



УДК 621.317.799 + 004.421

А. В. Ваганов

АО «Концерн „Океанприбор“»

## Автоматизированная система контроля токсичности биологических жидких дисперсных сред на основе динамически программируемого аналогового сигнального процессора

*Рассмотрен вопрос создания автоматизированной системы контроля токсичности жидких дисперсных биосред на основе тест-реакции «гибель инфузорий», предназначенной для исследования эндотоксикоза. Предложен вариант реализации системы, в которой предварительную обработку сигнала от оптоэлектронного измерительного преобразователя и выделение информативной составляющей токсичности исследуемой биосреды осуществляет динамически программируемый аналоговый сигнальный процессор, а выделение соответствующего информативного параметра и анализ уровня токсичности среды реализованы на программируемом микроконтроллере. Такое решение позволяет обеспечить универсальность, простоту в настройке и обслуживании, а также интегрируемость в исследовательские комплексы. Разработаны структурная схема системы и алгоритм ее работы. Получена обобщенная математическая модель тракта предварительной обработки сигнала. Приведены результаты моделирования системы, подтверждающие ее способность выделять информативный параметр токсичности жидких биосред.*

### Автоматизированная система контроля токсичности, биологические жидкие дисперсные среды, динамически программируемый аналоговый сигнальный процессор, моделирование

За последние годы для диагностической медицины разработано множество методик и устройств, позволяющих заметно повысить точность и сократить время обследования пациентов. Основными направлениями в данной области медицины являются лабораторные исследования, где в качестве контролируемых объектов выступают различные биологические жидкие дисперсные среды (БЖДС): кровь, моча, ликвор и т. п. Именно в них содержатся вещества, позволяющие медикам определить те или иные патологии в организме.

К одной из разновидностей подобных патологий можно отнести эндотоксикоз – заболевание, обладающее обширной этиологией, но однозначно негативно сказывающееся на здоровье пациента.

К настоящему времени множество работ посвящено исследованию данного заболевания, в которых созданы различные методики его диагностики [1], [2], которым, тем не менее, присущи определенные недостатки: трудоемкость, дороговизна, большие временные затраты, а главное – узкая специфичность, не позволяющая оценить общую степень вредности для организма.

Решение данной проблемы наметилось с переходом на использование в качестве чувствительного элемента миниатюрных живых организмов, по результатам тест-реакции которых можно давать интерпретацию степени содержания вредных веществ в исследуемой пробе. В качестве таких организмов широко выступают относительно безвредные простейшие – инфузории.

К настоящему моменту известно достаточно методов применения инфузорий для контроля биологических сред, в том числе крови в виде ее сыворотки. Однако данные методики оказываются преимущественно неавтоматизированными – ручными. Отсутствие специализированной исследовательской аппаратуры объясняется сложностью объекта измерения, расположенного в среде, обладающей повышенными вязкостью и мутностью.

В настоящей статье рассматривается вопрос создания автоматизированной системы контроля токсичности (АСКТ) сыворотки крови с применением инфузорий, которая служит развитием метода контроля токсичности водных сред, рассматриваемого в [3]. В основу системы положен оптоэлектронный

оптический измерительный преобразователь (ИП), описанный в [4]. АСКТ должна обеспечивать обработку сигнала, поступающего от ИП, для последующего выделения и интерпретации информативного параметра токсичности БЖДС.

Требования к современной диагностической аппаратуре медицинского назначения – это компактность, универсальность, а также минимизация стоимости. Общемировые тенденции определяют построение аппаратуры как системы на кристалле (СНК или SoC). Исходя из этого построение АСКТ предложено осуществить в виде аналогоцифровой системы, в которой предварительная обработка сигнала, поступающего от ИП, для выделения из него информативной составляющей токсичности БЖДС осуществляется с помощью динамически программируемого аналогового сигнального процессора (dpASP) фирмы Anadigm, относящегося к классу программируемых аналоговых интегральных схем (ПАИС) – систем на переключаемых конденсаторах.

В отличие от цифровых схем сигнал в ПАИС не имеет квантования по уровню, что минимизирует его искажения при обработке и восстановлении по выборкам. По сравнению же с дискретными аналоговыми устройствами ПАИС обладают очень высокой временной и температурной стабильностью, а также универсальностью [5]. Программирование dpASP осуществляется с помощью специализированной программы Anadigm Designer, которая также позволяет производить предварительное моделирование построенных схем с целью их отладки.

