

УДК 53.083.98; 621.317
PACS 06.20.-f, 07.50.Qx

Использование ключевого синхронного детектора в индукционном преобразователе расхода

А. В. Манцуров

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15
email: flexar@mail.ru

В работе описан принцип действия индукционного преобразователя расхода. Рассмотрены недостатки компенсационного метода, а также преимущества синхронного детектирования при фильтрации сигнала с электродов проточной части. Приведена математическая модель двухполупериодного синхронного детектора, в которой обоснована способность подавлять постоянную составляющую измеряемого сигнала. Постоянная составляющая представляет собой химический потенциал – не зависящая от величины магнитного поля добавка величиной от 0,1 до 200 мВ. В настоящее время синхронный детектор проходит испытания в лабораторных условиях.

Ключевые слова: индукционный преобразователь расхода; синхронный детектор; химический потенциал

Поступила в редакцию 27.03.2017; принята к опубликованию 05.05.2017

The application of synchronous detector in inductive flow transducer

A. V. Mantsurov

Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm
email: flexar@mail.ru

The operating principle of inductive flow transducer is described in the work. It is considered disadvantages of compensated method and advantages of synchronous detection for signal filtering from flow tube electrode. It is shown the mathematical model for the full-wave synchronous detector that proves the ability to suppress zero-frequency signal component, i.e. chemical potential. It is the additional voltage of 0.1 - 200 mV that is independence from the magnitude of magnetic field. The synchronous detector is being tested in laboratory conditions.

Keywords: inductive flow transducer; synchronous detector; chemical potential

Received 27.03.2017; accepted 05.05.2017

doi: 10.17072/1994-3598-2017-2-20-25

1. Введение

Преобразователь расхода жидкости вырабатывает сигнал, пропорциональный объёмному расхо-

ду. Одним из наиболее точных и рекомендуемых к применению в современных системах учёта потребления, например, водных ресурсов, является индукционный метод измерения [1]. Проточная

часть преобразователя представляет собой трубу круглого сечения из нержавеющей стали, футерованную слоем электроизоляционного материала (фторопластом). В диаметрально противоположных точках трубы расположены два электрода, герметично вмонтированные в стенки. Снаружи проточной части расположены катушки индуктора, формирующие магнитное поле в направлении, перпендикулярном оси расположения электродов и оси трубы [2].

Целью настоящей работы является расчёт, изготовление и проверка работоспособности синхронного детектора, позволяющего выделить полезный сигнал с электродов индукционного преобразователя расхода.

2. Принцип действия индукционных расходомеров

Принцип действия индукционных расходомеров основан на законе электромагнитной индукции Фарадея. Жидкость электропроводностью не меньше 5 мкСм/см при протекании по трубе является движущимся проводником. При включении магнитного поля, перпендикулярно потоку, между краями движущегося проводника возникает ЭДС индукции (электрическое напряжение), пропорциональная средней скорости потока. Это напряжение и представляет собой полезный сигнал, подлежащий измерению. В размерных единицах (СГС) сигнал примет вид

$$E = \frac{4}{c\pi} \frac{B_0}{D} Q, \quad Q = \iint_s V ds. \quad (1)$$

Отметим, что величина Q в (1) представляет собой расход жидкости, для измерения которого и предназначен расходомер. Таким образом, сигнал в ЭМР при однородном магнитном поле и осесимметричном течении в трубе круглого сечения пропорционален измеряемой величине независимо от вида радиального распределения вектора скорости потока как при турбулентном, так и при ламинарном потоке [3]. Следует иметь в виду, что в прово-

дящей жидкости между металлическими электродами возникает разность потенциалов, связанная с появлением электрохимического потенциала величиной порядка 0.1–200 мВ [4].

К одному из способов исключения постоянной составляющей при инфранизких частотах (<15 Гц) относится введение вспомогательного компенсационного напряжения постоянного тока [5]. Такой метод применяется в большинстве индукционных преобразователей расхода. В качестве устройства, создающего вспомогательное компенсационное напряжение, используется интегратор на операционном усилителе. В идеальном случае конденсатор должен зарядиться до необходимого уровня и сохранять это значение неизменным так долго, сколько производится один цикл измерения. Но на практике конденсатор может не успеть зарядиться до требуемого значения и не сможет полностью скомпенсировать помеху в виде постоянной составляющей. К тому же конденсатор не может сохранять уровень заряда постоянным, по крайней мере, достаточно долго. Выходом из данной ситуации может являться использование метода синхронного детектирования [6].

