

**Микропроцессорный комплекс для измерений
модуля и составляющих комплексного
сопротивления двухполюсника в многополюсной
электрической цепи**

Г. И. ШАРОНОВ¹, А. И. НЕФЕДЬЕВ²

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
Пенза, Россия, e-mail: turboacs@gmail.com

² Волгоградский государственный технический университет,
Волгоград, Россия, e-mail: nefediev@rambler.ru

Предложен микропроцессорный измерительный комплекс для измерений модуля и составляющих комплексного сопротивления отдельного двухполюсника и двухполюсника, расположенного в ветви многополюсной электрической цепи типа Т, Н с одной и двумя недоступными точками для подключения исследуемого комплексного сопротивления двухполюсника, соответственно. Приведена структурная схема микропроцессорного измерительного комплекса и результаты исследований.

Ключевые слова: микропроцессорный измерительный комплекс, комплексное сопротивление двухполюсника, многополюсная электрическая цепь, алгоритмический метод измерений, микропроцессорный блок управления.

The microprocessor-based system for measuring module and components of the complex resistance of an individual two-terminal element and a two-terminal element located in the branch of a multi-terminal T or H-type electric circuit with one or two points inaccessible for connection is proposed. A block diagram of the microprocessor-based measuring system and the results of the study are presented.

Key words: microprocessor-based measurement system, complex resistance of two-terminal element, multi-terminal electrical circuit, algorithmic method of measurement, microprocessor control unit.

Актуальной задачей при определении параметров комплексного сопротивления двухполюсника (КСД), как отдельного, так и расположенного в одной из ветвей многополюсной электрической цепи (МЭЦ), является устранение влияния на результаты измерений КСД, расположенных в других ветвях исследуемой и образцовой МЭЦ и аналогового тракта преобразования сигналов. Наиболее точно свойства исследуемых объектов отражают МЭЦ типа T или H с одной и двумя недоступными точками для подключения исследуемого КСД, соответственно. Комплексные сопротивления двух-

полюсника, представленные параллельными или последовательными двухэлементными, а также параллельно-последовательными или последовательно-параллельными трёх- и четырёхэлементными схемами замещения упомянутых выше двухполюсников, применяют для контроля широкого спектра выпускаемых электрорадиоизделий и получения информации о физических объектах посредством контроля неэлектрических величин электрическими методами.

Способы повышения точности измерений параметров отдельного пассивного комплексного двухполюсника, основанные на алгоритмических методах измерений, представлены в [1–4]. При их реализации используют выпускаемые промышленностью цифровые приборы для измерений напряжения, тока и фазового сдвига информационных сигналов.

Один из возможных вариантов измерителя параметров КСД, расположенного в МЭЦ типа T , описан в [5], однако его диапазон измерений ограничен как в сторону малых значений из-за влияния переходных сопротивлений контактов ключей и сопротивлений подводящих проводов, так и в сторону больших значений из-за влияния сопротивления изоляции зажимов при подключении к исследуемой МЭЦ и образцовому двухполюснику.

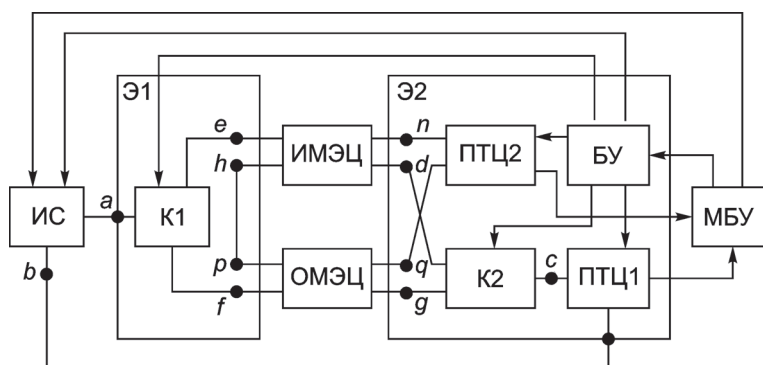


Рис. 1. Структурная схема микропроцессорного измерительного комплекса: *ИС* — источник сигнала; *Э1, Э2* — 1-й и 2-й экраны, соответственно; *К1, К2* — 1-й и 2-й двухпозиционные ключи, соответственно; *ИМЭЦ* — исследуемая многополюсная электрическая цепь; *ОМЭЦ* — образцовая многополюсная электрическая цепь; *ПТЦ1, ПТЦ2* — 1-й и 2-й преобразователи ток-цифра, соответственно; *БУ* — блок управления; *МБУ* — микропроцессорный блок управления; *e, h, p, f, n, d, q, q* — зажимы

