

**Solomencev Kirill Yurievich**

E-mail: sol\_kir@mail.ru.

Phone: +79085118931.

The Department of Automation and Telemechanics; Cand. of Eng. Sc.; Associate Professor.

УДК 681.883

**И.И. Маркович, Ю.В. Душенин, В.С. Жирнов, П.П. Семеняк, Д.В. Ковальчук**

### **ЛОКАТОР ПРЕПЯТСТВИЙ ГЛУБОКОВОДНОГО НОСИТЕЛЯ**

*Предложен к рассмотрению локатор препятствий, предназначенный для освещения подводной обстановки по ходу движения глубоководного носителя. Локатор формирует в частотной области статический веер лучей в приеме в вертикальной плоскости. Определен круг задач, решаемый с его помощью в ходе эксплуатации. Представлены основные параметры и структурная схема локатора. Описан принцип его работы. Изложены алгоритмы первичной и вторичной цифровой обработки сигналов, предложенные в ходе разработки локатора препятствий.*

*Локатор препятствий; глубоководный носитель; статический веер; характеристика направленности; цифровая пространственно-временная обработка сигналов.*

**I.I. Markovich, YU.V. Dushenin, V.S. Zhirnov, P.P. Semenyak, D.V. Koval'chuk**

### **OBSTACLE AVOIDANCE SONAR FOR DEEP-WATER CARRIER**

*Obstacle avoidance sonar for underwater imaging along the deep-sea carrier displacement direction is provided. The sonar generates vertical static fan pattern in the receiving mode of frequency domain. Basic tasks, solved with the sonar are discussed. Block diagram of the system and its basic features are presented. Principles of system operation are described. Primary and secondary algorithms of digital signal processing in the receiving channel of the developed system are stated.*

*Obstacle avoidance sonar; deep-water carrier; static fan pattern; beam pattern; digital space-time signal processing.*

Обеспечение возможности получения качественного отображения подводной обстановки в реальном масштабе времени и предупреждение столкновений с подводными препятствиями глубоководных аппаратов и комплексов невозможно без их оснащения современной гидроакустической аппаратурой.

В данной работе предложен локатор препятствий (ЛП), проработка возможности реализации которого проводится в НКБ цифровой обработки сигналов ЮФУ. Его создание связано с необходимостью освещения подводной обстановки по ходу движения глубоководных носителей. В основе принципов работы ЛП изначально закладывается формирование и излучение простых и сложных зондирующих сигналов (ЗС) цифровыми методами, а также формирование статического веера характеристик направленности (ХН) в приемном тракте с последующей цифровой пространственно-временной обработкой с целью повышения эффективности распознавания крупных придонных объектов.

В процессе эксплуатации перед ЛП ставятся следующие задачи:

- ◆ оперативный обзор подводной обстановки по ходу движения носителя в заданном секторе;
- ◆ обнаружение препятствий, размеры которых являются значительными, потенциально опасными для навигации;
- ◆ выдача предупреждения об опасности оператору.

В связи с этим ЛП должен обладать необходимыми дальностью обнаружения и сектором обзора для совершения маневра при обнаружении впереди расположенных препятствий в широком диапазоне эксплуатационных глубин и различных гидрографических условиях.

Основные параметры предлагаемого к реализации ЛП следующие:

- ◆ дальность обнаружения по ходу движения глубоководного носителя – до 200 м;
- ◆ разрешающая способность по дальности – 0,15–0,3 м;
- ◆ сектор обзора в горизонтальной плоскости – 12°;
- ◆ сектор обзора в вертикальной плоскости – 60°;
- ◆ количество лучей статического веера приемной антенны – 24;
- ◆ ширина ХН приемной антенны в вертикальной плоскости по уровню – 3 дБ, по давлению – 2,5°;
- ◆ центральная частота зондирующих сигналов (ЗС) – 150–200 кГц;
- ◆ вид ЗС – тональный или ЛЧМ-импульс;
- ◆ полоса пропускания приемного тракта – до 10 % от центральной частоты.

Интерфейс канала связи с системным компьютером, расположенным на рабочем месте оператора на судне-носителе, – Ethernet.

