

УДК 681.53

**Н. М. Олиферович, Д. А. Гринюк, И. О. Оробей**  
Белорусский государственный технологический университет

### **АНАЛОГОВО-ЦИФРОВОЙ АЛГОРИТМ ДЕТЕКТОРА ДИНАМИКИ ПРОПИТКИ С АДАПТАЦИЕЙ ПО КООРДИНАТЕ**

В статье рассмотрены вопросы повышения точности измерений детектора динамики пропитки. Для прибора предложены альтернативы замены конденсатора первичного преобразователя с полностью металлизированной поверхностью пластин на конструкцию с использованием геометрически неоднородного конденсатора, которая позволит обеспечить компенсацию изменения свойств фильтровальной бумаги при взаимодействии с водой (нивелировать паразитивные процессы гидратации).

Ввиду того, что простейшие варианты построения измерительного преобразователя параметра времени капиллярного впитывания на мультивибраторной и резонансной схемах показали неустойчивую работу из-за соотношения емкости и сопротивления схемы замещения в процессе динамики пропитки, а также из-за отсутствия возможности перенастраивать измерительный канал в процессе снятия показаний, предложено использовать схему с определением полного сопротивления на квадратурном демодуляторе. Для реализации измерительного преобразователя выбран микроконтроллер STM32F40. Возможными вариантами построения квадратурного демодулятора являются схема на аналоговом принципе и схема с использованием цифрового преобразования на Field-Programmable Gate Array матрице.

Проведенный анализ предложенных схем измерительного преобразователя выявил ряд проблем при выборе как аналогового, так и цифрового демодулятора. Необходимость проведения измерений в высокочастотном диапазоне существенно затрудняется наличием обязательной адаптивной регулировки коэффициента усиления.

**Ключевые слова:** капиллярное впитывание, неоднородный конденсатор, измерительный преобразователь, контроллер, квадратурный демодулятор.

**N. M. Oliferovich, D. A. Hryniuk, I. O. Orobei**  
Belarusian State Technological University

### **ANALOG-DIGITAL ALGORITHM OF THE DETECTOR OF SOAKING'S DYNAMICS WITH ADAPTATION REGARDING THE COORDINATE**

In the article the options to improve the precision of measurement detector's dynamics of soaking are considered. For the device we proposed the alternatives for replacing the capacitor of sensing device with completely metallized surface of the plate on the design using geometric patchy capacitor, which will provide the compensation of changes of the filter paper's properties in the interaction with water (to level spurious processes of hydration).

In view of the fact that the simplest modification variants of the transmitter of the time of parameter capillary soaking on multivibrator and single-tuned network showed unstable work because of a ratio of capacity and resistance of the equivalent circuit in the dynamics of the soaking, as well as due to the lack of opportunities to reconfigure the measurement channel in the process of readout, it is proposed to use the scheme with the definition of complete electrical impedance on the quadrature demodulator. To implement the transmitter microcontroller STM32F40 was selected. Possible options for constructing the quadrature demodulator is a scheme based on the analog principle and a scheme using digital conversion on Field-Programmable Gate Array matrix.

The analysis of the proposed transmitter schemes has revealed a number of problems both in the selection of the analog and the digital demodulator. The need for measurements in the high-frequency range becomes more difficult by the presence of binding adaptive gain control.

**Key words:** capillary soaking, patchy capacitor, measuring transducer, controller, quadrature demodulator.

**Введение.** Решение задач построения систем водоподготовки невозможно без информационного обеспечения. С этой целью строят развернутые системы, которые состоят из десятков датчиков на каждой стадии обработки. При поиске оптимальных режимов используют как информацию непре-

ривных датчиков, так и результаты периодического лабораторного анализа. Этот комплекс параметров вместе с наработками информационных систем позволяет находить оптимальный режим работы оборудования. Одним из параметров экспресс-контроля является время капиллярного впитывания [1].

Результаты измерений [2] динамики пропитки показали, что в используемой бумаге могут наблюдаться паразитивные процессы гидратации, которые, в свою очередь, способны исказить результаты даже точного измерения величин емкости и полученные путем пересчета значений координат.