Приведём примерную функциональную схему измерительной части разрабатываемого устройства (рис. 1).

Схема работает следующим образом. Микроконтроллер, подавая управляющие сигналы на систему коммутации катушек, меняет направление магнитного поля катушек Гельмгольца L1L2, как показано на рис. 2.

На оси времени t рис. 2 отмечены моменты времени переключения направления магнитного поля (1ТВ, 2ТВ, 3ТВ,...), запоминания величины сигнала устройством выборки-хранения (1ТУВХ, 2ТУВХ, 3ТУВХ,...) и моменты переключения синхронного детектора (1ТСД, 2ТСД, 3ТСД,...).

При движении жидкости по проточной части П (рис. 1) на электродах формируется разность потенциалов, соответствующая ЭДС индукции проводника в магнитном поле. Резисторы R1 и R2 шунтируют вход предварительного инструментального дифференциального усилителя, чтобы



Рис. 1. Функциональная схема измерительной части

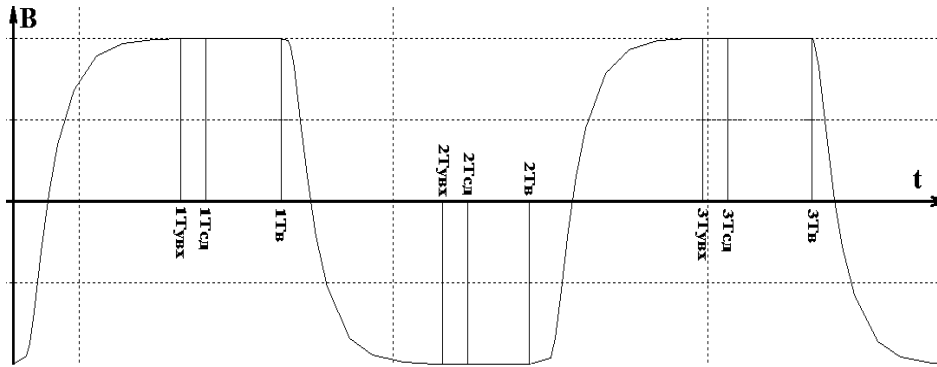


Рис. 2. Диаграмма изменения магнитного поля

при нулевой скорости жидкости прибор не фиксирует сигнал. Проводить измерения, т.е. измерять ЭДС индукции жидкости, можно только при максимальном постоянном однородном магнитном поле, которое устанавливается не сразу, а через определённый промежуток времени. По сигналу микроконтроллера устройство выборки-хранения запоминает измеряемый сигнал для последующей его обработки. Микроконтроллер также генерирует опорную частоту для синхронного детектора, основной задачей которого является фильтрация сигнала от постоянной составляющей (электрохимического потенциала). После синхронного детектирования сигнал ещё раз усиливается и оцифровывается аналогово-цифровым преобразователем (АЦП), встроенным в микроконтроллер.

Из-за различных тепловых условий активное сопротивление катушки может быть разным. Следовательно, максимальное поле катушки будет зависеть от температуры, и при одном и том же значении средней скорости потока жидкости величина индуцированной ЭДС будет неодинаковой. Решением этой проблемы является измерение тока катушки в момент насыщения. Это даёт возможность программно ввести корректирующие коэффициенты, обеспечивающие уменьшение зависимости от температуры.

Магнитное поле внутри расходомера неоднородно [5]. Для создания однородного магнитного поля в измерительном сечении индуктор должен иметь размеры, превосходящие диаметр трубы. Обычно катушки индуктивности, формирующие поле, не превосходят по размерам диаметра трубопровода и имеют внутри ферромагнитный сердечник. Такая конструкция и приводит к неоднородности магнитного поля. Многие производители расходомеров вынуждены считаться с нелинейностью и для линеаризации номинальной статической характеристики прибора использовать кусочно-линейную аппроксимацию [5].

