

УДК 681.883; 681.513

ББК 73

Д17

Рецензенты: **Ю. А. Соколов**, главный научный сотрудник  
НИИ космических систем им. А. А. Максимова —  
филиал ФГУП «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева,  
канд. техн. наук, заслуженный машиностроитель РФ;

**В. В. Яковлев**, профессор кафедры  
«Управление и защита в чрезвычайных ситуациях»  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого», д-р техн. наук, профессор,  
почетный работник высшего и специального образования

**Данилов, В. Н.**

Д17 **Конструктивная концепция обработки сигналов различной физической природы / В. Н. Данилов. — СПб. : Политехника, 2018. — 206 с. : ил.**

ISBN 978-5-7325-1136-9

Монография содержит постановку и решение важной научной проблемы — разработку и обоснование новой информационной концепции обработки данных, позволяющей восстановить исходный процесс с заданной степенью точности при отсутствии априорной информации. Решение рассмотренной проблемы актуально и имеет большое научное и социальное значение.

Научно-теоретическая значимость монографии определяется исследованием принципиально новой предметной области, а именно применением для обработки информации методов конструктивного анализа на базе новой концепции измерений, направленной на восстановление и выявление конструктивных элементов исходного процесса, которые соответствуют наблюдаемому факту или явлению. В работе впервые применен подход, основанный на использовании информации, содержащейся в мгновенных составляющих процесса, что подтверждает ее научную новизну.

Книга может быть полезна студентам и научным сотрудникам профильных институтов, а также специалистам по обработке информации, особенно в области распознавания и идентификации образов.

УДК 681.883; 681.513  
ББК 73

ISBN 978-5-7325-1136-9

© В. Н. Данилов, 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений . . . . .	6
Введение . . . . .	7

### **ЧАСТЬ I. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕОРИИ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ ПРОЦЕССОВ В СУЩЕСТВУЮЩЕЙ КОНЦЕПЦИИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

Предисловие к ЧАСТИ I. . . . .	16
<b>Глава 1. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИ СЛОЖНЫХ ПРОЦЕССОВ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ . . . . .</b>	<b>18</b>
1.1. Обзор существующих методов моделирования колебаний во временной области . . . . .	18
1.2. Критерий отношения порядка и его влияние на структуру временной последовательности . . . . .	24
Выводы . . . . .	32
<b>Глава 2. МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТЫХ ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ В ШУМОВЫХ ПРОЦЕССАХ. . . . .</b>	<b>33</b>
2.1. Анализ современных методов выявления скрытых периодич- ностей по литературным источникам . . . . .	33
2.2. Методы выявления скрытых периодичностей в случайных процессах, заданных ансамблем выборочных функций . . . . .	38
Выводы . . . . .	50
<b>Глава 3. МОДЕЛИ ШУМОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ . . . . .</b>	<b>51</b>
3.1. Физическая сущность моделирования в спектральной области и некоторые положения теории аппроксимации . . . . .	51
3.2. О некоторых свойствах функциональных пространств и си- стем базисных функций. . . . .	59
3.3. Современная концепция измерения параметров физических полей. Общие положения. . . . .	64
3.4. Фундаментальные ограничения ОИЭК и некоторые предпо- сылки формирования новой концепции измерения параметров физических полей. . . . .	67
Выводы . . . . .	71
<b>Общие выводы . . . . .</b>	<b>71</b>
Литература . . . . .	72
Приложение. Ретроспективный анализ моделей и методов борьбы с шумоизлучением и вибрацией на кораблях и судах ВМФ . . . . .	74

**ЧАСТЬ II. РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА  
СЛОЖНЫХ ПРОЦЕССОВ В НОВОЙ КОНЦЕПЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ  
И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЙ К ОБНАРУЖЕНИЮ СИГНАЛОВ**