Условия эксплуатации:

- ◆ скорость глубоководного носителя – от 0,5 до 5,0 узлов;
- ◆ волнение моря – до 4 баллов включительно;
- ◆ глубина погружения ЛП на носителе – от 20 до 6000 м;
- ◆ температура окружающей среды – от –3 до +35°С;
- ◆ соленость воды – до 37 ‰.

Кроме того, для учета влияния дестабилизирующих факторов на погрешности определения впереди расположенных препятствий, ЛП должен поддерживать связь с датчиками измерения параметров качки и измерителем скорости звука в воде.

В состав ЛП должны входить:

- ◆ антенный блок (АБ), расположенный на подводном носителе, включающий в себя излучающую (ИА) и приемную (ПА) акустические антенны;
- ◆ блок электроники (БЭ), так же расположенный на подводном носителе;
- ◆ системный компьютер (СК), расположенный на корабле-носителе;
- ◆ линии связи, обеспечивающие обмен БЭ с навигационными датчиками и системой измерения звука в воде, а также с СК по интерфейсу Ethernet.

БЭ может включать в себя следующие устройства:

- ◆ модуль формирования и усиления сигналов (ФУС);
- ◆ модуль предварительного усиления и цифровой обработки сигналов (ПУЦОС);
- ◆ модуль обмена, контроля и обработки (ОКО);
- ◆ модуль вторичных источников питания (ВИП).

В состав модуля ФУС войдут:

- ◆ узел синхронизации и формирования зондирующих сигналов (УСФЗС), осуществляющий формирование ЗС на основе параметров, принятых от узла вычислителя (УВ) модуля ОКО, и выполняющий выдачу синхроимпульсов, для одновременного запуска начала работы прочих узлов ЛП;
- ◆ узел усиления мощности (УУМ), обеспечивающий заданную мощность в излучении сформированных ЗС;
- ◆ узел согласования и компенсации (УСК), обеспечивающий гальваническую развязку излучающего электронного тракта от ИА и компенсацию ее реактивной составляющей.

Модуль ПУЦОС должен состоять:

- ♦ из узла предварительного усиления (УПУ), осуществляющего предварительное усиление эхо-сигналов, приходящих с многоканальной ПА ЛП;
- ♦ узла временной автоматической регулировки усиления (УВАРУ), управляющего усилением УПУ в соответствии с режимом регулировки усиления, полученным с вычислительного устройства модуля ОКО;
- ♦ узла аналого-цифрового преобразования (УАЦП), преобразующего эхо-сигнал, усиленный в УПУ в цифровую форму;
- ♦ узла цифровой обработки сигналов (УЦОС), который будет осуществлять первичную цифровую обработку сигналов в соответствии с параметрами, полученными от узла сопряжения (УС), и выдачу обработанных данных в УС для последующей обработки в УВ.

При реализации модуля ОКО в его состав войдут:

- ♦ УВ, который будет осуществлять вторичную цифровую обработку сигналов и обмен данными с СК и бортовой системой по интерфейсам Ethernet. На УВ будут возложены задачи приёма команд и параметров от СК, передачи данных встроенной системы контроля и данных для отображения гидроакустической информации на ВМ. Также УВ будет производить обмен информацией с бортовой корабельной системой и осуществлять прием данных от навигационных датчиков и системы измерения скорости звука в воде;
- ♦ узел системы встроенного контроля (УСВК) будет осуществлять сбор сигналов контроля от различных узлов ЛП и формировать на их основе данные о работоспособности изделия;
- ♦ узел сопряжения (УС) необходим для передачи команд и параметров от УВ в модули ФУС и ПУЦОС, а также при приеме данных от модуля ПУЦОС и УСВК и для передачи их в УВ.

Модуль ВИП будет включать в себя узлы вторичных источников питания, обеспечивающих питание всех узлов БЭ с заданными параметрами токов, напряжений и пульсаций.

Схема электрическая структурная разрабатываемого ЛП представлена на рис. 1, принцип ее работы заключается в следующем.