Непосредственные и дистанционные измерения (с использованием двух экранированных двухпроводных линий для подключения исследуемой МЭЦ) в данном комплексе осуществляют посредством двухтактного или многотактного изменения конфигурации измерительной цепи без нарушения целостности исследуемой многополюсной электрической цепи (ИМЭЦ) и образцовой многополюсной электрической цепи (ОМЭЦ). Это позволяет получить значения модуля и составляющих для определения измеряемых параметров КСД в ветви ИМЭЦ с двумя недоступными точками независимо от параметров измерительной цепи и тракта преобразования сигналов МИК.

На рис. 1 представлена структурная схема МИК, в состав которой входят: источник сигнала ИС; первый и второй двухпозиционные ключи $K1, K2$, соответственно; ИМЭЦ, содержащая исследуемый двухполюсник Z_x ; ОМЭЦ, содержащая образцовый двухполюсник Z_0 ; первый и второй преобразователи ток-цифра (ПТЦ) — ПТЦ1, ПТЦ2, соответственно; блок управления БУ; первый и второй экраны Э1, Э2, соединённые с a, b — первым и вторым выходами ИС, соответственно; микропроцессорный блок управления МБУ.

На рис. 2 приведены схемы замещения исследуемого КСД Z_x и образцового КСД Z_0 , расположенных в исследуемой и образцовой МЭЦ, соответственно. Схемы замещения содержат: Z_x, Z_0 — измеряемое и образцовое КСД, соответственно, при этом сопротивление Z_0 , однородное одной из составляющих исследуемого Z_x КСД; $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8$ — КСД, эквивалентные сопротивлениям подводящих проводов и контактов ключей.

Введение в МИК экранов Э1, Э2 позволило исключить влияние на результаты измерений конечных значений комплексных сопротивлений зажимов e, h, p, f для подключения ИМЭЦ, ОМЭЦ относительно экрана Э1 и комплексных сопротивлений зажимов n, d, q, g для подключения ИМЭЦ, ОМЭЦ относительно экрана Э2, так как потенциалы данных групп зажимов эквивалентны потенциалам соответствующих экранов, а комплексное сопротивление между экранами подключено параллельно ИС.

На результат измерений исключено также влияние элементов измерительного комплекса $Z_{ИС}, Z_{ПТЦ1}, Z_{ПТЦ2}$, эквивалентных внутреннему комплексному сопротивлению ИС и входным комплексным сопротивлениям ПТЦ1, ПТЦ2, соответственно.

Токи, проходящие через ПТЦ1, ПТЦ2, с пассивным делителем тока в j -м такте измерений запишем, используя формулу Мейсона [6], приведенную к виду

$$\dot{I}_{ij} = \dot{E}_0 H_{ij} = \dot{E}_0 \frac{\sum_{k=1}^m P_{ijk} \Delta_{ijk}}{\Delta_j},$$

где $\dot{I}_{ij}$ — входной ток i -го ПТЦ; $\dot{E}_0$ — напряжение ИС; H_{ij} — системная функция исследуемой цепи, определяемая отношением силы тока, измеряемой i -м ПТЦ, к силе тока ИС; m — число возможных цепей передачи через i -й ПТЦ; P_{ijk} — величина k -й цепи передачи через i -й ПТЦ в j -м такте измерений; Δ_{ijk} — алгебраическое дополнение k -й цепи передачи через i -й ПТЦ в j -м такте измерений; Δ_j — определитель исследуемой цепи.