**Основная часть.** Одним из решений по компенсации изменения свойств бумаги при взаимодействии с водой может быть использование геометрически неоднородного конденсатора, который способен по резким изменениям скорости идентифицировать координату. Применение различных критериев нестационарности трендов является одним из методов идентификации. На рис. 1 приведено несколько вариантов геометрии неоднородного конденсатора, где белые полосы соответствуют слою металлизации, а черные – его отсутствию. Кольца могут отличаться размерами как линейно с различной толщиной полос без металлизации (рис. 1, а–б), так и по нелинейному закону, обратному динамике пропитки. На рис. 1, в радиусы колец имеют квадратичную зависимость, поскольку экспериментальные данные [3] и поиск аналитического решения уравнения динамики имеют корневую зависимость.

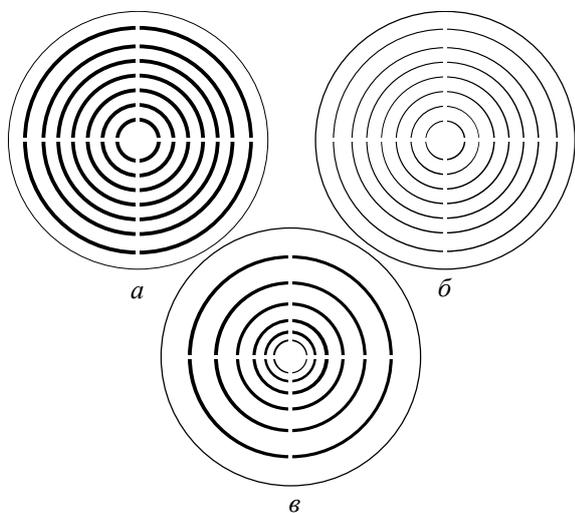


Рис. 1. Различные решения по построению геометрически неоднородного конденсатора

Уравнение динамики круговой пропитки имеет вид [2]

$$\ddot{x} = -a_0 \dot{x} - \frac{\dot{x}^2}{x} + \frac{1}{x} a_1 + a_2 - a_3 x, \quad (1)$$

где

$$a_0 = \frac{8\eta}{\rho r^2}; \quad a_1 = \frac{2\Delta\sigma}{r\rho} + \frac{g}{2\pi} \left( z_0 - h\gamma \frac{R_0^2}{R^2} \right);$$

$$a_2 = \frac{2\Delta\sigma}{r\rho R_0} - \frac{h\gamma g R_0}{\pi R^2}; \quad a_3 = \frac{h\gamma g}{2\pi R^2};$$

$\eta$  – динамическая вязкость;  $\rho$  – плотность жидкости;  $r$  – радиус капилляров;  $\Delta\sigma$  – разность межфазных натяжений твердое тело – газ и твердое тело – жидкость;  $g$  – ускорение свободного падения;  $z_0$  – начальное значение уровня впитывания в кювете;  $h$  – толщина тестовой или тестируемой бумаги;  $\gamma$  – пористость;  $R$  – радиус кюветы;  $R_0$  – начальный радиус пропитки.

При анализе решений с хорошим приближением решением уравнения (1) может быть функция

$$x(t) = \sqrt{\frac{2a_1}{a_0} \left( \frac{a_2 \sqrt{2}}{\sqrt{a_0 a_1}} f(t) + t + \frac{\exp(-a_0 t) - 1}{a_0} \right)}, \quad (2)$$

где  $f(t)$  – решение уравнения системы уравнений

$$\begin{cases} f(t)'' + a_0 f(t)' + \frac{a_3 \sqrt{2a_1 a_0}}{a_2} \frac{a_0 g(t)}{g(t)^{-1} \sqrt{g(t)}} - \frac{a_0 g(t)}{\sqrt{g(t)}} = 0; \\ g(t) \neq \frac{a_2 \sqrt{2}}{\sqrt{a_0 a_1}} f(t) + t + \frac{\exp(-a_0 t) - 1}{a_0}. \end{cases} \quad (3)$$

Толщина как металлизированных, так и неметаллизированных полос зависит от неоднородности пропитки и точности измерения емкости конденсатора во время пропитки и может быть точно подобрана в процессе отладки прибора.

