

В.И. Корсун, А.Е. Квятковский, Н.В. Глухова

## АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ УРОФЛОУМЕТРИИ

*Аннотация.* Рассматриваются вопросы цифровой фильтрации данных, полученных при медицинских исследованиях с целью диагностики нарушений уродинамики. Приведены результаты автоматизированной классификации урофлоуметрических кривых с экспериментальным подтверждением ее достоверности.

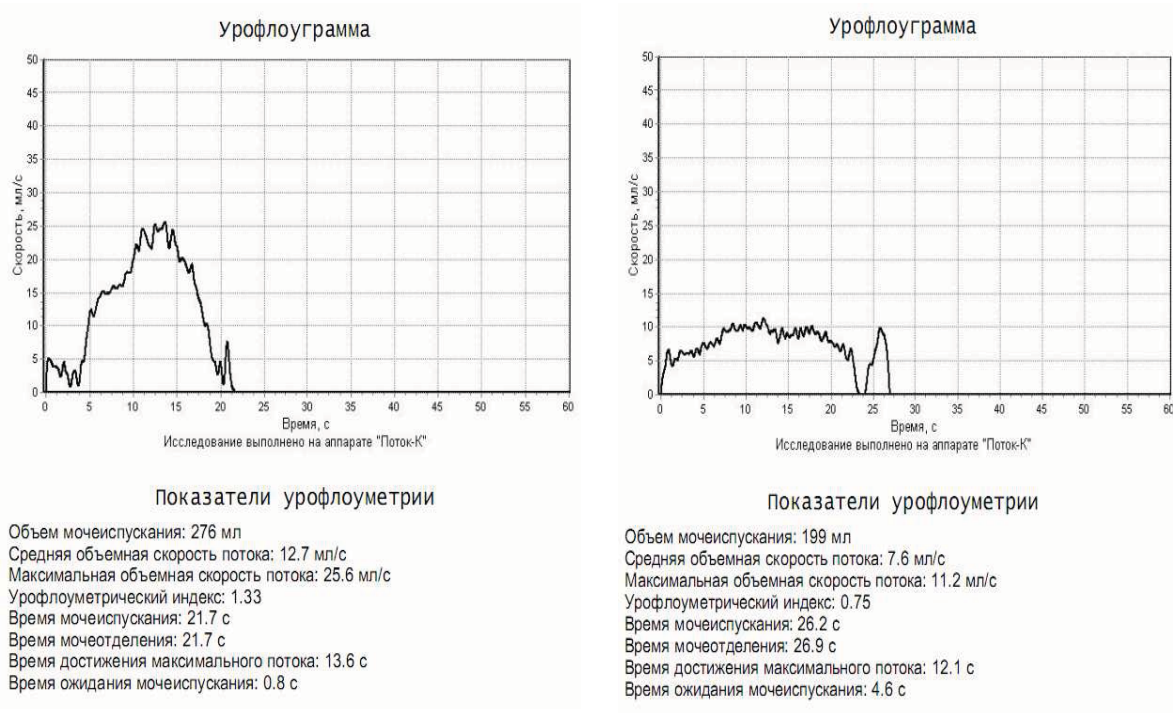
*Ключевые слова:* цифровой фильтр, урофолуметрия, нечеткая логика, графическое программирование.

**Введение.** Урофлоуметрия – неинвазивный метод диагностики патологических состояний нижних мочевых путей, который заключается в измерении скорости потока мочи посредством определения выделенного объема мочи в единицу времени. Прибор для урофлоуметрических исследований представляет собой весы, при помощи которых косвенным образом получают информацию об объеме выделенной мочи [1, 2]. Современные аппараты для урофлоуметрии (например, «Поток-К») обеспечивают возможность ввода в компьютер изменения объема накопленной жидкости в процессе лабораторного исследования и автоматическое вычисление числовых значений таких интегральных показателей: средняя объемная скорость потока мочи (мл/с); максимальная объемная скорость потока (мл/с); время мочеиспускания (с); объем мочеиспускания (мл) и др.

Медицинская диагностика нарушений уродинамики основана на анализе числовых значений интегральных показателей и локальных особенностей графической зависимости объемной скорости от времени (рис. 1).