Оценка информативной составляющей сигнала от ИП для выделения соответствующего параметра токсичности БЖДС осуществляется с помощью алгоритма, реализованного на базе микроконтроллера (МК) или программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС).

В известном аналоге («Биотестер-2М»), предназначенном для контроля токсичности водных сред, в ходе исследования измеряется объемная концентрация ( $C_{V_{и}}$ ) подвижных инфузорий в верхнем слое кюветы при неизменных значениях интервала пробега ( $l_{и}$ ) и частоты смены направления ( $f_{и}$ ) перемещения простейших. В отличие от аналога описываемая система должна определять момент прекращения двигательной активности простейших ( $l_{и} \rightarrow 0, f_{и} \rightarrow 0$ ) при неизменной

их объемной концентрации в исследуемом объеме. При этом выделение информативной составляющей сигнала, поступающего от ИП, осложняется тем, что его амплитуда уменьшается и становится практически не различимой на фоне сигнала помехи ( $U_c \rightarrow U_{п}$ ), возникающего от перемещения в исследуемом объеме частиц БЖДС и погибших (неподвижных) инфузорий, а исходная полоса частот полезного сигнала ( $\Delta f_c = 0.1 \dots 10$  Гц), приведенная в работе [3], сужается и стремится к своей нижней границе. При этом значение частоты сигнала помехи полагается  $f_{п} \leq 1$  Гц.

С учетом вышесказанного реализацию АСКТ в целом следует выполнить в виде импульсного фотометра-турбидиметра, а тракта предварительной обработки – на основе непараметрических методов обнаружения сигналов, применяемых в гидроакустике и радиолокации [6]. При этом задача обнаружения сигнала формулируется как проверка гипотез, заключающихся в сравнении распределений сигнально-шумовой и шумовой выборок наблюдений  $H_0: F_{с.-ш} = F_{ш}$  (сигнал отсутствует),  $H_1: F_{с.-ш} > F_{ш}$  (сигнал присутствует).

Структурная схема АСКТ представлена на рис. 1, где 1 – источник излучения (ИИ), стробируемый сигналом  $U_{стр}$  с помощью ключа  $S$ ; 2 – термостатируемая кювета; 3 – фотоприемный усилитель (ФПУ); 4 – формирователь огибающей сигнала (ФО) с постоянной времени  $\tau_{ФО}$ , определяемой встроенным фильтром низких частот порядка  $n_{ФО}$ ; 5 – череспериодный вычитатель (ЧВ) с постоянной времени задержки  $\tau_{ЧВ}$ ; 6 – усилитель (У); 7 – двухполупериодный выпрямитель (ДВ); 8 – накопитель (Н); 9 – пороговое устройство (ПУ); 10 – устройство стабилизации (УС) постоянной составляющей на выходе ФПУ с усилением  $G_{УС}$  и постоянной времени  $\tau_{УС}$ , определяемой внутренним фильтром низких частот порядка  $n_{УС}$ ; 11 – термостат; 12 – микроконтроллер или ПЛИС; 13 – светодиодный индикатор уровня токсичности.

Тактирование АСКТ осуществляется от встроенного в dpASP задающего генератора (ЗГ). Такое решение позволяет использовать простые и сравнительно недорогие ПЛИСы или PIC-контроллеры. Сигнал  $U_{МК}$  предназначен для тактирования микроконтроллера, а  $U_{\phi}$  – для синхронизации считывания ФО импульсов, поступающих от ИИ.

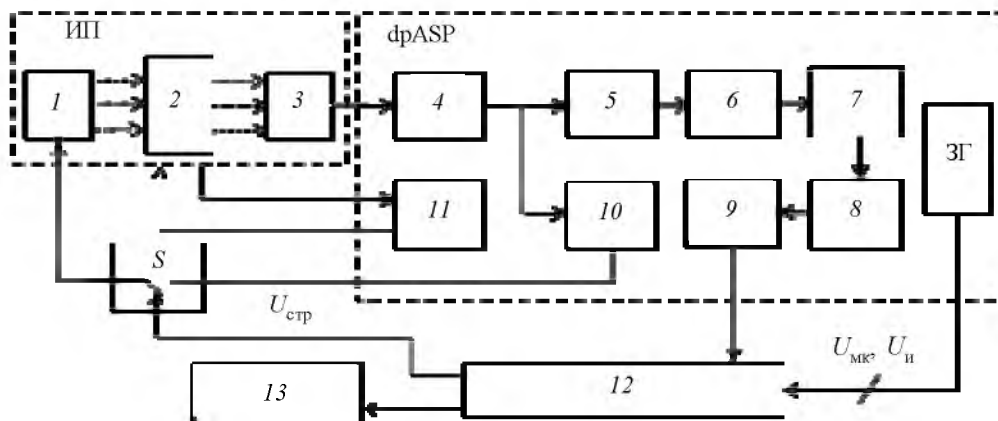


Рис. 1

Блоки ФО, ЧП и У формируют огибающую, обеспечивают необходимую полосу пропускания тракта предварительной обработки, а также выделяют информативную составляющую сигнала:

