

Метрологический синтез канала измерения мощности

В. А Баронова

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

vasilisabaron@gmail.com

Н. В. Романцова

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

nvromantsova@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается разработка алгоритмического обеспечения для метрологического синтеза измерительных каналов для измерения косвенными методами на примере измерения мощности в электрической цепи. Представлено создание базы данных измерительных алгоритмов и базы данных измерительных модулей, их связь для синтеза измерительного канала и программная реализация разработанных алгоритмов.

Ключевые слова: измерительные каналы, метрологический синтез, измерительный модуль, измерение мощности

I. ВВЕДЕНИЕ

Проектирование измерительных систем не всегда может иметь типовое решение. Например, для контроля сложных технических объектов часто разрабатывается уникальное исполнение. Основой измерительной системы являются измерительные каналы. В большинстве случаев измерительный канал имеет типовую структуру, что способствует автоматизации проектирования.

Существующее программное обеспечение [1, 2] не позволяет полностью автоматизировать процесс проектирования измерительных каналов. MATLAB & Simulink и LabVIEW наиболее популярные среды моделирования, которые могут использоваться для целей проектирования измерительных систем. Данное программное обеспечение позволяет создавать как модели отдельных элементов измерительных систем для исследования метрологических характеристик, так и модели измерительных приборов и систем для проведения метрологического анализа путем имитационного моделирования.

Также для синтеза измерительных каналов можно использовать среды схемотехнического моделирования [3]. Разработка измерительных каналов в средах схемотехнического моделирования позволяет производить подбор элементной базы в зависимости от требуемых характеристик. Помимо этого, среды схемотехнического моделирования осуществляют имитационное моделирование электрических цепей, что также позволяет рассчитать метрологические характеристики проектируемой измерительной цепи.

За последние двадцать лет [4, 5] было представлено множество работ, в которых рассматривались различные аспекты автоматизации проектирования измерительных каналов. Однако в них не рассматривается алгоритм построения измерительных каналов для величин, которые можно получить путем косвенных измерений.

II. ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ

В данной работе будет рассматриваться алгоритм синтеза измерительного канала для косвенных измерений на примере измерения мощности в электрической цепи. Сначала опишем некоторые из существующих методов измерения электрической мощности, которые будут предлагаться для синтеза измерительного канала. Рассматриваемые методы измерения можно разделить на электрические и тепловые. Также было рассмотрено разделение методов в соответствии с необходимостью встраивать измерительный модуль в цепь, где необходимо измерить мощность и без необходимости встраивания измерительного модуля в цепь.

При использовании шунта в качестве датчика формула для расчета мощности P и погрешности измерения ΔP будут представлены следующими выражениями:

$$P = \frac{U^2}{R}; \quad \Delta P = \frac{2U}{R} \Delta U,$$

где U – падение напряжения на шунте, ΔU – погрешность измерения напряжения, R – номинальное сопротивление шунта.

Также шунт можно использовать для измерений в цепях переменного тока. Для измерения мощности в цепях переменного тока необходимо измерять разность фаз φ между током I и напряжением U в цепи, для чего можно использовать фазовый детектор. Для данного метода измерения формула для расчета мощности P и погрешности измерения ΔP будут выглядеть, как показано ниже:

$$P = \frac{U^2}{R} \cos \varphi$$

$$\Delta P = \frac{U}{R} \sqrt{(2 \cos \varphi \Delta U)^2 + (U \sin \varphi \Delta \varphi)^2},$$

При бесконтактном измерении мощности в цепи постоянного тока можно использовать датчик Холла. Однако для этого необходимо знать напряжение на

нагрузке U_n , где измеряется мощность. В данном случае выражения для расчета мощности P и погрешности измерения ΔP будут представлены следующими выражениями:

$$P = U_n \left(\frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{оп}}}{s} \right);$$

$$\Delta P = \frac{1}{s} \sqrt{((U_{\text{вых}} - U_{\text{оп}})\Delta U_n)^2 + (U_n(1 - U_{\text{оп}})\Delta U_{\text{вых}})^2},$$

где s – чувствительность датчика, $U_{\text{вых}}$ – напряжение, регистрируемое датчиком, $U_{\text{оп}}$ – опорное напряжение датчика, $\Delta U_{\text{вых}}$, ΔU_n – погрешности измерения напряжения на нагрузке и выходного напряжения датчика.