**Постановка проблемы.** На характер урофлоуметрической кривой могут оказывать значительное влияние субъективные факторы – волнение пациента, непривычная обстановка, поэтому, рекомендуют провести 2-3 исследования для исключения случайных воздействий. Кроме того, урофлоуметрические исследования проводят несколько

раз в течение курса лечения пациента для контроля результатов и корректировки выбранной схемы лечения. Таким образом, медицинский персонал сталкивается с необходимостью обработки большого количества не только числовых, но и графических данных. Существует необходимость разработки компьютерных программ для проведения урофлоуметрии при массовых скрининговых исследованиях с целью автоматического получения предварительного заключения. В связи с этим, актуальной является задача разработки автоматизированных программных средств анализа результатов урофлоуметрии. Исходными данными служат оцифрованные результаты изменения объема выделенной мочи (мл) от времени (рис. 2).



а)

б)

Рисунок 1 – Урофлоуграммы и интегральные показатели урофлоуметрии, полученные на аппарате «Поток-К»

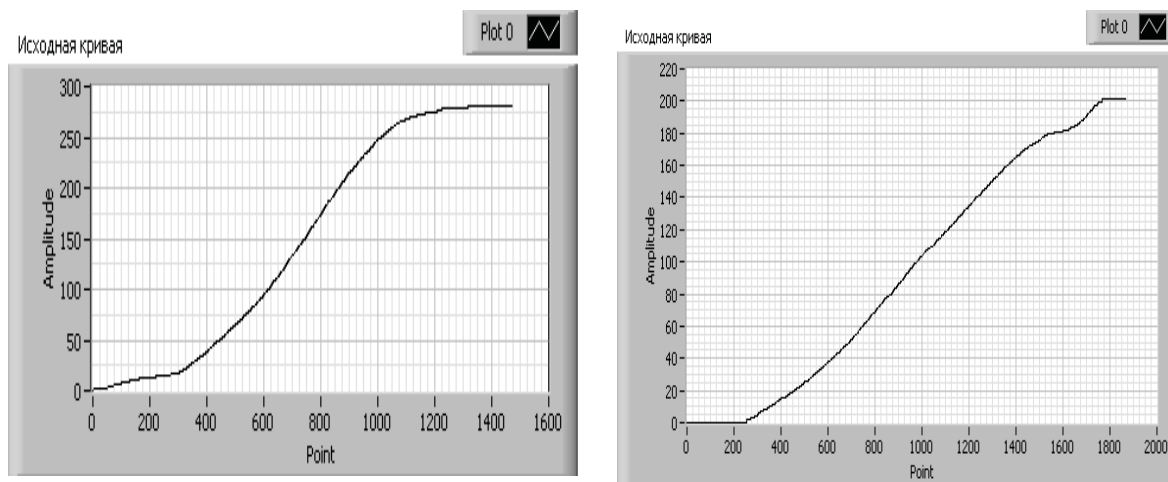


Рисунок 2 – Графики изменения объема выделенной мочи, полученные путем прямой регистрации на аппарате «Поток-К»

Следует отметить, что графики, показанные на рис. 1 и 2, получены в ходе одних и тех же исследований. Рис. 1а представляет собой график нормального типа кривой, отражающий зависимость объемной скорости (мл/с) от времени, рис. 2а – результаты того же исследования, для которого построена зависимость накапливаемого объема (мл) от времени. На рис. 1б и 2б показаны аналогичные кривые для обструктивного типа кривой, которая соответствует определенной патологии. Простое визуальное сравнение показывает, что графики рис. 1 информативнее и в лучшей степени демонстрируют локальные особенности кривых.

Поэтому при программной обработке результатов урофлоуметрии, когда в качестве исходных данных выступают оцифрованные точки кумулятивной кривой (рис. 2), ставится задача получить более информативное представление о сигнале, понятное медику и пригодное для программного выделения характерных признаков.

Отметим, что исходная кривая может быть классифицирована как нестационарный сигнал, имеющий высокочастотные составляющие, и последние не должны быть потеряны в ходе преобразований, а наоборот выделены и усилены, поскольку служат источником диагностики определенных патологических состояний.