Наиболее простые варианты построения измерительного преобразователя параметра времени капиллярного впитывания на мульти-вibratorной и резонансной схемах показали неустойчивую работу из-за изменения соотношения емкости и сопротивления схемы замещения в процессе динамики пропитки. Дальнейшие исследования по получению схемы замещения (рис. 2, 3) позволили определить, что желательные значения частот измерительного преобразователя находятся в диапазоне от  $10^5$  Гц и выше. Кроме того, измерительная схема должна быть способна перенастраивать измерительный канал ввиду падения полного сопротивления с начала измерения от нескольких мегаом до сотен ом.

С учетом полученных выводов гарантированным вариантом является использование принципа построения измерительного преобразователя с определением полного сопротивления на квадратурном демодуляторе [4]. Адаптивная схема преобразователя должна быть построена на достаточно быстродействующем и мощном микроконтроллере. С учетом данного

требования выбран STM32F407 [5]. Его особенностью является наличие встроенных аналогово-цифровых (ADC) и цифроаналоговых преобразователей (DAC) и работа на частоте 168 МГц.

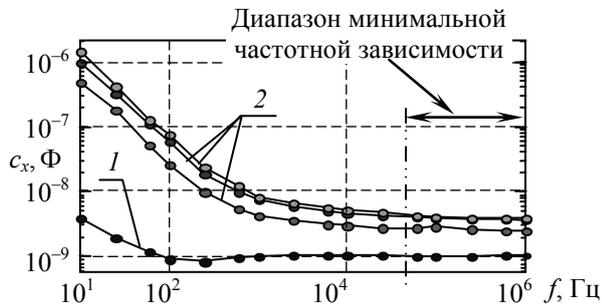


Рис. 2. Зависимость емкости  $c_x$  от частоты  $f$  для сухой (1) и смоченной (2) бумаги

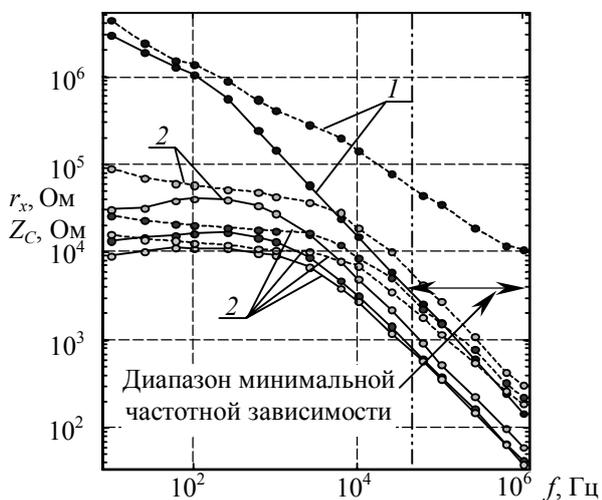


Рис. 3. Зависимости  $r_x$  (---) и  $Z_C$  (—) от частоты для сухой (1) и смоченной (2) бумаги

Квадратурный демодулятор можно построить на аналоговом принципе (рис. 4), используя цифровые преобразования на Field-Programmable Gate Array (FPGA) матрице (рис. 5) или быстрое преобразование Фурье непосредственно в микроконтроллере.

Предлагаемые в литературе решения предусматривают формирование контроллером тестового сигнала с преобразованием его в источник тока, измерение напряжения исследуемого участка цепи, преобразование его величины с помощью ADC в цифровую форму и дальнейшее осуществление быстрого преобразования Фурье. Однако для нашего случая препятствием для построения измерителя на таком принципе является требование высокой частоты, на которой необходимо производить измерения. И, несмотря на высокую частоту процессора 168 МГц, нет гарантий реализации преобразователя, поскольку контроллер должен обраба-

тывать одновременно сигналы с ADC и формировать сигнал через DAC на первичный преобразователь, осуществлять перенастройку усилительных схем и выполнять быстрое преобразование Фурье. По предварительным расчетам рабочую частоту измерения не удастся поднять до 150 кГц.

