

АЛГОРИТМЫ РАБОТЫ И АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ ПАРАМЕТРОВ СИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В ЦЕПЯХ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

А.В. Бумагин, А.В. Руткевич, К.В. Сахаров (НПП "Цифровые решения"),
В.Б. Стешенко (ФГУП "РНИИ КП"), Г.В. Шишкин (НПП "Цифровые решения")

Рассматривается алгоритм и аппаратная реализация способа измерения параметров токов и напряжений генерирующих станций в период их возбуждения. Известно, что время измерения этих параметров играет ключевую роль. Быстродействие подобных устройств ограничивается частотой вырабатываемого напряжения 50 Гц. В статье рассмотрен алгоритм и вариант аппаратной реализации измерителя – предсказателя параметров, работающего с более высоким быстродействием.

В настоящее время актуальной является задача повышения качества электроэнергии. Одной из задач является улучшение характеристик систем автоматической регулировки возбуждения (АРВ) электрических машин на генерирующих станциях. Процесс регулировки возбуждения в значительной мере критичен к задержкам в тракте измерения первичных параметров: амплитуд тока и напряжения статора, тока ротора и разности фаз между током и напряжением.

Инерционность измерения параметров приводит к запаздыванию реакции АРВ, к броскам в сетях, снижению КПД электрической машины, запаздыванию реакции на короткие замыкания, и как следствие к существенному экономическому ущербу. Существующие АРВ включают измерители, обладающие существенной задержкой в измерении параметров, особенно это негативно проявляется при коротком замыкании (КЗ) в нагрузке. Поэтому актуальна задача разработки быстродействующего измерителя параметров тока для генерирующих станций.

Измеритель должен подключаться непосредственно на шину генератора через измерительные трансформаторы. При КЗ анализируемые сигналы обогащаются гармониками высших порядков, амплитудным и фазовым шумом. Это приводит к существенному увеличению погрешности в алгоритмах, основанных на непосредственной оценке. Не стационарность и малая длительность выбросов сигнала во время КЗ также затрудняют измерение параметров. Поэтому работа направлена на разработку алгоритма измерения параметров переменного тока, устойчивого к указанным факторам.

Основную техническую сложность составляют два противоречивых требования: точность и время усреднения. Современные системы управления требуют определения параметров с задержкой, не превышающей полупериода колебания 50 Гц (10 мс).

Рассматриваемые в статье алгоритмы и их аппаратная реализация предназначены для измерения параметров периодических входных аналоговых сигналов. Априорно задается синусоидальная форма входных сигналов. Устройство получает на входе четыре сигнала, три из которых являются синусоидами, сдвинутыми по фазе относительно друг друга на 120°. Эти три сигнала являются повторением напряжения на зажимах трехфазного синхронного генератора. Четвертый сигнал повторяет ток одной из обмоток статора генератора, и он опережает или отстает по

фазе от напряжения данной фазы на некоторый угол.

Измеряемыми (вычисляемыми) параметрами являются – действующие значения амплитуд напряжения и тока, фаза тока относительно первого канала напряжения, частота напряжения и тока.

Выдача параметров должна производиться постоянно с частотой ≥ 400 Гц, точность измерения $\geq 0,3\%$ после проведения калибровки. Задержка в выдаче измеренных (вычисленных) параметров не должна превышать 3 мс после текущего мгновенного значения тока или напряжения. Выдача измеренных параметров осуществляется в цифровом и аналоговом виде.

При решении данной задачи были рассмотрены следующие алгоритмы измерения (вычисления) параметров периодических входных аналоговых сигналов.

1. Алгоритм мгновенной оценки амплитуды, основанный на минимизации среднеквадратичной ошибки оценки параметра сигнала:

$$\sum_k (x_k - \hat{x}_k) \rightarrow \min,$$

где x_k и \hat{x}_k – соответственно величина и оценка дискретных отсчетов измеряемого сигнала.

Для реализации этого метода необходимо решить уравнение:

$$\frac{d}{dw} \sum_k (x_{n-k} - \hat{x}_{n-k}(w_n))^2 = 0, \quad (1)$$

где n – номер реализации; w_n – оцениваемый параметр входного сигнала.

Этот алгоритм дает, ожидаемо хорошие результаты в оценке амплитуды, но совершенно не устойчив к шумам. Использование низкочастотного фильтра на входе несколько улучшает ситуацию, но все равно не дает желаемого результата при белом шуме в 15% по амплитуде. Таким образом, алгоритм мгновенной оценки не удовлетворяет требуемым точностным характеристикам.