**Результаты работы.** Для решения поставленной задачи воспользуемся средствами цифровой фильтрации сигналов среды графического программирования LabView [3, 4]. Далее совершим переход из области медицины в область цифровой обработки данных и рас-

смотрим классический пример фильтрации сигнала «синусоида с шумом».

На рис. 3 показаны 4 группы графиков, каждая из которых содержит:

- 1) график исходного сигнала (синусоида с шумом);
- 2) исходный сигнал после обработки фильтром нижних частот;
- 3) разницу между исходным и отфильтрованными сигналами.

Анализ графиков показывает, что фильтры Баттерворта и Чебышева 1-го рода обеспечивают примерно одинаковое качество фильтрации: на графике разницы исходного сигнала и сигнала после фильтра нижних частот наблюдается только высокочастотный шум с математическим ожиданием, равным нулю.

На графиках обработки сигнала эллиптическим фильтром (фильтром Кауэра) и инверсным фильтром Чебышева кроме шума присутствует еще некоторая регулярная составляющая. Необходимо отметить, что с задачей освобождения периодического синусоидального сигнала от высокочастотных составляющих инверсный фильтр Чебышева справился лучше всего.

Рассмотрим основные характеристики фильтров Чебышева и эллиптического [5]. Функция передачи фильтра Чебышева 1-го рода не имеет нулей, полюсы расположены в левой половине эллипса на  $s$ -плоскости. АЧХ фильтра описывается таким выражением:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}}$$

где  $\omega_0$  – частота среза,  $T_n(x)$  – полином Чебышева  $n$ -го порядка,  $n$  – порядок фильтра,  $\varepsilon$  – параметр, который определяет величину пульсаций АЧХ в полосе пропускания.

АЧХ в полосе пропускания колеблется между значениями  $1/\sqrt{1+\varepsilon^2}$  и 1, за пределами полосы пропускания монотонно затухает до нуля.