$$U_{и.с} = (C_{ИИ} K(l_{и}, f_{и}, p_{и}) U_{и} + U_{п}) \times K_{ФО}(f_c) K_{ЧП}(f_c) K_{У}, \quad (1)$$

где  $C_{ИИ}$  – объемная концентрация инфузорий в исследуемой пробе;  $K(l_{и}, f_{и}, p_{и})$  – коэффициент преобразования ИП, учитывающий начальный пробег и частоту смены направления инфузорий, а также вероятность пересечения ими поверхности  $S_{кон}$  контролируемого объема ИП;  $U_{и}$  – амплитуда сигнала на выходе ИП от пересечения  $S_{кон}$  одной инфузорией;  $U_{п}$  – амплитуда сигнала помехи;  $K_{ФО}(f_c) K_{ЧП}(f_c) K_{У}$  – соответствующие коэффициенты передачи ФО, ЧП и У.

Сигнал с амплитудой  $U_{и.с}$  после прохождения ДВ поступает на Н, где происходит увеличение его значения до величины  $U_{и.с.Н}$  и повышение соотношения сигнал-шум на входе ПУ, реализующего совместно с МК алгоритм выделения информативного параметра токсичности БЖДС – измерение времени, прошедшего от начала эксперимента до наступления условия

$$U_{и.с.Н}(t) \leq U_{LE100}, \quad (2)$$

где  $U_{LE100}$  – пороговое напряжение, соответствующее полной остановке (гибели) всех инфузорий в пробе.

Величину  $U_{LE100}$  следует подбирать эмпирически, используя специальные тестовые растворы, имитирующие токсичность исследуемых БЖДС.

Алгоритм управления МК показан на рис. 2.

Таймер  $T0$  отсчитывает общее время исследования (ежеминутный инкремент регистра  $R$ ). Результатом работы таймера  $T1$  и подпрограммы обслуживания его прерываний является формирование сигнала  $U_{стр}$  требуемой длительности и скважности. Константа «с» служит для периодического перевода основного алгоритма в цикл ожидания прерывания от  $T1$ .

В случае отсутствия информативного сигнала от ИП более 1 мин (таймер  $T2$ ) выполняется условный переход к подпрограмме № 1 для сравнения значения регистра  $R$  с интервалами:  $R < 5$  (остро токсично),  $5 < R < 10$  (токсично),  $10 < R < 15$  (слабо токсично),  $15 < R < 20$  (не токсично). Если информативный сигнал на выходе ИП присутствует, но  $R = 20$ , то осуществляется выполнение подпрограммы № 2: останов работы всех таймеров и включение светодиода «не токсично».

В предположении, что частота тактирования внутренних элементов дрASP на два порядка превышает верхнюю частоту полезного сигнала от ИП математическая модель тракта предварительной обработки сигнала с учетом контура УС может быть представлена выражением

$$G_{п.о}(s) = \frac{G_{ИП} G_{ФО}(s)}{1 + G_{ИП} G_{ФО}(s) G_{УС}(s)} G_{ЧВ}(s) G_{У}, \quad (3)$$

где  $G_{ИП}$ ,  $G_{ФО}(s)$ ,  $G_{УС}(s)$ ,  $G_{ЧВ}(s)$ ,  $G_{У}$  – передаточные функции ИП, ФО, УС, ЧВ, У соответственно.

Результат моделирования устойчивости контура УС с помощью годографа Найквиста для следующих параметров контура УС:  $\tau_{ФО} = 8 \cdot 10^{-3}$  и  $n_{ФО} = 4$ ;  $\tau_{УС} = 1.6$  и  $n_{УС} = 2$ ;  $G_{УС} = 20$  дБ представлен на рис. 3.