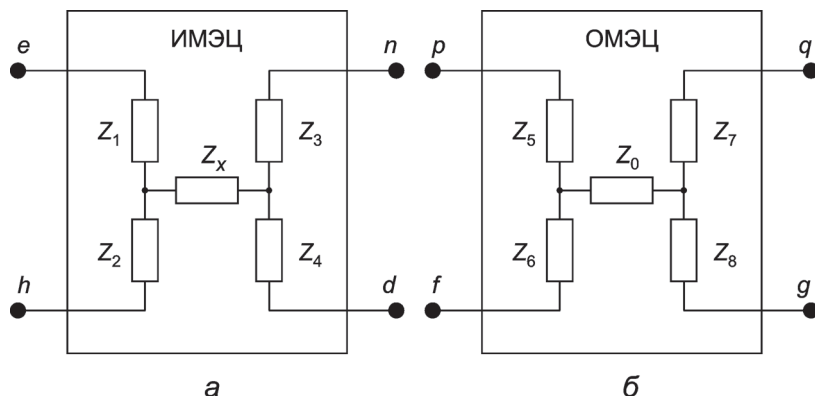


Рис. 2. Схемы замещения ИМЭЦ (а) и ОМЭЦ (б) типа Н:

ИМЭЦ — исследуемая многополюсная электрическая цепь; ОМЭЦ — образцовая многополюсная электрическая цепь; e, h, p, f, n, d, q, g — зажимы; Z_x, Z_0 — измеряемое, образцовое КСД, соответственно; Z_1 — Z_8 — КСД, эквивалентные сопротивлениям подводящих проводов и контактов ключей

При выполнении первого такта измерений по сигналу, формируемому БУ по команде МБУ, ключи $K1, K2$ подсоединяют выходы a, b к зажимам e и (через ПТЦ1) d , соответственно (см. рис. 1). При этом $\dot{I}_{11}, \dot{I}_{21}$ на входах ПТЦ1, ПТЦ2 определяют через параметры исследуемой цепи как

$$\dot{I}_{11} = \dot{E}_0 \left[(\dot{Z}_2 + \dot{Z}_x + \dot{Z}_0 + \dot{Z}_3 + \dot{Z}_5 + \dot{Z}_7 + \dot{Z}_{ПТЦ2}) / \Delta_1 \right];$$

$$\dot{I}_{21} = \dot{E}_0 [\dot{Z}_x / \Delta_1].$$

По результатам измерений в первом такте в МБУ вычисляется отношение численных значения модулей сил токов на выходах ПТЦ1, ПТЦ2:

$$\frac{N_{11}}{N_{21}} = \frac{n_1 I_{11}}{n_2 I_{21}} = \frac{n_1}{n_2} \frac{(Z_2 + Z_x + Z_0 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_{ПТЦ2})}{Z_x}, \quad (1)$$

где $N_{11} = n_1 I_{11}$, $N_{21} = n_2 I_{21}$; n_1, n_2 — коэффициенты передачи ПТЦ1, ПТЦ2, соответственно.

Во втором такте измерений ключ $K1$ подсоединяет выход a к зажиму f , а ключ $K2$ — выход b к зажиму g через ПТЦ1. При этом $\dot{I}_{12}, \dot{I}_{22}$ на входах ПТЦ1, ПТЦ2 определяют через параметры исследуемой цепи как

$$\dot{I}_{12} = \dot{E}_0 (\dot{Z}_2 + \dot{Z}_x + \dot{Z}_0 + \dot{Z}_3 + \dot{Z}_5 + \dot{Z}_7 + \dot{Z}_{ПТЦ2}) / \Delta_2;$$

$$\dot{I}_{22} = \dot{E}_0 (\dot{Z}_0 / \Delta_2).$$

По результатам измерений во втором такте вычисляется отношение численных значений модулей силы токов на выходах ПТЦ1, ПТЦ2:

$$\frac{N_{12}}{N_{22}} = \frac{n_1 I_{12}}{n_2 I_{22}} = \frac{n_1}{n_2} \frac{(Z_2 + Z_x + Z_0 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_{ПТЦ2})}{Z_0}, \quad (2)$$

где $N_{12} = n_1 I_{12}$, $N_{22} = n_2 I_{22}$; n_1, n_2 — коэффициенты передачи ПТЦ1, ПТЦ2, соответственно.