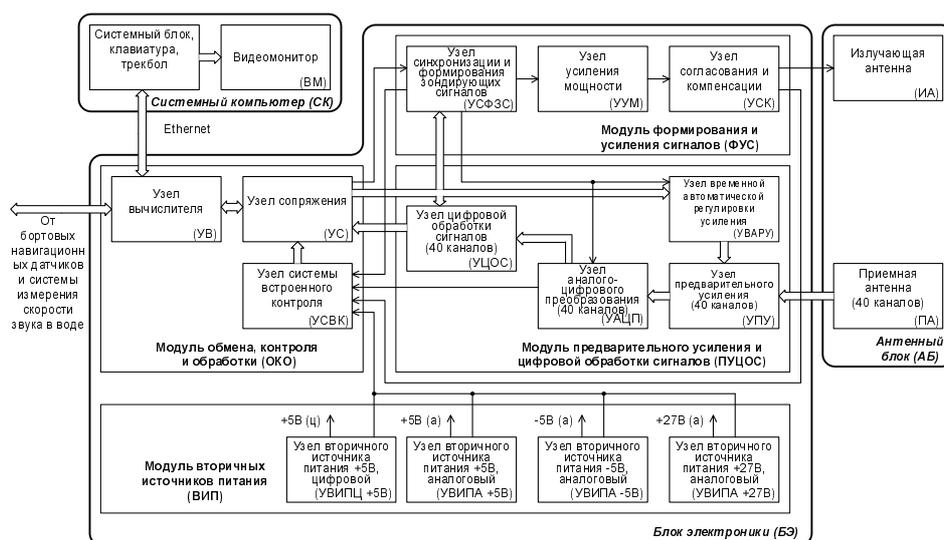


Рис. 1. Схема электрическая структурная ЛП глубоководного носителя

Оператор на СК задает режим работы ЛП, выбирая: тип ЗС; длительность ЗС; период следования ЗС; коэффициент усиления УУМ в долях, кратных 100 %-ной мощности; диапазон рабочей дальности действия, определяемый количеством принимаемых отсчетов эхо-сигнала за один период следования ЗС (Ns); режим ручной регулировки усиления (РРУ) или ВАРУ.

Параметры режима работы ЛП будут передаваться по интерфейсу Ethernet от СК в УВ. УВ осуществляет проверку работоспособности ЛП с помощью УСВК. В случае отказа какого-либо узла ЛП, УВ возвращает в СК код ошибки, который обрабатывается ПО СК и выводит на ВМ сообщение о возникшей неисправности.

Если ЛП работоспособен, то УВ через УС будет передавать информацию о длительности, периоде следования ЗС и количестве принимаемых отсчетов эхо-сигнала в УСФЗС и УЦОС и управлять режимом усиления в УВАРУ.

Запуск работы ЛП должен осуществляться по команде оператора СК, которая передается по интерфейсу Ethernet в УВ, а затем через УС в УСФЗС.

УСФЗС будет формировать тональные или ЛЧМ-сигналы на УУМ. Одновременно с этим УСФЗС будет выдавать сигналы синхронизации в УВАРУ и УАЦП. УУМ служит для усиления сформированных сигналов в соответствии с заданным коэффициентом усиления и передает их на ИА через УСК. В УСК будет производиться контроль излучения, результаты контроля передаются в УСВК. ИА трансформирует мощные электрические импульсы в акустические колебания. Таким образом, будет происходить облучение ЛП всего сектора обзора.

Отразившиеся от различных объектов в секторе обзора эхо-сигналы будут приниматься ПА и трансформироваться в электрические импульсы, которые усиливаются в УПУ. УВАРУ по сигналу синхронизации формирует закон ВАРУ с задержкой на длительность излучаемого импульса в течение времени, определяемого количеством принимаемых отсчетов эхо-сигнала. УПУ в соответствии с законом ВАРУ будет усиливать электрические импульсы. УАЦП по сигналу синхронизации с задержкой на длительность излучаемого импульса преобразует их в цифровую форму в течение времени, определяемого количеством принимаемых отсчетов, и выдаст цифровые данные на УЦОС, который осуществит первичную цифровую обработку сигналов. В случае, если цифровые коды УАЦП займут лишь малую часть разрядной сетки или будет наблюдаться превышение разрядной сетки или поступление кодов с одинаковым значением, УАЦП выдаст сигнал ошибки для УСВК. Данные после первичной обработки поступят на УВ, который осуществит вторичную обработку в соответствии с алгоритмом обработки, включающим в себя учет показаний бортовых навигационных датчиков и системы измерения звука в воде.