2. Оценка амплитуды RC-цепочкой. Данный алгоритм дает неприемлемо большую задержку, хотя устойчив к заданному уровню шума 15%. Его достоинством является простота вычислений при реализации в цифровом виде по сравнению с мгновенной оценкой, где требуется деление и извлечение корня.

3. Энергетический алгоритм оценки амплитуды основан на постоянстве энергии синусоидального сигнала на длительности кратной половине периода. Выбираем период интегрирования, равным в полпе-

риода сигнала, что соответствует 10 мс при частоте 50 Гц. Интегрирование за 10 мс дает задержку в оценке амплитуды 5 мс, то есть четверть периода. Наличие интегральной оценки позволяет минимизировать влияние аддитивного центрированного шума и аддитивных гармоник, кратных основной частоте сигнала, а также нелинейных искажений на точность измерения информативных параметров.

На рис. 1 представлена функциональная схема алгоритма оценки амплитуды, где показана операция взятия модуля вместо квадрата $X[i]$. Определение модуля вычислительно проще и не оказывает влияния на точность оценки. Точность оценки амплитуды критична к наличию постоянной составляющей во входном сигнале.

4. Временной алгоритм для измерения фазы сигналов на задержку-опережение можно построить на двух триггерах. На выходе схемы получается сигнал с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), соответствующей разности фаз. Если сигнал $S2$ опережает $S1$, то сигнал $D1 = 0$ (рис. 2), а ширина импульсов $U1$ соответствует разности фаз. Если сигнал $S2$ запаздывает относительно $S1$, то сигнал $D2=0$, а ширина импульсов $U2$ соответствует разности фаз.

Недостатками этого алгоритма являются: мгновенная оценка, требуемая высокая частота дискретизации. Так же алгоритм не работает при низком отношении сигнал-шум (ОСШ) и высоком уровне гармоник высших порядков, так как выделение фронтов связано с определением интервалов между нулями. Для выделения четких фронтов необходимо применять специальные конструктивные меры (триггеры Шмидта, формирователи коротких импульсов).

5. Корреляционный алгоритм оценки разности фаз (рис. 3) основан на вычислении корреляционной функции между током и напряжением. Для упрощения вычислений применяется знаковый алгоритм, который позволяет получить инвариантность к абсолютным значениям амплитуд входных сигналов. Операция умножения заменена логической операцией исключающего или, на которую подаются сигналы тока и напряжения после сравнения с нулем. Результат работы алгоритма – определение разности фаз в градусах в диапазоне $0...180^\circ$.

6. Алгоритм опережения-запаздывания сигнала применяется для устранения неоднозначности по фазе. Точность оценки фазы определяется частотой дискретизации АЦП. Для получения точности 0,3% ($1,08^\circ$) необходимо иметь более 360 отсчетов на один период сигнала.

7. Алгоритм оценки частоты с использованием фазовой автоподстройки (ФАП). Поскольку вся обработка сигналов производится в цифровом виде, входной сигнал перед фазовым детектором проходит сравнение с нулем, таким образом выделяются полу-

периоды. Схема используемого фазового детектора соответствует функциональной схеме временного алгоритма измерения фазы. Выходы фазового детектора подаются на сумматор, на выходе которого получается биполярный ШИМ сигнал. В цепи обратной связи (ФАП) тоже стоит сравнение с нулем, что обусловлено схемой фазового детектора.

Данный алгоритм дает высокую точность, но сложность его реализации совершенно ее не оправдывает.

8. Временной алгоритм оценки частоты с фильтрацией. Канал измерения частоты входного сигнала построен по принципу измерения длительности интервалов между нулями и состоит из счетчика импульсов дискретизации АЦП, ключа K , управляемого сигналом детектора нуля входного сигнала напряжения схемы скользящего усреднения по K отсчетам, построенной на линии задержки, и умножителя на постоянный масштабирующий коэффициент. Результатом работы алгоритма является число N отсчетов АЦП на полупериоде сигнала.