Еще один бесконтактный метод измерения мощности – тепловой. Для этого необходимо знать теплоемкость c и массу m материала нагрузки. Определив количество теплоты, выделенное на нагрузке за определенный промежуток времени, можно рассчитать мощность. Данный метод подходит, когда прямое измерение электрических параметров цепи невозможно. Тогда выражения для расчета мощности P и погрешности измерения ΔP будут выглядеть, как представлено ниже:

$$P = \frac{cm(T_2 - T_1)}{t};$$

$$\Delta P = \frac{cm}{t^2} \sqrt{2(t\Delta T)^2 + ((T_2 - T_1)\Delta t)^2},$$

где T_1 , T_2 – измеренные значения температуры, ΔT – погрешность измерения температуры, t – время, за которое проводилось измерение температуры.

III. АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

В общем виде алгоритм синтеза измерительного канала включает следующие шаги, представленные на рис. 1.

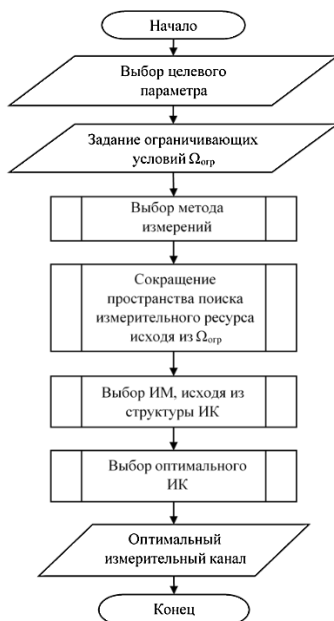


Рис. 1. Алгоритм синтеза измерительного канала

1. Определение конфигурации измерительного канала исходя из метода измерений.

2. Сокращение пространства поиска элементов измерительного ресурса исходя из ограничивающих условий.

3. Выбор измерительных модулей (ИМ) исходя из выбранной конфигурации измерительного канала (ИК): выбор первичного измерительно преобразователя (ПИП), сопрягаемого с измеряемой величиной; выбор аналого-цифрового преобразователя (АЦП), сопрягаемого с измеряемой величиной; выбор измерительных модулей, помимо ПИП и АЦП исходя из конфигурации измерительного канала и согласования измерительных модулей.

4. Формирование множества измерительных каналов и выбор оптимального измерительного канала.

В данной работе подробно будут рассмотрены пункты 1 и 2 общего алгоритма синтеза измерительных каналов.

А. Алгоритм выбора конфигурации измерительного канала

Измеряемая величина может иметь разные методы измерения. Исходя из того какой метод измерения выбрать функциональный и количественный состав модулей измерительного канала будет изменяться.

На рис. 2 представлен алгоритм для выбора конфигурации измерительного канала, исходя из измеряемой величины и метода измерения.

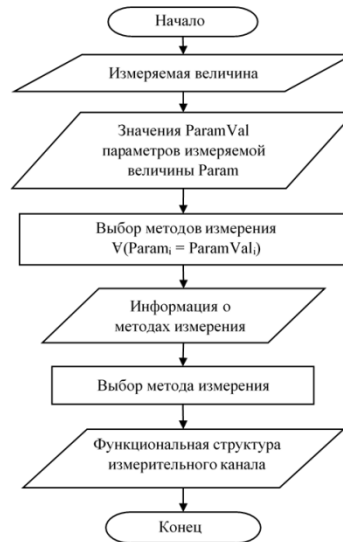


Рис. 2. Алгоритм выбора конфигурации измерительного канала

Сначала необходимо выбрать измеряемую величину и параметры ее измерения. Для измерения электрических величин это могут быть измерения в цепях переменного или постоянного тока, измерения с включением ПИП в цепь или бесконтактные измерения без включения в цепь дополнительных элементов.

После выбора параметров и измеряемой величины из всех возможных методов измерений, хранящихся в реляционной структуре данных, выбираются методы с соответствующими значениями заданных параметров.

После чего выводится информация о методе измерения такая как формула для расчета измеряемой величины и ее погрешности, уравнение измерений. На выходе алгоритма формируется измерительный ресурс в виде массива функциональных кодировок измерительных модулей.

В. Алгоритм сокращения пространства поиска элементов измерительного ресурса исходя из ограничивающих условий

Перед формированием возможных комбинаций измерительных каналов и поиска оптимального канала на основе выбранных целевых функций необходимо исключить из измерительного ресурса заведомо неподходящие измерительные блоки по какому-либо из ограничивающих условий или превышающие значение выбранных целевых функций.

Для этого необходимо представить данные об ограничивающих параметрах для одного измерительного модуля в виде пар: наименование параметра 1, значение параметра 1, ... наименование параметра N, значение параметра N. На выходе этого шага формируется сокращенный измерительный ресурс в виде удобном для передачи на следующий шаг алгоритма. На данном этапе реализации используется запись сокращенного измерительного ресурса во временный файл.