Предисловие к ЧАСТИ II . . . . .	78
<b>Глава 1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНСТРУКТИВНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОН- НОЙ КОНЦЕПЦИИ (КДИК) . . . . .</b>	<b>83</b>
1.1. Дедуктивно-феноменологический метод синтеза спектрально- временных моделей шумовых процессов . . . . .	83
1.2. Индуктивно-феноменологический метод синтеза спектрально- временных моделей . . . . .	86
1.3. Математические основы конструктивной дифференциальной информационной концепции . . . . .	93
Выводы . . . . .	98
<b>Глава 2. МЕТОДОЛОГИЯ СИНТЕЗА КОНСТРУКТИВНЫХ МОДЕ- ЛЕЙ СЛОЖНЫХ ПРОЦЕССОВ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ . . . . .</b>	<b>99</b>
2.1. Модель бесконечно длинной реализации шумового процесса на конечном интервале наблюдения . . . . .	99
2.2. Метод вложенных временных последовательностей . . . . .	103
2.3. Метод выбора оптимального интервала наблюдения . . . . .	104
2.4. Исследование некоторых статистических свойств шумовых временных последовательностей . . . . .	114
2.5. Метод огибающих и многоуровневые мультипликативные модели . . . . .	122
Выводы . . . . .	125
<b>Глава 3. ОСНОВЫ КОНСТРУКТИВНОГО АНАЛИЗА КОЛЕБАТЕЛЬ- НЫХ ПРОЦЕССОВ . . . . .</b>	<b>126</b>
3.1. Основные положения конструктивного анализа . . . . .	126
3.2. Базис конструктивного анализа . . . . .	129
3.3. Конструктивный анализ одноуровневых моделей. Метод кон- структивной временной свертки первого порядка. Конструк- тивный спектр . . . . .	137
3.4. Конструктивный анализ многоуровневых моделей . . . . .	142
3.5. Кумулятивный метод в задачах выявления скрытых перио- дичностей . . . . .	148
3.6. Аддитивный конструктивный анализ . . . . .	152
Выводы . . . . .	153
<b>Глава 4. ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО И СУБОПТИМАЛЬНОГО ПРИ- ЕМА СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ ПРОЦЕССОВ В КДИК . . . . .</b>	<b>155</b>
4.1. Постановка задачи обнаружения . . . . .	155
4.2. Некоторые положения теории оптимальной фильтрации . . . . .	159

4.3. Некоторые результаты экспериментальных исследований оптимальных обнаружителей . . . . .	162
4.4. Метод когерентного обнаружения сигналов при отсутствии априорной информации об их форме . . . . .	170
4.5. Метод кумулятивного обнаружения сигналов . . . . .	179
4.5.1. Основные понятия . . . . .	179
4.5.2. Кумулятивное накопление сигнала от шумящих целей . . . . .	181
4.5.3. Математическая модель шумового сигнала и обоснование технических требований к кумулятивному накопителю . . . . .	183
4.6. Параметрические виртуальные методы обнаружения сигналов . . . . .	189
4.6.1. Основные понятия и модели . . . . .	189
4.6.2. Блок-схема макета виртуального обнаружителя . . . . .	192
Выводы . . . . .	199
<b>Общие выводы . . . . .</b>	<b>200</b>
Заключение . . . . .	201
Литература . . . . .	204

## ВВЕДЕНИЕ

Радиоэлектронные средства (РЭС) наблюдения, связи, управления, анализа и прочего решают проблему измерения и технической оценки параметров физических полей всех видов носителей и объектов исследования. Измерения проводят в целях добывания информации о заметности носителей в интересах решения задач обнаружения, распознавания образов, целеуказания, наведения, защиты от средств поражения и т. д., в том числе при различных видах научных исследований. Кроме того, каждый уровень перечисленных выше задач, решаемых радиоэлектронными средствами, нуждается в соответствующем уровне метрологического обеспечения. Эффективность измерений существенным образом зависит от того, каким представляет себе объект исследования наблюдатель, т. е. от вида модели, которая в конечном счете определяет структуру РЭС. В свою очередь модельное представление базируется на некоторой руководящей идее (концепции). Примерами концепций являются утверждения: Земля плоская, Земля круглая, Земля — центр Вселенной, атом неделим, атом неисчерпаем и др.