Приведём схему синхронного детектора на операционном усилителе (рис. 3) [7].

Данный детектор работает следующим образом. Пусть при отрицательных входных сигналах

ключ К находится в разомкнутом положении, а при положительных – в замкнутом. В состоянии, когда ключ разомкнут и сопротивления R1, R2 и R3 равны между собой, система представляет собой инвертирующий усилитель с коэффициентом усиления равным -1 . Тогда входное отрицательное напряжение на выходе усилителя становится положительным. В замкнутом положении ключа устройство приобретает свойство повторителя – усилителя с коэффициентом усиления равным 1. В результате на выходе усилителя получаем двухполупериодно выпрямленный сигнал. Далее сигнал проходит через интегрирующую RC-цепочку (R4-C), сглаживающую пульсации выпрямленного напряжения.

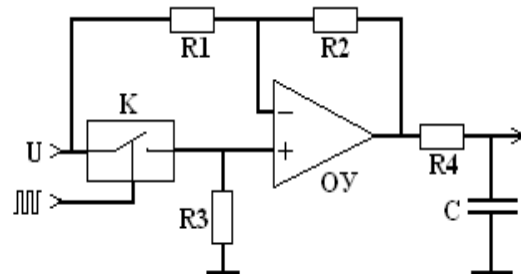


Рис. 3. Функциональная схема синхронного детектора на операционном усилителе

3. Математическая модель

Рассмотрим эквивалентную схему двухполупериодного релейного синхронного детектора, показанную на рис. 4 [6].

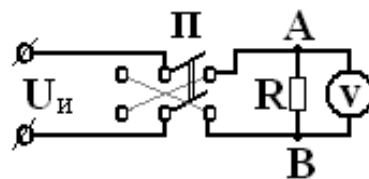


Рис. 4. Эквивалентная схема синхронного детектора

При замыкании ключа вправо проводимость цепи положительна:

$$Y_n = \frac{1}{R}. \quad (2)$$

При замыкании ключа влево проводимость цепи отрицательна:

$$Y_n = -\frac{1}{R}. \quad (3)$$

Тогда проводимость цепи будет изменяться во времени по закону:

$$y(t) = \frac{1}{R} \operatorname{sgn} \sin \omega t. \quad (4)$$

При разложении функции в ряд Фурье получим:

$$y(t) = \frac{4}{R\pi} \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k} \sin k\omega t. \quad (5)$$

Ток в цепи синхронного детектора при подаче на её вход напряжения $U(t)$:

$$I(t) = y(t)U(t). \quad (6)$$

Если

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \phi), \quad (7)$$

тогда

$$I(t) = \frac{2U_m}{R\pi} \cos \phi - \frac{2U_m}{R\pi} \cos(2\omega t + \phi) + \frac{4U_m}{R\pi} \sin(\omega t + \phi) \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k} \sin(k\omega t). \quad (8)$$

Рассмотрим одно из важных свойств СД. Предположим, что входной сигнал представлен в виде

$$U(t) = E + \sum_{i=1}^n U_{m,i} \sin(i\omega t + \phi_i), \quad (9)$$

где E – постоянная составляющая измеряемого напряжения. Тогда ток в цепи СД:

$$I(t) = \frac{4}{\pi} Y_m \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k} \sin(k\omega t) \left[E + \sum_{i=1}^n U_{m,i} \sin(i\omega t + \phi_i) \right]. \quad (10)$$

После раскрытия скобок в (10) получаем выражение для постоянного выходного тока:

$$I_{\text{пост}} = \frac{2}{R\pi} \sum_i \sum_k \frac{U_{m,i}}{k} \cos \phi_i, \quad i, k = 1, 3, 5, \dots \quad (11)$$

При аналогичном анализе однополупериодного СД:

$$I_{\text{пост}} = \frac{E}{2R} + \frac{1}{R\pi} \sum_i \sum_k \frac{U_{m,i}}{k} \cos \phi_i, \quad (12)$$

$$i, k = 1, 3, 5, \dots, n.$$

Очевидно, что двухполупериодный СД подавляет полностью помеху в виде постоянной составляющей в том случае, если закон изменения проводимости во времени симметричен и имеет вид (5).