Обработанные данные поступят на СК, где произойдет их отображение на ВМ в форме, удобной для восприятия оператором. Кроме того, на ВМ могут отображаться данные УСВК.

Останов работы ЛП будет осуществляться по команде оператора. Команда передается по интерфейсу Ethernet в УВ, затем через УС в УСФЗС. УСФЗС прекратит формирование ЗС и сигналов синхронизации. При этом будет продолжен прием и обработка эхо-сигналов, предшествующих поступлению команды останова в УСФЗС. По окончании обработки и передачи обработанных данных в СК работа ЛП будет прекращена.

При решении вопросов реализации ЛП был рассчитан статический веер ХН ПА в вертикальной плоскости, приведенный на рис. 2.

Кроме того, были разработаны алгоритмы решения функциональных задач, в частности алгоритмы первичной и вторичной цифровой обработки сигналов.

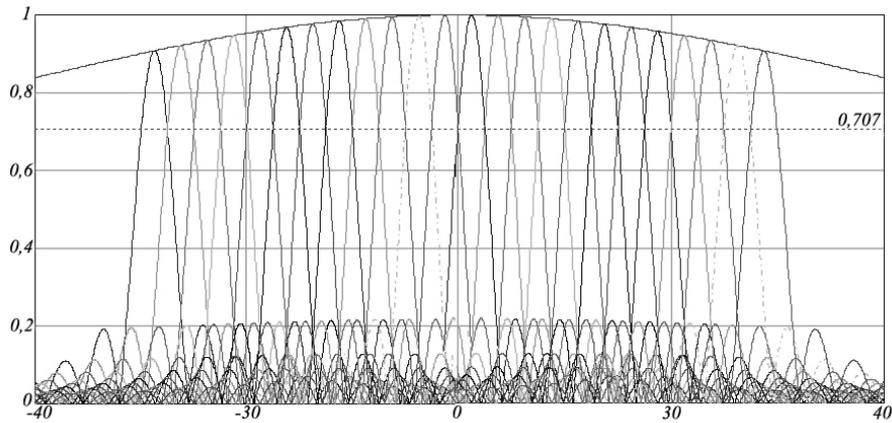


Рис. 2. Статический веер ХН ПА в вертикальной плоскости озвучиваемого пространства

Предложенная первичная пространственно-временная обработка изложена в работах [1,2] и выполняется в соответствии с процедурами цифровой обработки сигналов (ЦОС). Она включает в себя:

- ◆ формирование квадратурных составляющих комплексного сигнала (ФКС);
- ◆ согласованную фильтрацию (СФ) и весовую обработку (ВО) по дальности и в пространственной области;
- ◆ формирование в частотной области статического веера ХН (ФХН) в пространстве;
- ◆ вычисление модуля комплексного числа (ВМ);
- ◆ пороговую обработку выходного сигнала (ПО).

Процедура ФКС включает в себя следующие операции [3,4]:

- ◆ аналого-цифровое преобразование входного сигнала  $x_i(t)$ ;
- ◆ умножение цифрового сигнала  $x_i(n\Delta)$  на значения комплексной компоненты в точках  $(-j\pi/2)n$ ;
- ◆ фильтрация полученного комплексного сигнала;
- ◆ децимация комплексного сигнала  $\tilde{x}_i(n\Delta)$  с коэффициентом децимации  $K_{\text{дец}}$  и формирование выходного сигнала  $\tilde{x}_i(n\Delta_1)$ .

Процедуры СФ и ВО по дальности и в пространственной области включают в себя:

- ◆ вычисление с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) входных последовательностей каждого  $i$ -го канала ПА  $\tilde{X}_i(k)$ ;
- ◆ их умножение на заранее вычисленный коэффициент передачи согласованного фильтра  $\tilde{H}_i(k)$  с учетом весовой обработки  $W_{ik}$  для снижения боковых лепестков на выходе СФ и в ХН;
- ◆ выполнение ОБПФ, для перехода во временную область, результатом которого будет комплексная огибающая СФ  $i$ -го элементарного канала  $\tilde{y}_i(n\Delta_1)$ .