В общем случае в алгоритме сокращения пространства поиска можно выделить следующие функции, обозначенные на рис. 3:

1. Создание запроса для выбора измерительных модулей с заданными параметрами.
2. Выполнение запроса в базу данных измерительных модулей и чтение наименования модулей из базы данных.
3. Запись сокращенного измерительного ресурса во временный файл для дальнейшей обработки.

IV. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Для реализации описанных алгоритмов было создано две базы данных: база методов измерений и база измерительных модулей. Также было создано программное обеспечение, которое позволяет взаимодействовать с базами данных и производить поиск элементов по значениям атрибутов.

А. Описание структуры базы данных

Базы данных методов измерений будет состоять из сущности «Физические величины» и сущностей измерений разных физических величин, которые будут иметь связь один-к-одному. Сущность «Физические величины» будет использоваться в качестве классификатора. Из сущности измерений для данной работы рассмотрим сущность «Измерение мощности», сущности измерений других величин будут иметь аналогичную структуру.

Сущность «Измерение мощности» будет иметь следующие атрибуты: наименование измеряемой величины; метод измерения; параметры метода измерения – это может быть несколько дополнительных атрибутов, для измерения мощности это будет вид тока в

цепи, для которой проводятся измерения; тип используемого первичного преобразователя; формула для расчета измеряемой величины; формула для расчета погрешности; измерительная процедура, измерительный ресурс.

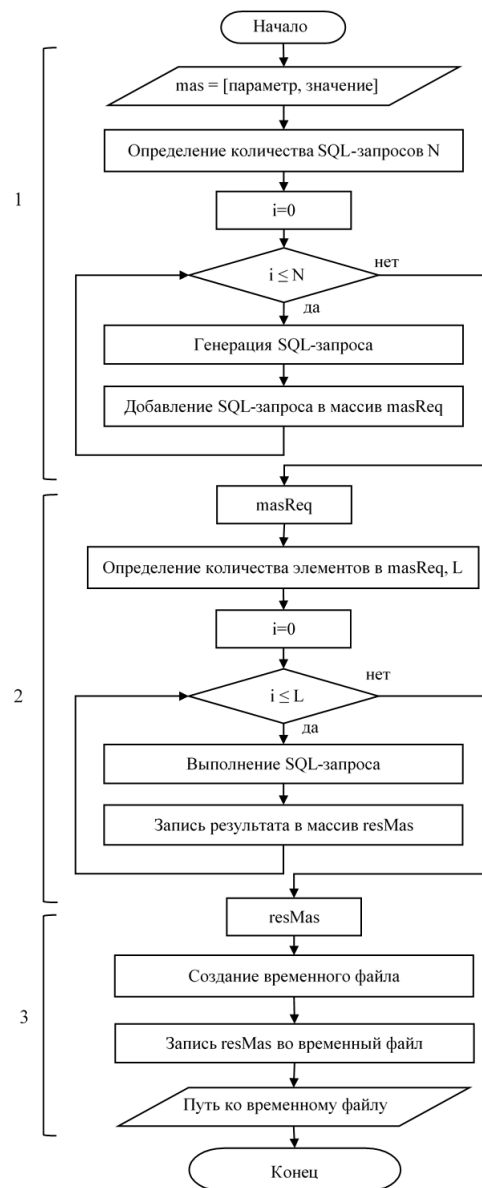


Рис. 3. Алгоритм сокращения измерительного ресурса

Для базы данных будет выделяться сущность «Измерительный модуль», которая является классификатором измерительных модулей, и сущности конкретных функционально определенных измерительных модулей, которые будут иметь связь один-к-одному, например, сущности «АЦП», «Датчик Холла», «Шунт» и т. п.

На примере сущности «АЦП» рассмотрим какие атрибуты должна иметь сущность функционально определенного измерительного модуля: тип измерительного модуля; модель; входной сигнал; несущая входного сигнала; выходной сигнал; несущая выходного сигнала; минимальное значение входной величины; максимальное значение входной величины; минимальное значение выходной величины;

максимальное значение выходной величины; тип корпуса; минимальное напряжение питания; максимальное напряжение питания; интерфейс; вес; длина; ширина; высота; минимальная рабочая температура; максимальная рабочая температура; индивидуальные атрибуты в зависимости от функционала измерительного модуля: для АЦП – разрядность, частота дискретизации, младший значащий разряд, время преобразования.