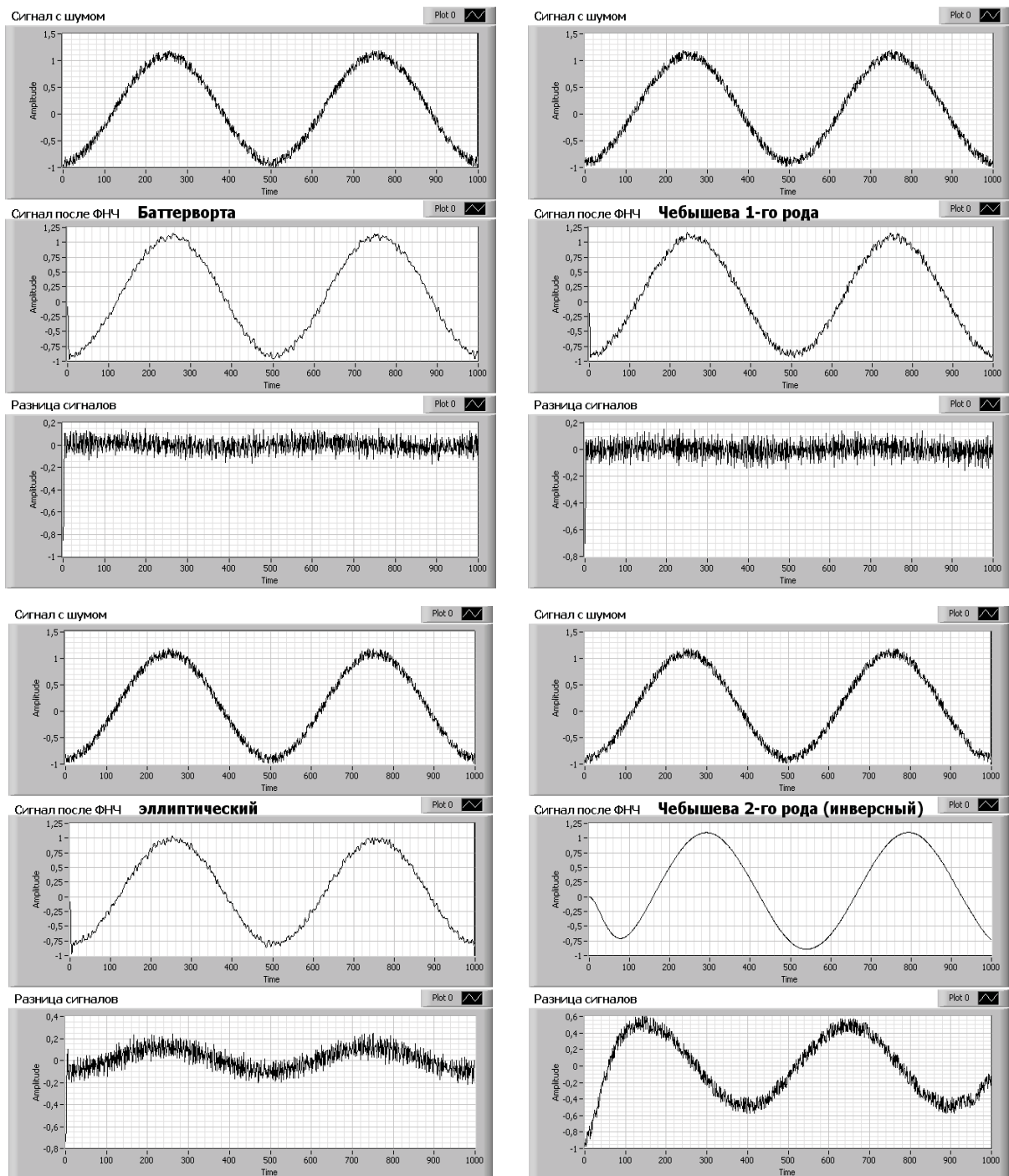


Рисунок 3 – Результаты применения фильтров нижних частот

Фильтр Чебышева 2-го рода (инверсный) имеет для функции передачи и нули, и полюсы. Его функция передачи связана с функцией передачи фильтра Чебышева 1-го рода следующей зависимостью:

$$H_2(s) = 1 - H_1\left(\frac{1}{s}\right),$$

где  $H_1(s)$  и  $H_2(s)$  – соответственно функции передачи для фильтров Чебышева 1- и 2-го рода. Инверсным данный тип фильтра называется

потому, что полюсы его функции передачи связаны с полюсами фильтра Чебышева 1-го рода таким соотношением:

$$p_{2i} = \frac{1}{p_{1i}},$$

где  $p_{1i}$  и  $p_{2i}$  – соответственно полюсы функции передачи фильтров Чебышева 1-го и 2-го рода.

АЧХ инверсного фильтра описывается выражением:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\varepsilon^2}{T_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}}}$$

Особенностью инверсного фильтра является то, что АЧХ в полосе пропускания монотонно затухает, а в полосе задерживания колеблется между нулем и значением  $1/\sqrt{1+\varepsilon^2}$ . При  $\omega=0$  АЧХ инверсного фильтра является максимально плоской.

Эллиптический фильтр определенным образом объединяет свойства фильтров Чебышева. Для АЧХ эллиптического фильтра характерны пульсации и в полосе пропускания, и в полосе задерживания. Благодаря этому обеспечивается максимально возможная крутизна ската АЧХ. Функция передачи имеет и полюсы, и нули. АЧХ эллиптического фильтра описывается выражением:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 R_n^2\left(\frac{\omega}{\omega_n}, L\right)}}$$

где  $R_n(\dots)$  – рациональная функция Чебышева  $n$ -го порядка,  $\varepsilon$  и  $L$  – параметры, определяющие величину пульсаций в полосах пропускания и задерживания.

Рассмотрим причины появления регулярной составляющей на графиках разности сигналов в последних двух случаях. Из теории проектирования фильтров известно, что для эллиптического и инверсного фильтров характерно запаздывание. То есть, при изменении входного сигнала фильтра происходит более медленное изменение выходного сигнала по сравнению с фильтрами других типов. Когда же по точкам вычисляется разница между исходным и отфильтрованным сигналами, то появление регулярной составляющей обуславливается именно запаздыванием.