После раскрытия скобок в (10) видно, что E создаёт дополнительные слагаемые выходного тока с частотами, равными синхронной частоте и её нечётным гармоникам:

$$I_E(t) = \frac{4}{\pi} Y_m E \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k} \sin(k\omega t). \quad (13)$$

При высоком уровне помех, т.е. при большом значении E , увеличиваются дополнительные слагаемые в $i_{\text{вых}}(t)$, тогда устанавливают инерционные RC-фильтры с соответственной постоянной времени. При увеличении постоянной времени фильтра увеличивается и продолжительность процесса измерения [6].

Из-за того, что измеряемый сигнал меняется медленно, постоянная времени инерционного RC-фильтра синхронного детектора может быть большой, порядка нескольких секунд.

4. Цифровой блок обработки

Для удобства разработки был изготовлен отладочный набор (рис. 5), представляющий собой двустороннюю плату, состоящий из микроконтроллера ATmega32, как основного элемента управления системой, USB-программатора и монтажной части, необходимой для подключения дополнительных элементов. Также на плате установлен чип-конвертер интерфейсов USB-USART для коммуникации микроконтроллера с компьютером. Изготовленный отладочный набор универсален для любых разработок с микроконтроллером такого же типа.

В своём составе микроконтроллер содержит набор восьми- и шестнадцатиразрядных таймеров-счётчиков, обеспечивающих своевременную подачу управляющих импульсов на устройство выборки-хранения, синхронный детектор и драйвер коммутации магнитного поля. Стоит отметить наличие десятиразрядного аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения на борту используемого микроконтроллера. Такая разрядность позволяет оцифровывать сигнал в диапазоне напряжений от 0 до 5В с шагом около 5мВ. Для увеличения эффективной разрядности микроконтроллер производит цифровую фильтрацию путём когерентного накопления сигнала.

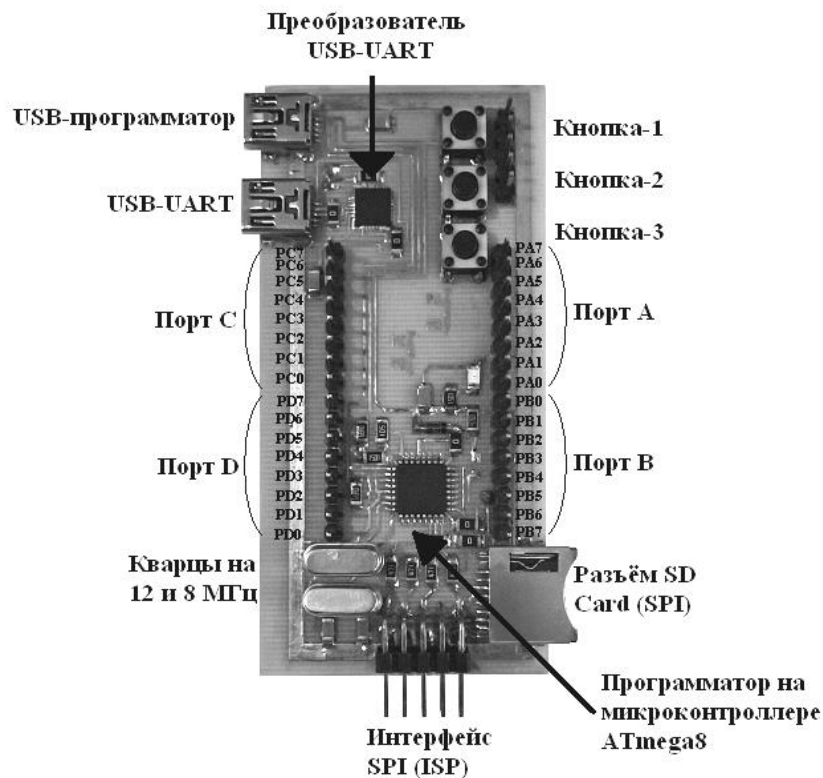


Рис. 5. Отладочный набор

5. Заключение

Изменение принципа работы измерительной части увеличивает точность и стабильность работы преобразователя расхода. На данный момент произведена настройка измерительной части и разрабатывается программное обеспечение, как для микроконтроллера индукционного преобразователя, так и для компьютера с целью коммуникации, настройки и поверки прибора.