В. Пример программной реализации

Для взаимодействия с базой данных методов измерения было создано программное обеспечение, которое позволяет определить измерительный ресурс на основе выбранных измеряемой величины и параметров измерения. Также пользователю будет доступна следующая информация о методе измерения: используемые датчики, формула для расчета измеряемого параметра и его погрешности. Интерфейс разработанной программы представлен на рис. 4 и 5.

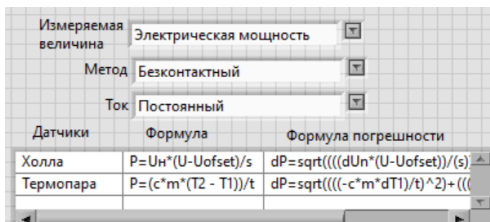


Рис. 4. Интерфейс программы для взаимодействия с базой данных методов измерения

Рассмотрим поиск методики и сокращения измерительного ресурса для измерения мощности на постоянном токе со встраиванием измерительного модуля в цепь:

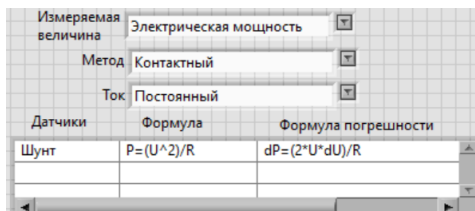


Рис. 5. Поиск методики измерения

После выполнения программы был определен следующий измерительный ресурс: шунт, усилитель, АЦП. Рассмотрим сокращение измерительного ресурса для шунта по следующим параметрам: номинальный рабочий ток 10 А и минимальная рабочая температура - 40 °С. Для АЦП по следующим параметрам: разрешение 10 бит и минимальная рабочая температура -40 °С.

После сокращения измерительного ресурса пользователь получает путь к временному файлу, где хранится сокращенный измерительный ресурс. Интерфейс программы представлен на рис. 6. После выполнения программы можно увидеть, что в сокращенный измерительный ресурс входит один шунт и два АЦП.

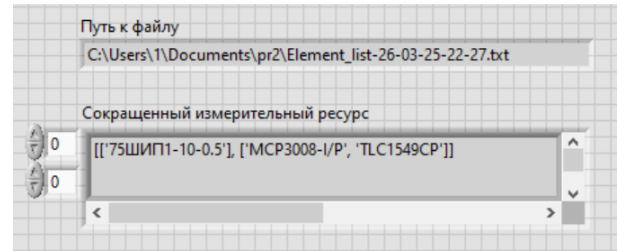


Рис. 6. Интерфейс программы для сокращения пространства поиска измерительного ресурса

После выполнения программы можно увидеть, что в сокращенный измерительный ресурс входит один шунт и два АЦП.

В. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работоспособность разработанного алгоритмического обеспечения подтверждается реализованным программным обеспечением для определения конфигурации измерительного канала и для сокращения пространства поиска измерительных модулей.

При дальнейшей разработке необходимо ввести проверку возможности существования решения и обработку ошибок вводимых пользователем данных. На данный момент было разработано алгоритмическое и программное обеспечение для первых двух этапов общего алгоритма синтеза измерительного канала. Для дальнейшей реализации необходимо разработать алгоритмы для построения возможных вариантов измерительных каналов из сокращенного измерительного ресурса и поиска оптимального измерительного канала. Также необходимо протестировать работоспособность алгоритмов на большем количестве данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Краснодарец Л.А., Пеньков М.Н. Компьютерное моделирование гидростатического измерителя плотности морской воды. Системы контроля окружающей среды. 2020. Вып. 1(39). С. 71–76. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-1-71-76.
- [2] Климентьев К.Е. Имитационное моделирование метрологических аспектов измерительных систем // В. сб. «ИТМУ-17: Информационные технологии моделирования и управления. Международный сборник научных трудов. Выпуск 17». Воронеж: Изд-во «Научная книга», 2004. С. 132-137
- [3] Baronova, V. A. Some aspects of synthesis of measuring channel V. A. Baronova N. V. Romantsova, Y. A. Tyarkin // Proceedings of the 2025 2025 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2025 ElCon), St. Petersburg, 28–29 января 2025 года. St. Petersburg, 2025.
- [4] В.В. Алексеев, П.Г. Королев, М.Ю. Обоишев. Построение множества возможных вариантов решения задачи синтеза измерительной цепи // Известия СПбГЭТУ. Сер. "Приборостроение и информационные технологии". 2002. Вып. 1. С. 14-17
- [5] Основы структурного проектирования измерительно-вычислительных систем: монография / В.В.Алексеев, П.Г.Королев, Н.С.Овчинников, Е.А.Чернявский; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина) "ЛЭТИ". СПб.: Энергоатомиздат, С.-Петерб. отд-ние, 1999. 110 с.