Далее следуют процедуры ФХН в пространстве с помощью процедуры БПФ, ВМ комплексного числа и ПО выходного сигнала.

При этом гораздо лучшие результаты можно получить при реализации методов электронного управления лучами антенн в частотной области, суть которых заключается в замене необходимого временного сдвига сигналов элементарных входных каналов эквивалентным изменением их фазовых спектров в частотной области [5].

Алгоритм вторичной обработки сигналов может производиться непосредственно в СК и подразумевает систему отображения принятой и обработанной информации на экране оператора ЛП.

При этом вторичная обработка может решать следующие задачи:

- ◆ ввод и вывод команд управления ЛП, в том числе организация работы оператора с периферийными устройствами системы отображения и управления с помощью графического интерфейса;
- ◆ пороговая и индикаторная обработка информации с последующим выводом ее на ВМ СК;
- ◆ подготовка и архивирование данных при регистрации, консервации и документировании.

Для выполнения второй задачи оператору для принятия решений и обеспечения работоспособности ЛП должна быть предоставлена следующая входная информация:

- ◆ результаты первичной и вторичной обработки информации в ЛП, а также информация о действующих параметрах установленного режима работы ЛП и параметрах отображения. Данные первичной пространственно-временной обработки после пороговой обработки должны передаваться на отображение в виде многомерных массивов для самостоятельного решения оператором задачи обнаружения препятствия. Результаты вторичной обработки, заключающейся в автоматическом обнаружении препятствия, передаются оператору в форме визуального и/или звукового предупреждения. Параметры режима работы должны включать в себя диапазон установленной шкалы горизонтальной дальности обнаружения, тип и параметры излучаемого ЗС, параметры пороговой и прединдикаторной обработки принятых эхо-сигналов;
- ◆ выбор автоматической либо ручной регулировки усиления уровня принятого сигнала, а также информация о выбранной схеме ВАРУ сигнала для компенсации потерь энергии ЗС при его распространении в воде;
- ◆ информация по каналам связи о едином корабельном времени, режиме движения носителя, параметрах качки, измеренной скорости звука в воде;
- ◆ информация о текущем техническом состоянии ЛП, получаемая от системы встроенного контроля.

В состав выходной информации системы отображения и управления входят команды управления ЛП УМБК: включение, выключение, контроль технического состояния, установка параметров режима работы, параметров обработки и пр.

Наиболее удобным для оператора является отображение гидроакустической информации в полярной системе координат. Применительно к предлагаемой разработке оператор должен получать секторное представление о вертикальном разрезе толщи воды впереди по курсу относительно верхнего левого угла экрана, который ассоциируется у него с глубоководным носителем ЛП. При этом у оператора вырабатывается концептуальная модель, адекватная процессу движения в повседневной жизни, когда он решает задачу обнаружения препятствий, во-первых, в собственной системе координат и, во-вторых, использует только ту часть информации, что находится впереди по ходу движения.

При работе ЛП на индикатор в цветовом яркостном кодировании будут выводиться результаты первичной обработки сигналов, поступающие от всех пространственных каналов. Они будут отображаться при помощи цветowych дуг окружности, разворачивающихся от левого верхнего угла в секторе обзора используемого АБ. Параметры режима работы ЛП будут отображаться в верхней части экрана. Предполагаемый вид кадра отображения информации может иметь вид, показанный на рис. 3.