Результат измерений модуля КСД после двух тактов изменений конфигурации цепи вычисляется в микропроцессорном блоке управления на основе численных значений

из (1), (2). Например, при значениях образцового и исследуемого комплексных сопротивлений двухполюсников в виде $\dot{Z}_0 = \alpha$, $\dot{Z}_x = \beta - j\gamma$, где: α , γ — однородная и неоднородная по характеру образцовому двухполюснику α составляющие комплексного сопротивления двухэлементного двухполюсника, соответственно:

$$(N_{12}N_{21})/(N_{11}N_{22}) = (I_{12}I_{21})/(I_{11}I_{22}) = Z_x/Z_0 = (\beta^2 + \gamma^2)^{1/2} / \alpha.$$

Полученный результат отсчёта модуля пассивного КСД, расположенного в ИМЭЦ типа *H*, не зависит от внутреннего комплексного сопротивления ИС, комплексных сопротивлений неизмеряемых двухполюсников $\dot{Z}_1 - \dot{Z}_8$, внутренних комплексных сопротивлений ПТЦ1, ПТЦ2.

Измерение составляющих исследуемого пассивного КСД, расположенного в МЭЦ типа *H*, при двухтактном изменении конфигурации исследуемой цепи возможно амплитудно-фазовым способом, т. е. при одновременном использовании информации об амплитуде и фазе информационных сигналов $\dot{I}_{ij}$.

Фазовый сдвиг $\dot{I}_{21}$ относительно $\dot{I}_{11}$ составляет $\psi_1 = \varphi_{21} - \varphi_{11}$, где φ_{21} , φ_{11} — фазовые сдвиги $\dot{I}_{21}$, $\dot{I}_{11}$ относительно напряжения $\dot{E}_0$, соответственно. Фазовый сдвиг $\dot{I}_{22}$ относительно $\dot{I}_{12}$ составляет $\psi_2 = \varphi_{22} - \varphi_{12}$, где φ_{22} , φ_{12} — фазовые сдвиги $\dot{I}_{22}$, $\dot{I}_{12}$ относительно напряжения $\dot{E}_0$, соответственно.

Фазовые сдвиги $\dot{I}_{22}$, $\dot{I}_{12}$ и $\dot{I}_{21}$, $\dot{I}_{11}$, выраженные через параметры $\dot{Z}_x = \beta - j\gamma$, запишем как

$$\psi_2 - \psi_1 = \arctg(-\gamma/\beta). \quad (3)$$

Используя (3), получим

$$\cos(\psi_2 - \psi_1) = \cos[\arctg(-\gamma/\beta)] = \beta / (\beta^2 + \gamma^2)^{1/2}, \quad (4)$$

$$\sin(\psi_2 - \psi_1) = \sin[\arctg(-\gamma/\beta)] = -\left[\gamma / (\beta^2 + \gamma^2)^{1/2} \right]. \quad (5)$$

Составляющие исследуемого пассивного комплексного сопротивления двухполюсника с учётом (1), (2) и (4), (5) определяются как

$$\beta = \alpha \left[(I_{12}I_{21}) / (I_{11}I_{22}) \right] \cos(\psi_2 - \psi_1); \quad (6)$$

$$\gamma = -\alpha \left[(I_{12}I_{21}) / (I_{11}I_{22}) \right] \sin(\psi_2 - \psi_1). \quad (7)$$