Все работы по разработке выполняются на базе Федерального государственного унитарного предприятия ОКБ «Маяк», г. Пермь.

Список литературы

1. Мясников В. И. Измерения расхода и объема воды // Мир измерений. 2001. № 3–4. С. 4–9.
2. Ощепков А. Ю., Майстренко А. Д., Павлов В. С., Петров А. П. Моделирование сигналов электромагнитных расходомеров // Моделирование, теория, методы и средства: мат. VII между. науч.-практ. конф. Новочеркасск, 2007. Ч. 3. С. 41–42.
3. Ощепков А. Ю., Турунцев К. С. О парадоксах электромагнитных расходомеров // Экспозиция. Нефть, газ. 2015. № 1 (40). С.48–51.

4. Вельт И. Д. Методы и средства обеспечения электромагнитных расходомеров // Приборы и системы управления. 1995. №10. С.16–18.
5. Манцуров А. В., Ощепков А. Ю. Особенности работы и перспективы развития преобразователя расхода ПРИМ.// Энергоресурсосбережение. Диагностика-2016: мат. XVII между. науч.-практ. конф. 29–31 марта 2016 г. Димитровград: Мир печати, 2016. С. 151–155.
6. Дехтяренко П. И. Синхронное детектирование в измерительной технике и автоматике. Киев.: Техника, 1965. 313 с.
7. Петин Г. Ключевой синхронный детектор // Схемотехника. 2003. № 3. С 14–15.

References

1. Myasnikov V. I. Izmerenie rashoda i ob'yoma vody (The measurement of rate and water volume). *Mir izmerenii*. № 3-4. 2001. С. 4–9. (In Russian).
2. Oshepkov A. Yu., Maystrenko A. D., Pavlov V. S., Petrov A. P. Modelirovanie signalov elektromagnitnykh rashodomerov (Signal modeling of flow transducer). *Modelling, theory, method and facilities: Proc. of the VII-th Int. conf.*, Novochechassk, 2007, vol. 3, p. 41-42 (In Russian).
3. Oshepkov A. Yu., Turuntsev K. S. About paradoxes of electromagnetic flowmeters. *Expozitsiya nef' gaz*. 2015, no. 1 (40), pp. 48–51 (In Russian).

4. Velt I. D. Metody i sredstva metrologicheskogo obespecheniya elektromagnitnyh rashodomerov (Methods and facilities for providing electromagnetic flowmeters). *Instruments and systems: monitoring, control, and diagnostics*. 1995, no. 10, pp. 16–18 (In Russian).
5. Mantsurov A. V., Oshepkov A. Yu. Osobennosti raboty i perspektivy razvitiya preobrazovatelya rashoda PRIM (Specialties and perspectives of development of the flow transducer PRIM). *Energy saving. Diagnostics – 2016: Proc. of the XVII-th Int. conf.* Dimitrovgrad, 2016, pp. 151–155 (In Russian).
6. Dehtyarenko P. I. *Sinhronnoe detectirovanie v izmeritel'noy tekhnike i avtomatike* (The synchronous detection in techniques and automats). Kiev: Techniques, 1965. 313 p. (In Russian).
7. Petin G. Kluchevoy sinhronnyi detektor (Switching synchronous detector). *Schemotechnika*, 2003, no. 3, pp. 14–15 (In Russian).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Манцуров А. В. Использование ключевого синхронного детектора в индукционном преобразователе расхода // Вестник Пермского университета. Физика. 2017. № 2 (36). С. 20–25. doi: 10.17072/1994-3598-2017-2-20-25

Please cite this article in English as:

Mantsurov A. V. The application of synchronous detector in inductive flow transducer. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2017, no. 2 (36), pp. 20–25. doi: 10.17072/1994-3598-2017-2-20-25