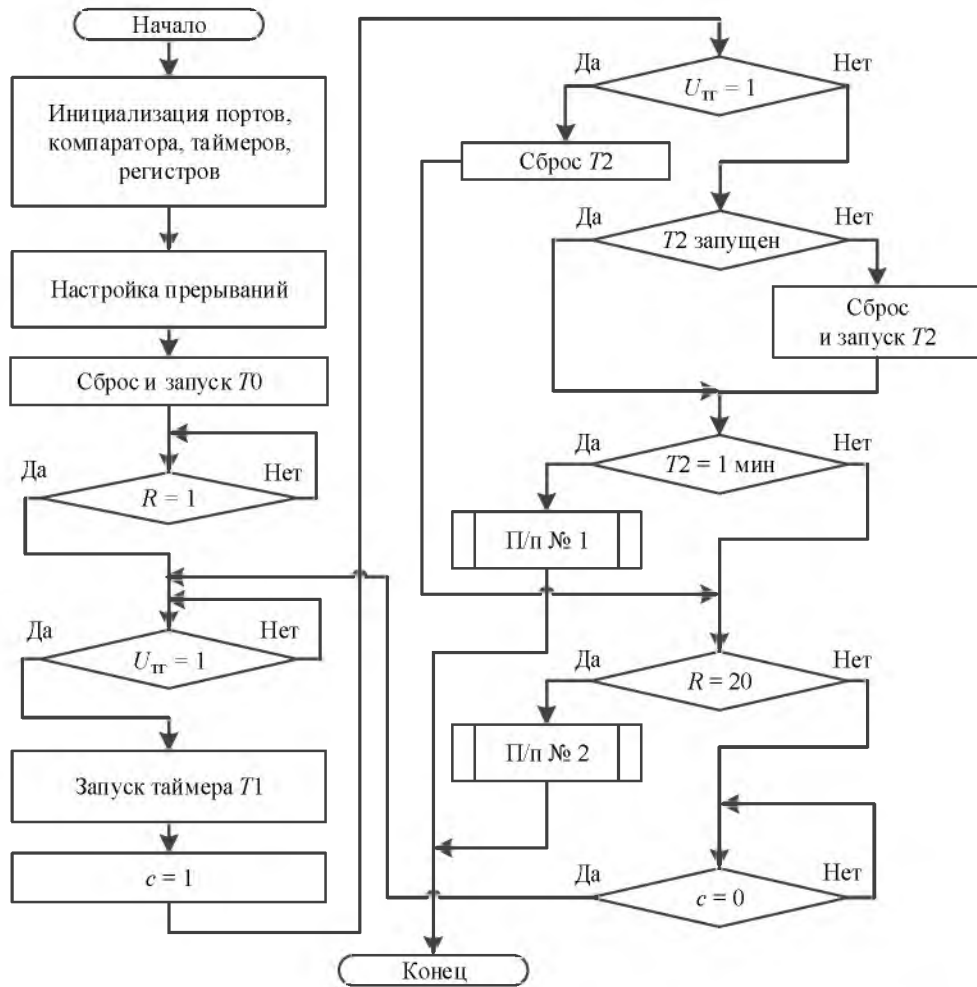


Рис. 2

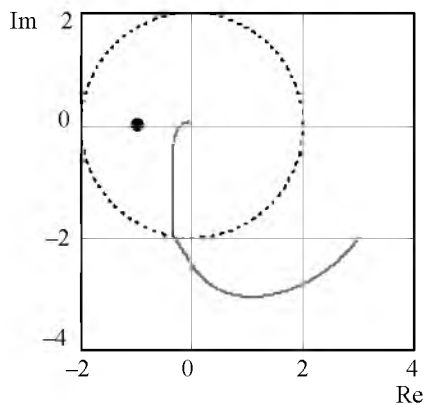


Рис. 3

Как следует из рис. 3, годограф, обходя против часовой стрелки начало координат, не охватывает точку со значением  $(-1; 0)$ , что подтверждает устойчивость контура УС и системы в целом.

В среде графического программирования Anadigm Designer была разработана программа для создания тракта предварительной обработки сигнала АСКТ на базе dpASP. Фрагмент данной программы, описывающий блоки Н и ПУ, показан на рис. 4.