Прежде, чем вернуться к обработке данных урофлоуметрии, сделаем следующие выводы:

1. Инверсный фильтр Чебышева обеспечивает наилучшую фильтрацию (в данном случае – сглаживание) исходного сигнала по сравнению с другими рассмотренными видами фильтров. В результате, при вычитании из исходного сигнала сглаженной кривой происходит минимальная потеря и искажение высокочастотных составляющих.

2. Инверсный фильтр Чебышева также характеризуется максимальным временем запаздывания выходного сигнала по отношению к входному. Причем, чем выше скорость изменения входного сигнала, тем в большей мере проявляется запаздывание.

Применим такую же схему обработки сигнала для кумулятивных кривых рис. 2. Файл с оцифрованными данными изменения объема (мл) используем в качестве исходных данных. Налицевую панель (интерфейс пользователя) выведен график исходной кривой; сигнал после фильтра нижних частот (инверсный Чебышева 2-го порядка) и график, на котором показаны результаты вычитания по точкам сглаженной кривой из исходной. Результаты применения данного алгоритма для клинических случаев, показанных на рис. 1 и 2, представлены на рис. 4.

Полученные таким образом зависимости служат в качестве исходных данных для проведения автоматизированной компьютерной диагностики нарушений уродинамики нижних мочевых путей. Для полученной разницы сигналов строится спектр мощности, вычисляется сумма коэффициентов разложения в спектр мощности.

Как показывают исследования, последний параметр является информативным признаком для разделения урофлоуграм на характерные типы.

На первом этапе «грубой диагностики» разработанное программное обеспечение выполняет нечеткое (*fuzzy*) разделение урофлоуграм на три типа: «норма», «патология», «отклонения от нормы». Последний случай требует проведения дальнейших исследований (либо повторение урофлоуметрии, либо проведение других исследований).

Анализ двух нижних кривых рис. 4 показывает, что они по форме соответствуют графикам изменения объемной скорости от времени, показанных на рис. 1. Кроме качественного воспроизведения формы сигнала, в них выделены характерные высокочастотные со-

ставляющие. Следует отметить, что применение других типов фильтров приводит к получению преимущественно высокочастотных составляющих (высокочастотный шум с математическим ожиданием, равным нулю). При этом полностью утрачивается информация о форме кривой.