Умножим числитель и знаменатель правых частей (6), (7) на $I_{11}I_{22}$, а знаменатель на $(\cos^2 \varphi_{11} + \sin^2 \varphi_{11})(\cos^2 \varphi_{22} + \sin^2 \varphi_{22}) = 1$:

$$\beta = \alpha \frac{I_{12}I_{21}I_{11}I_{22} \cos(\psi_2 - \psi_1)}{I_{11}I_{22}I_{11}I_{22}(\cos^2 \varphi_{11} + \sin^2 \varphi_{11})(\cos^2 \varphi_{22} + \sin^2 \varphi_{22})};$$

$$\gamma = \alpha \frac{I_{12}I_{21}I_{11}I_{22} \sin(\psi_2 - \psi_1)}{I_{11}I_{22}I_{11}I_{22}(\cos^2 \varphi_{11} + \sin^2 \varphi_{11})(\cos^2 \varphi_{22} + \sin^2 \varphi_{22})}.$$

Применив фазочувствительный выпрямитель и аналого-цифровой преобразователь, получим численные значения сигналов, пропорциональных $\dot{I}_{ij}$, детектированных синхронно с опорными ортогональными сигналами *N*, *M* блока управления по команде микропроцессора. Сигналы *N*, *M* представляют меандры с периодом, равным периоду $\dot{E}_0$ источника гармонического сигнала:

$$N_{ij} = k_i I_{ij} \cos(\varphi_{ij} \pm \vartheta);$$

$$M_{ij} = k_i I_{ij} \sin(\varphi_{ij} \pm \vartheta),$$

где k_i — коэффициенты передач фазочувствительных выпрямителей, реализованных в ПТЦ1, ПТЦ2 в первом и втором тактах измерений; $\pm \vartheta$ — фазовый сдвиг сигнала *N* относительно источника гармонического сигнала $\dot{E}_0$ (при равенстве нулю приводит к изменению величин проекций, что не влияет на результат отсчёта); N_{ij} , M_{ij} — значения сигналов, пропорциональных проекции $k_i \dot{I}_{ij}$, на *N*, *M* в первом $j=1$ и втором $j=2$ тактах измерений, соответственно.

Отсчёт составляющих исследуемого пассивного КСД осуществляется по формулам, реализация которых происходит в МБУ:

$$\begin{aligned} \beta/\alpha &= \left[(N_{11}N_{21} + M_{11}M_{21}) / (N_{11}^2 + M_{11}^2) \right] \times \\ &\times \left[(N_{12}N_{22} - M_{12}M_{22}) / (N_{22}^2 + M_{22}^2) \right] + \\ &+ \left[(N_{11}M_{21} - M_{11}N_{21}) / (N_{11}^2 + M_{11}^2) \right] \times \\ &\times \left[(N_{12}M_{22} - M_{12}N_{22}) / (N_{22}^2 + M_{22}^2) \right]; \\ \gamma/\alpha &= - \left[(N_{12}N_{22} + M_{12}M_{22}) / (N_{11}^2 + M_{11}^2) \right] \times \\ &\times \left[(N_{11}M_{21} - M_{11}N_{21}) / (N_{22}^2 + M_{22}^2) \right] + \\ &+ \left[(N_{11}N_{21} + M_{11}M_{21}) / (N_{11}^2 + M_{11}^2) \right] \times \\ &\times \left[(N_{12}M_{22} - M_{12}N_{22}) / (N_{22}^2 + M_{22}^2) \right]. \end{aligned}$$

Таким образом, исключается влияние на результат измерений КСД, расположенных в других ветвях ИМЭЦ и ОМЭЦ, ненулевого значения $Z_{ПТЦ1}$, $Z_{ПТЦ2}$ и $Z_{ИС}$, т. е. исключена методическая погрешность измерений параметров как отдельного КСД, так и КСД, расположенного в одной из ветвей МЭЦ типа *H*.

Результаты экспериментальных исследований. Высокие метрологические характеристики разработанного МИК подтверждены экспериментальными исследованиями на постоянном токе с использованием образцовых мер сопротивления Р331 от 10 Ом до 100 кОм.

Результаты исследований, проведённых в научно-исследовательском институте электронно-механических приборов (НИИЭМП) г. Пензы, подтверждают возможность точных измерений действительного значения прецизионных резисторов постоянного сопротивления с допускаемым отклонением 0,005—0,05 % в диапазоне сопротивлений 10—100000 Ом с относительной погрешностью 0,0005—0,003 %. Полученные результаты приведены в таблице.