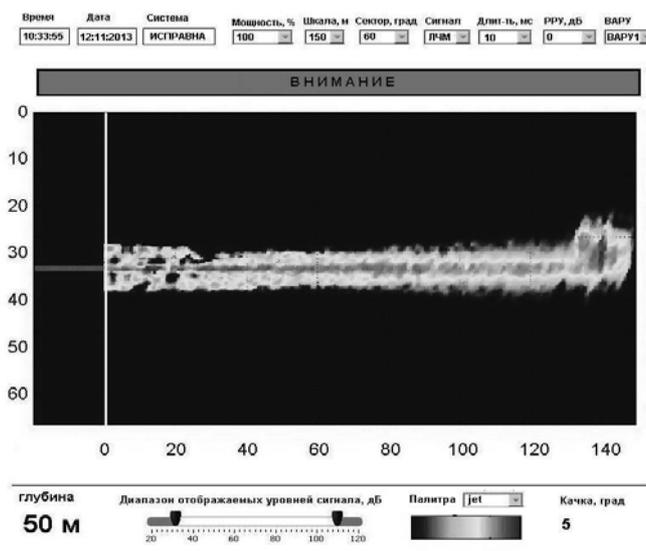


Рис. 3. Предполагаемый вид кадра отображения информации в случае определения рельефа дна с построением цифровой модели препятствия

Минимальная конфигурация системы отображения должна включать:

- ◆ основную часть экрана: вертикальный разрез толщи воды до дна вперед в секторе углов падения 30–90° вперед по курсу;
- ◆ окно «ретро», содержащее сжатую информацию о глубине дна за последние 10–15 секунд; позволяет судить о характере дна и прогнозировать дальнейшее развитие ситуации;
- ◆ ползунковый регулятор, позволяющий легко задавать минимальное и максимальное значения отображаемого диапазона уровней сигнала; может быть расположен в нижней части экрана;
- ◆ следует предусмотреть возможность настройки палитры;
- ◆ сигнал тревоги о препятствии впереди либо о возвышении дна на недопустимую высоту (сигнал тревоги может быть визуальным и/или звуковым);
- ◆ отображение справочной информации: текущая глубина дна, скорость буксировки в узлах, текущий уровень килевой качки, дата и текущее время.

Результаты представленной работы позволяют рассчитывать на возможность создания ЛП, решающего задачи безопасного судоходства глубоководных носителей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маркович И.И. Многоканальная система цифровой пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов перспективного комплекса проведения поисково-спасательных работ // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 174-179.

2. *Маркович И.И., Семеняк П.Л., Ковалев Э.П.* Цифровая пространственно-временная обработка сигналов в многоканальной гидроакустической системе // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2008. – Т. 6, № 3. – С. 72-75.
3. *Маркович И.И., Семеняк П.Л., Ковалев Э.П.* Реализация алгоритмов цифровой пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов в многолучевых эхолотах // Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2008). – СПб.: Наука, 2008. – С. 183-187.
4. *Маркович И.И., Жирнов В.С.* Интеллектуальная система цифрового формирования и обработки сигналов в многолучевом эхолоте // Материалы IX Международной научно-технической конференции «Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы». – Донецк: ИПИИ, «Наука і освіта», – 2008. – Т. 2. – С. 54-58.
5. *Маркович И.И., Губанов Ю.Н., Ковалев Э.П., Жирнов В.С., Душенин Ю.В., Примак В.П.* Результаты натурных испытаний многолучевого эхолота с цифровой пространственно-временной обработкой // Материалы международной научно-технической конференции «Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы (МВУС-2009)». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – Т. 2. – С. 194-196.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.Р. Ильчук.

**Маркович Игорь Ильич**

Научное конструкторское бюро цифровой обработки сигналов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет».

E-mail: dsp@tsure.ru.

347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2.

Тел.: 88634312350.

Директор – главный конструктор; к.т.н.; старший научный сотрудник.

**Душенин Юрий Владимирович**

Начальник сектора.

**Жирнов Вячеслав Сергеевич**

Начальник лаборатории.

**Семеняк Павел Петрович**

Начальник сектора.

**Ковальчук Дмитрий Васильевич**

Инженер-электроник..

**Markovich Igor P'ich**

SFedU Research and Design Bureau of Digital Signal Processing – Federal State-Owned Educational of Higher Vocational Education «Southern Federal University».

E-mail: dsp@tsure.ru.

2, Shevchenko Street, Taganrog, 347922, Russia.

Phones: +78634312350.

Director-Chief Designer; Cand. of Eng. Sc.; Senior Research.

**Dushenin Yury Vladimirovich**

Head of Scientific Sector.

**Zhirnov Vyacheslav Sergeevich**

Head of Laboratory.

**Semenyak Pavel Petrovich**

Head of Scientific Sector.

**Koval'chuk Dmitry Vasil'evich**

Electronic Engineer.