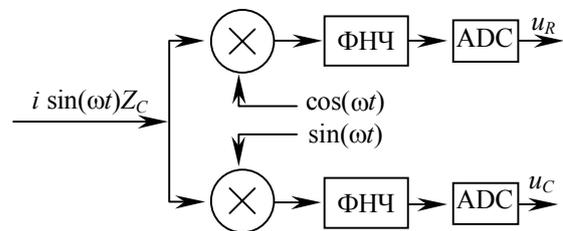


Рис. 4. Общая структура аналогового квадратурного демодулятора: ФНЧ – фильтр низких частот

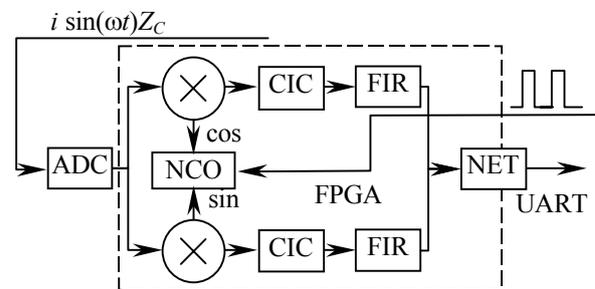


Рис. 5. Общая структура цифрового квадратурного демодулятора на FPGA: CIC (cascaded integrator-comb) и FIR (finite impulse response) – компоненты программирования для создания фильтров; NCO (numerically controlled oscillators) – цифровой управляемый генератор

Источник сигнала и приемник работают в рамках одной микросхемы, и их не получится развязать, что будет приводить к наводке на входы ADC периодической помехи. Спектр помехи будет иметь множество дискретных спектральных составляющих (шпор, spurs), которые будут возвышаться над «пьедесталом» полезного спектра. Для устранения данного недостатка первичную информацию с АЦП необходимо рандомизировать. В этом случае увеличится отношение сигнал/шум, но импульсная помеха «размазывается» по спектру. Встроенные в контроллер АЦП не имеют механизма рандомизации. Обычно таким механизмом можно воспользоваться только при наличии внешних параллельных АЦП.

При построении измерительных преобразователей следует не забывать о шуме квантования. При подаче на вход АЦП одной синусоиды шум будет иметь явно выраженную периодичность, что приведет к появлению в спектре тех же шпор. Поскольку разрабатываемая схема имеет данную особенность, то желательно предусмотреть

в схеме механизм подмешивания аналогового широкополосного шума. Это позволит декоррелировать шум квантования.

Узким местом является и быстродействие встроенных ADC и DAC. Их характеристики не позволят поднять сигнал измерения выше 500 кГц.

Использование преобразования по схеме рис. 4 в аналоговом виде тоже не является идеальным вариантом. Несмотря на возможность использования для формирования функций  $\cos$  и  $\sin$  двух встроенных DAC, абсолютную идентичность получить невозможно по причине того, что формируются сигналы от 0 до 3,6 В и возникает необходимость убирать постоянную составляющую сигналов с применением схем на основе аналоговых элементов и конденсаторов. Аналогично не существует идеальных операционных усилителей. Будет присутствовать разница в амплитудах и отличие в фазе  $90^\circ$ . Можно добавить неидентичность аналоговых перемножителей, амплитудно-частотной и фазовой характеристик аналоговых фильтров на выходе перемножителей. Все это будет приводить к появлению зеркальных частот в спектре сигнала на выходе. Однако следует учесть, что в нашем случае нас интересуют не абсолютные значения результатов измерений, а непосредственно зависимость параметра от времени, что нивелирует некоторые из вышеперечисленных недостатков аналогового решения.

При использовании FPGA матрицы возможны практически те же проблемы, что и при применении встроенных ADC и DAC, которые были рассмотрены ранее. Для реализации метода придется использовать внешнее ADC и FPGA матрицу, что значительно удорожает построение измерительной схемы. К матрице FPGA предъявляются достаточно высокие требования, так как в этом случае возникает необходимость в большом количестве структурных перемножителей для реализации фильтров FIR.