Заключение. Разработанный МИК позволяет измерять параметры КСД отдельного двухполюсника и двухполюсника, расположенного в ветви многополюсной электрической цепи типа T или H с одной и двумя недоступными точками для подключения исследуемого КСД, соответственно, с высокой точностью. Комплекс можно использовать для дистанционных измерений номинального значения тензорезистора или его сопротивления относительно образцового тензорезистора (используемого для компенсации зависимости от изменений температуры физического объекта исследования), подключённых к измеряемой цепи по двойной T -образной схеме замещения.

Л и т е р а т у р а

1. Бобылев Д. А., Боровских Л. П. Подход к построению универсальных преобразователей параметров многоэлементных двухполюсников // Измерительная техника. 2014. № 12. С. 47—51.
2. А. с. 1068840 СССР. Устройство для измерения параметров пассивного комплексного двухполюсника (его варианты) / Г. И. Шаронов // Открытия. Изобретения. 1984. № 3.

Результаты экспериментальных исследований

Диапазон	Номинальное значение сопротивления, Ом	Сила тока, мА	Погрешность сравнения при относительной разнице от R_0 , %		
			0,0100	-50; +100	-70; +200
1	10	10,0	0,0005	—	—
2	100	10,0	0,0003	—	—
3	1000	10,0	0,0001	0,0001	0,0001; 0,0015
4	1000	1,0	0,0001	0,0015	0,0015
5	10000	1,0	0,0001	0,0015	0,003
6	100000	0,1	0,0001	0,0010	0,001; 0,003

3. Иванов В. И., Титов В. С., Голубов Д. А. Преобразователь параметров многоэлементных двухполюсников с уравновешиванием токов // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 2. С. 73—78.

4. Казаков В. А., Андреев А. Н., Светлов А. В., Светлов Д. А. Определение параметров двухполюсников по значениям дискретных отсчетов выходного напряжения измерительной схемы // Измерительная техника. 1999. № 8. С. 19—22.

5. А. с. 1211667 СССР. Микропроцессорное устройство для измерения параметров пассивного комплексного двухполюсника многополюсной электрической цепи (его варианты) / Г. И. Шаронов // Открытия. Изобретения. 1986. № 6.

6. Norman S. Nise. Control Systems Engineering. Hupokan: John Wiley & Sons. 2014.

Дата принятия: 09.03.2016.

622.67

Метрологическое обеспечение магнитной дефектоскопии стальных канатов

М. В. НЕМЦОВ¹, Г. Д. ТРИФАНОВ²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, e-mail: m.nemtsov@yandex.ru

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, e-mail: Kanat@pstu.ru

Рассмотрена методика измерений потери площади поперечного сечения по металлу подъёмных канатов из стальной ферромагнитной проволоки для оценки их работоспособности. Проведён анализ эффективности методики измерений на математической модели каната закрытой конструкции и определены погрешности измерений. Предложены меры усовершенствования данной методики измерений.

Ключевые слова: стальные канаты, дефектоскопия.

A method of measurement of the loss of cross area in the metals of lifting wire ropes made from ferromagnetic steel wires is considered to evaluate their efficiency. An analysis is made of the effectiveness of the measurement method on the mathematical model of the rope of closed construction. Measurement errors are determined. Measures to be proposed improve this measurement method.

Key words: steel ropes, inspection.

Подъёмные канаты из стальной ферромагнитной проволоки в процессе эксплуатации подвержены износу. Одним из критериев состояния канатов является потеря ΔS площади поперечного сечения (ППС) по металлу в процентах относительно номинальной $S_{\text{ном}}$, которая измеряется магнитным методом различной модификации [1, 2].

Магнитный метод. В Российской Федерации метод реализован в дефектоскопах ИНТРОС и заключается в следующем [3]. Первичный преобразователь (ПП), представленный на рис. 1, намагничивает контролируемый канат 5 до насыщения с помощью постоянных магнитов 3 с магнитными полюсами 4, обращёнными к канату, и измеряет с помощью