В результате сопоставления результатов компьютерного моделирования рассмотренных алгоритмов был выбран корреляционный. Для его реализации разработан специализированный вычислитель на базе микроконтроллера NXP (Philips) LPC2129 с ядром ARM7 и выполнен в конструктиве, предназначенном

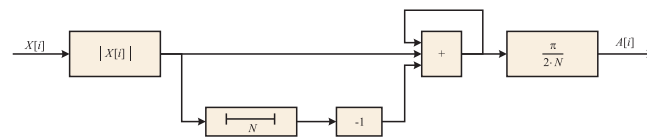


Рис. 1. Функциональная схема алгоритма измерения амплитуды, где $X[i]$ – отсчет входного сигнала, N – число отсчетов на полупериоде сигнала, $A[i]$ – оценка амплитуды сигнала

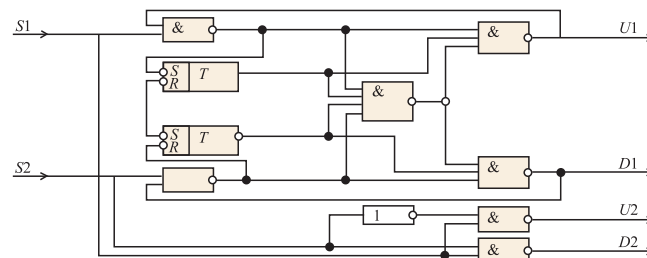


Рис. 2. Функциональная схема временного алгоритма измерения фазы

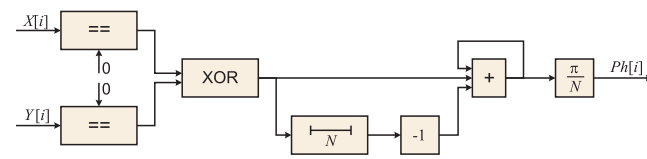


Рис. 3. Функциональная схема алгоритма оценки разности фаз

для установки на DIN-рейку. Конструкция модуля допускает установку платы расширения, позволяющую реализовать дополнительные интерфейсы, увеличить объем памяти и реализовывать специфические для потребителя функции.

Устройство предназначено для работы в системе управления возбуждением электрического генератора в качестве измерителя параметров выходных напряжений. Устройство измерения параметров синусоидальных сигналов также может применяться и как самостоятельная измерительная система для учета и контроля параметров электроэнергии.

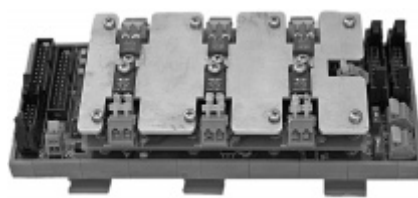


Рис. 4. Внешний вид прибора

Особенностью данной системы является быстрая оценка действующего значения синусоидального сигнала. Задержка составляет ≤ 5 мс. В месте с тем достигается высокая точность измерения всех параметров — 0,3%. Такие технические характеристики обеспечиваются специально

разработанными алгоритмами, основанными на энергетических и корреляционных свойствах входных сигналов.

Измеренные параметры выдаются в цифровом и аналоговом виде. Все входные/выходные сигналы имеют гальваническую развязку. Для подключения сигналов используются пружинные соединители WAGO, позволяющие ускорить монтаж системы.

Устройство содержит по три канала тока и напряжения. Каналы попарно независимые. В каждой паре каналов измеряется амплитуда напряжения, амплитуда тока, частота напряжения и разность фаз. Внешний вид прибора представлен на рис. 4.

В ходе испытаний прибора были определены точности измерения действующих значений напряжения, токов частоты и фазы. Полученные данные подтвердили высокую эффективность выбранного корреляционного алгоритма (рис. 5).

Таким образом, разработанное устройство обладает высокими точностными характеристиками и может быть применимо для систем автоматизации электростанций и ТЭЦ.

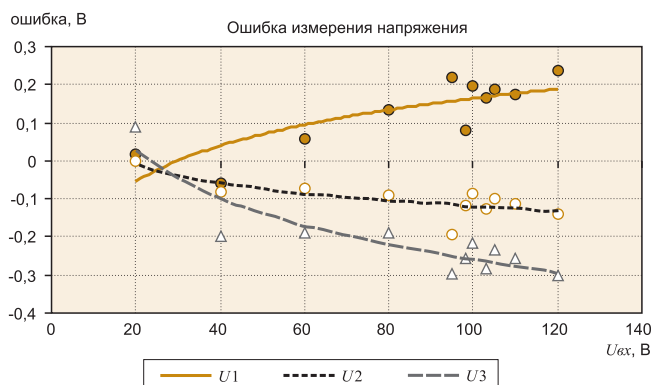


Рис. 5. Ошибки измерения напряжения, где $U1$, $U2$, $U3$ – ошибки измерения напряжения по трем каналам

Бумагин А.В. – канд. техн. наук, руководитель проекта, **Руткевич А.В.** – исполнительный директор, **Сахаров К.В.** – инженер-конструктор, **Шишкин Г.В.** – главный конструктор НПП "Цифровые решения", **Стешенко В.Б.** – канд. техн. наук, зам. начальника центра ФГУП "РНИИ КП".

Контактный телефон (495) 978-28-40.