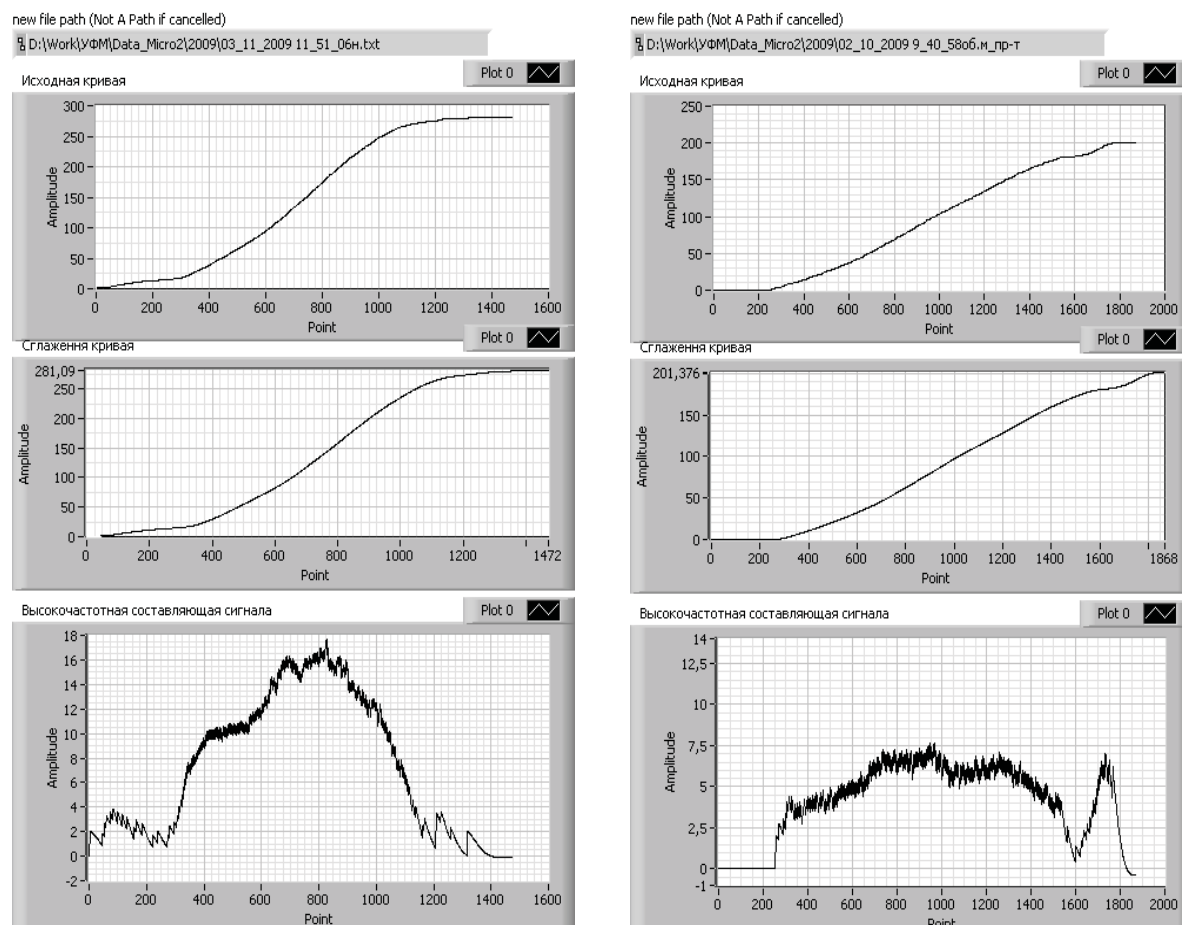


Рисунок 4 – Результаты обработки данных урофлоуметрии с использованием инверсного фильтра Чебышева

В случае использования фильтра Чебышева 2-го рода происходит запаздывание выходного сигнала фильтра по отношению к входному. Причем, как было отмечено выше, чем быстрее изменяется сигнал на входе фильтра, тем в большей мере проявляется запаздывание. В результате, путем регистрации в разнице сигналов величины запаздывания, происходит переход от наблюдения объема (мл) к косвенному измерению объемной скорости (мл/с).

На втором этапе выполняется классификация урофлоуграмм на шесть типов кривых, соответствующих определенным патологическим состояниям. На этом этапе кроме интегральных показателей используется анализ локальных особенностей, присущих шести типам



кривых. Учитываются такие характерные признаки кривых как максимальная амплитуда, координата достижения максимального значения и др. Блок-диаграмма прикладной программы показана на рис. 5.

Эффективность разработанного метода программной классификации уро-флоуграмм доказана экспериментально на выборке данных, накопленной в ходе клинических исследований. Результаты показателей достоверности сведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели достоверности программной классификации по типам кривых

Общее количество анализируемых кривых	84	100%
Правильная классификация	63	75%
Ошибочная классификация	6	7%
Необходимость повторных исследований	15	18%