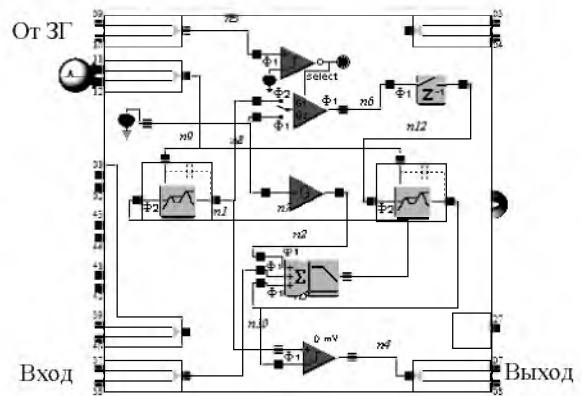


Рис. 4

Результаты моделирования прохождения сигнала через блоки тракта предварительной обработки сигнала и проверка гипотез  $H_0$  и  $H_1$  приведены на рис. 5 и 6 соответственно. Как следует из рис. 5, при достаточной подвижности клеток инфузорий в пробе ПУ выдает сигнал высокого логического уровня, что соответствует гипотезе  $H_1$ .

Если подвижность инфузорий в пробе окажется ниже пороговой и соблюдается условие (3), то по окончании переходного процесса в УС АСКТ

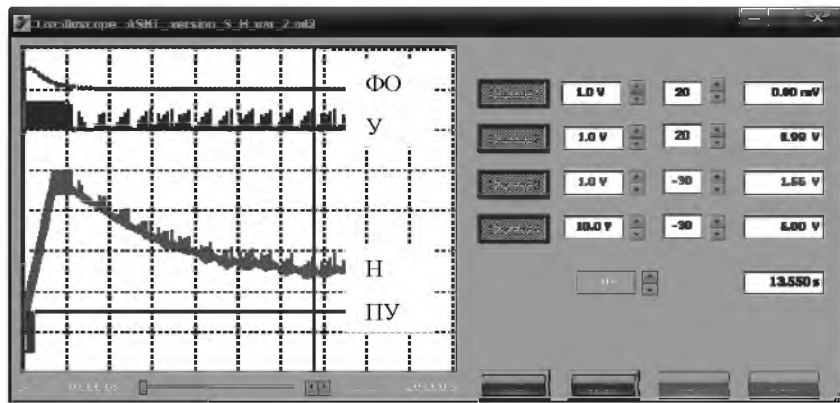


Рис. 5

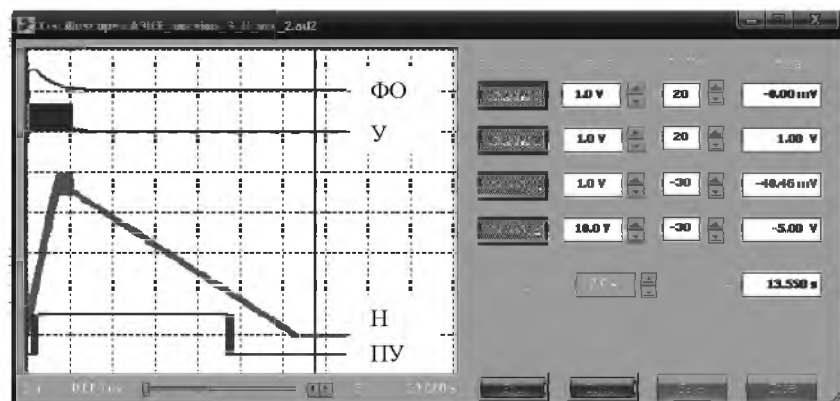


Рис. 6

сигнал на выходе ПУ принимает значение низкого логического уровня (рис. 6), что соответствует гипотезе  $H_0$ . Таким образом, подтверждается способность АСКТ надежно выделять и отслеживать информативный параметр токсичности БЖДС.

Разработанная система позволяет автоматизировать процесс определения степени эндотоксикоза на основе известных ручных методик контроля токсичности сыворотки и плазмы крови, повышая достоверность постановки диагноза и количество обследуемых пациентов, а также может стать основой для разработки аналогичных неинвазивных методик.

Благодаря специальной конструкции ИП достигается минимизация исследуемого биоматериала (десятые доли миллилитра) при сохранении необходимой чувствительности датчика к тест-реакции инфузорий и статистической достоверности исследования. Наличие автоматической динамической системы стабилизации мощности ИИ позволяет значительно расширить диапазон применимости АСКТ к широкой группе жидких дисперсных сред с различными значениями их оптической плотности.

Реализация АСКТ на современном аппаратно-программном уровне позволяет обеспечить необходимые эксплуатационные характеристики системы: универсальность, мобильность, простота в настройке и обслуживании. Так, применение ПАИС, допускающих динамическое программирование непосредственно в ходе работы, позволяет оперативно изменять параметры тракта предварительной обработки сигнала АСКТ, обеспечивая адаптацию системы как под различные виды тест-организмов, так и под различные жидкие дисперсные среды. Применение микроконтроллера позволяет автоматизировать процесс выделения информативного параметра токсичности среды и последующего его интерпретирования, исключая вероятность ошибки со стороны обслуживающего персонала.