Анализ уже снятых переходных процессов [3] позволяет говорить, что фильтры ФНЧ с постоянной времени 0,01–0,02 с не будут вносить существенных искажений в динамику снимаемых кривых.

Аналоговая часть преобразования от DAC до ADC независимо от выбранной схемы квад-

ратурного демодулятора должна предусматривать адаптивную схему регулирования уровня сигналов в зависимости от изменения сопротивления первичного преобразователя. В качестве основного элемента для этого может выступать инструментальный усилитель, коэффициент которого программируется дискретно тремя цифровыми входами. Поскольку полоса пропускания усилителя в зависимости от коэффициента сужается, для измерителя возможно использовать усиление сигнала только на 10, а в некоторых случаях на 100. При коэффициенте 100 полоса усиления сужается до 514 кГц. Исходя из диапазона изменяющегося сопротивления первичного преобразователя, на частоте 1 МГц потребуется четыре каскада усиления, на 500 кГц можно обойтись двумя. Поскольку в начале измерений сопротивление максимально, то коэффициенты должны быть минимальны. После старта пропитки необходимо постоянно просчитывать в контроллере общую амплитуду напряжения, которое формируется на измерительных клеммах, и по мере падения напряжения производить дискретно увеличение общего коэффициента усиления. Непосредственно на измерительные клеммы следует формировать сигнал источника тока и лучше всего на высокочастотном усилителе.

С помощью аналоговых решений на операционных усилителях решается преобразование однополярного выхода с выходов DAC в двухполярный сигнал без постоянной составляющей на измерительные клеммы и на перемножители.

**Заключение.** Использование пространственно неоднородного преобразователя позволяет производить коррекцию результатов измерения динамики пропитки. Предложенные и проанализированные схемы преобразователя сопряжены с рядом проблем при выборе как аналогового, так и цифрового демодулятора. Необходимость проведения измерений в высокочастотном диапазоне существенно затрудняется наличием обязательной адаптивной регулировки коэффициента усиления на несколько порядков в аналоговой части схемы. Наиболее рациональным выбором может быть построение измерительной схемы на частотах, близких к 500 кГц.

### Литература

1. CST Equipment [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tritonel.com/> (дата обращения: 25.01.2015).
2. Олиферович Н. М., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Анализ динамических характеристик и динамических погрешностей преобразователя измерения параметров впитывания // Труды БГТУ. 2014. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 96–99.
3. Богослав Н. М., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Экспериментальное исследование динамики круговой пропитки // Труды БГТУ. 2013. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 99–103.

4. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. В 2 т. Т. 2. М.: Мир, 1983. 256 с.
5. STMicroelectronics [Электронный ресурс]. URL: <http://www.st.com/web/en/home.html> (дата обращения: 24.01.2015).

### References

1. CST Equipment. Available at: <http://www.tritonel.com> (accessed 25.01.2015).
2. Oliferovich N. M., Hryniuk D. A., Orobei I. O. Analysis of dynamic characteristics and dynamic errors of transducer measurement parameters. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 6: Physical-mathematical sciences and informatics, pp. 96–99 (In Russian).
3. Bogoslav N. M., Hryniuk D. A., Orobei I. O. Experimental research of the dynamics of circular impregnation. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 6: Physical-mathematical sciences and informatics, pp. 99–103 (In Russian).
4. Maks Zh. *Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniyakh* [Methods and signal processing techniques and applications to physical measurements]. Moscow, Mir Publ., 1983. 256 p.
5. STMicroelectronics. Available at: <http://www.st.com/web/en/home.html> (accessed 24.01.2015).

### Информация об авторах

**Олиферович Надежда Михайловна** – ассистент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: bogosnadya@rambler.ru

**Гринюк Дмитрий Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hryniuk@tut.by

**Оробей Игорь Олегович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: orobei@tut.by

### Information about the authors

**Oliferovich Nadezhda Mihaylovna** – assistant, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bogosnadya@rambler.ru

**Hryniuk Dmitry Anatolyevich** – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniuk@tut.by

**Orobei Igor Olegovich** – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: orobei@tut.by

Поступила 02.03.2015