить предложенные методы оптимизации параметров измерительных узлов и схемотехнические решения в разработке автоматизированных систем контроля электрических параметров различных систем управления.

**Литература**

1. Методы теории чувствительности в автоматическом управлении / В.И. Городецкий, Ф.М. Захарин, Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов. – Л.: Энергия, 1971.

2. Дмитриков, В.Ф. Повышение эффективности преобразовательных и радиотехнических устройств: учеб.-метод. пособие / В.Ф. Дмитриков, В.В. Сергеев, И.Н. Самылин. – СПб.: СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2005.

3. Попов, Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления / Е.П. Попов: – М.: Наука, 1989.

4. Евстифеев, А.В. Микроконтроллеры AVR семейства Т1ру и Мега фирмы «АТМЕL» / А.В. Евстифеев. – М.: Додэка XXI, 2007.

5. Технические условия АЕЯР.431280.537ТУ на микроконтроллер 1887ВЕ1У.

**Поступила в редакцию 12 октября 2010 г.**