Рассматриваемая система может реализовываться в виде автономного устройства или быть интегрирована в некий исследовательский комплекс. Внедрение результатов данной разработки позволит заметно повысить возможности исследования эндотоксикоза в лабораториях медицинских учреждений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возможности уменьшения токсического поражения миокарда при эндотоксикозе / Т. И. Власова, Н. Ю. Лещанкина, А. П. Власов, Э. И. Полозова,

Н. А. Власова, О. А. Ежова // *Фундаментальные исследования*. 2012. № 5–2. С. 261–265.

2. Показатели эндотоксикоза в крови крыс с лимфосаркомой Плисса при введении наночастиц железа / И. А. Горошинская, П. С. Качесова, В. Б. Бородулин, Л. А. Немашкалова, О. Э. Лосев, А. В. Чудилова // Успехи современного естествознания. 2015. № 9–2. С. 303–307.

3. Захаров И. С. Метод и аппаратура для измерений концентраций инфузорий в медико-экологических исследованиях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.17. СПб., 1996. 16 с.

4. Ваганов А. В. Моделирование опто-электронного измерительного преобразователя для исследования токсичности биологических жидких дисперсных сред // V Междунар. науч. конгресс «Нейробиотелеком-2012», 2012. С. 200–203.

5. Щерба А. А. Программируемые аналоговые схемы Anadigm. Проекты, примеры применения // Компоненты и технологии. 2012. № 12. С. 140–143.

6. Радиолокационные системы: учеб. / В. П. Бердышев, Е. Н. Гарин, А. Н. Фомин и др.; под общ. ред. В. П. Бердышева; разработ.: Центр обучающих систем ИНТК СФУ. М.: Инфра-М, 2017.

A. V. Vaganov

JSC «Concern "Oceanpribor"»

## AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR TOXICITY OF BIOLOGICAL LIQUID DISPERSE MEDIA ON THE BASIS OF A DYNAMICALLY PROGRAMMABLE ANALOG SIGNAL PROCESSOR

*The issue of creating an automated system for monitoring the toxicity of liquid disperse biomass based on the test-reaction «death of infusorians», intended for the study of endotoxiosis, is considered. The variant of realization of the system in which the preprocessing of the signal from the optoelectronic measuring transducer and the isolation of the informative component of the toxicity of the investigated biomedium is implemented by the dynamically programmable analog signal processor, and the allocation of the corresponding informative parameter and the analysis of the level of the toxicity of the medium is realized on the programmable microcontroller. Such a solution allows us to provide universality, simplicity in tuning and maintenance, and also integrability in research complexes. The structural scheme of the system and the algorithm of its operation are developed. A generalized mathematical model of the signal preprocessing path is obtained. The results of modeling the system, confirming its ability to isolate an informative parameter of toxicity of liquid bio-media, are given.*

**Automated control system for toxicity, biological liquid disperse media, dynamically programmable analog signal processor, modeling**

УДК 502.35

А. В. Храмов, А. А. Ермолаев, А. И. Шалашова, Л. В. Контрош  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Возможности экологического мониторинга с применением БПЛА в России

*Беспилотные летательные аппараты гражданского назначения (БПЛА) в России все шире применяются практике во многих отраслях промышленности и строительства. Однако их применение для решения экологических задач ограничивается достаточно высокой стоимостью эксплуатации и чаще всего связано с чрезвычайными ситуациями (лесные пожары, наводнения, загрязнения территорий нефтепродуктами и др.). Между тем, БПЛА незаменимы для контроля за экологической ситуацией на территории страны. Представляется возможным использовать для оценки экологической ситуации данные, полученные с помощью БПЛА при выполнении других задач: контроль состояния ВЛЭП, топографическая съемка, строительство автомобильных и железнодорожных магистралей и т. д. В настоящее время эти данные зачастую даже не сохраняются.*

**Беспилотные летательные аппараты, «эко-дроны», экологический мониторинг, дистанционное наблюдение**

Богатство России в разнообразии природно-климатических зон и ландшафтов. По оценкам ООН, только площадь леса в России составляет

8.5 млн км<sup>2</sup> (851 млн га). Природные ландшафты – это не только огромное богатство, но и большая ответственность перед будущими поко-