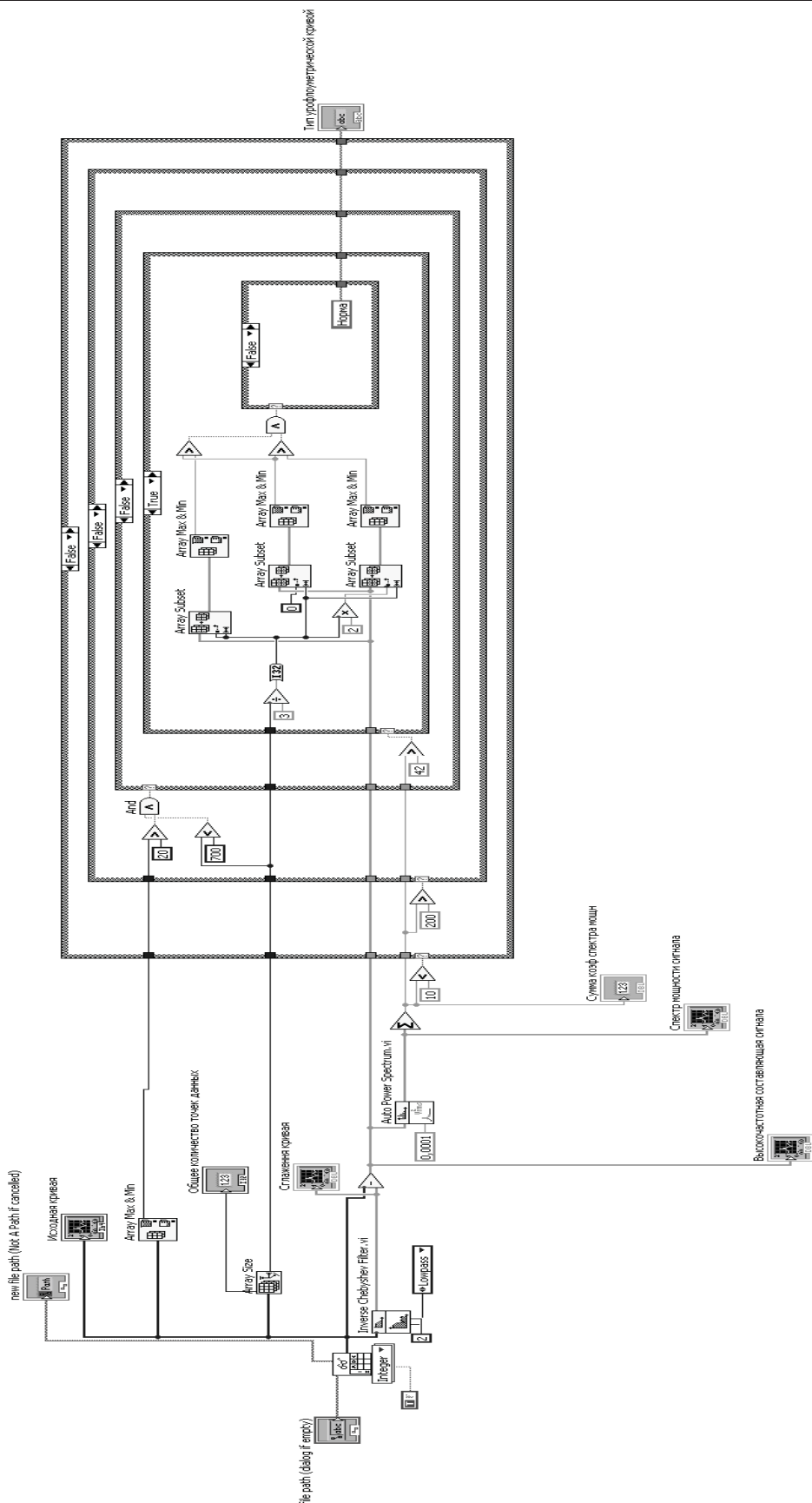


Рисунок 5 - Блок-диаграмма прикладной программы для классификации урфлограмм по шести типам кривых

**Выводы.** Применение цифровой фильтрации на основе использования фильтра Чебышева 2-го рода позволяет выполнять восстановление формы и выделение локальных особенностей урофлоуметрических кривых. Благодаря этому достигается высокий уровень показателей достоверности программной классификации по типам кривых.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Урофлоуметрия [Текст] / Е.Л. Вишневецкий, Д.Ю. Пушкарь, О.Б. Лоран и др. – М.: Печатный Город, 2004. – 220 с.
2. Квятковский, А.Е. Первый опыт использования отечественного урофлоуметра для определения нарушений уродинамики нижних мочевых путей [Текст] / А.Е. Квятковский, Е.А. Квятковский, Т.А. Квятковская // Здоровье мужчины. – 2009. – № 3. – С. 157-158.
3. Кехтарнаваз, Н. Цифровая обработка сигналов на системном уровне с использованием LabView [Текст] / Н. Кехтарнаваз, Н. Ким / Пер. с англ. – М.: Изд. Дом «Додэка-XXI», 2007. – 304 с.
4. Глухова, Н.В. Моделювання та експериментальне дослідження характеристик вимірювальних каналів з використанням віртуальних стендів [Текст] / Н.В. Глухова, І.В. Коваленко, М.А. Дороніна // Системи обробки інформації. – 2011. – №6(96). – С. 84-87.
5. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А.Б.Сергиенко. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.