В современной радиоэлектронике руководящей идеей является преобразование переменного тока в постоянный, которая и лежит в основе всех существующих модельных представлений сигналов и помех и соответствующих им технических решений.

Исторически началом формирования концепции измерения параметров физических полей следует считать изобретение А. С. Поповым детектора (когерера) электромагнитных колебаний. При этом руководящей идеей А. С. Попова было стремление преобразовать переменный ток в постоянный, так как в XIX веке управлять постоянным током, в том числе и передавать сообщения (телеграф), уже умели. Это изобретение завершило формирование типового (измерительного) приемного тракта, что и привело к бурному развитию средств связи, радиолокации, гидроакустики и других РЭС, а также всего комплекса сопутствующих технологических и технических средств. Таким образом, возникло новое огромное направление в науке, первоначально на эмпирическом уровне. Одновременно началось теоретическое изучение всех последствий этого события. Был выполнен колоссальный объем теоретических и экспериментальных исследований, который за первые 50 лет развития РЭС нашел свое обобщение в фундаментальных работах. К области обнаружения сигналов и передачи информации следует отнести работы Х. Найквиста, К. Шеннона, В. А. Котельникова, А. А. Харкевича [10, 38, 39, 41] и др., к области измере-

ния координат, управления и распознавания образов — работы А. Н. Колмогорова [18], Н. Винера [40], Г. С. Себастиана [42] и др. За последующие 50 лет вплоть до настоящего времени выполнен огромный объем теоретических и экспериментальных исследований, направленных на расширение, углубление, детализацию и обобщение накопленного опыта и полученных результатов, развитие философских аспектов понятий «сигнал» и «информация» и методологической базы исследований сложных систем. Однако, несмотря на впечатляющий объем проведенных за 100 лет исследований и достигнутые результаты, становится все более очевидным тот факт, что дальнейшее развитие РЭС существенным образом связано с концептуальным расширением понятия типового приемного (измерительного) тракта и преодолением в нем ограничений, заложенных современной, исторически сложившейся концепцией.

Физическую суть этих ограничений можно пояснить двумя следующими примерами.

**Пример 1.** С точки зрения помехоустойчивости любой измерительный (приемный) тракт можно представить в виде трех последовательно соединенных элементов [46]: полосового фильтра (преселектора), детектора (нелинейного элемента) и фильтра нижних частот (накопителя, сумматора, интегратора и т. д.) (рис. В.1).

Сделаем следующие предположения.

1. В данной схеме работает наиболее распространенный квадратичный детектор.
2. На входе приемника полностью отсутствует помеха в любом ее проявлении.
3. На вход приемной системы поступает тональный сигнал вида

$$S(t) = A \cos \omega_0 t, \quad (\text{В.1})$$

где  $\omega_i < \omega_0 < \omega_a^*$ ;  $\omega_i, \omega_a^*$  — нижняя и верхняя круговые частоты полосового фильтра соответственно.

Тогда на выходе квадратичного детектора имеем процесс вида

$$y(t) = A^2 \cos^2 \omega_0 t = \frac{A^2}{2(1 + \cos 2\omega_0 t)}. \quad (\text{В.2})$$

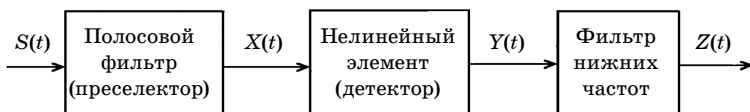


Рис. В.1. Обобщенная схема приемного тракта

Очевидно, что на выходе квадратичного детектора 50 % энергии сигнала представлены в виде постоянной составляющей и 50 % энергии сигнала сконцентрировано на второй гармонике сигнала, которая при измерении постоянной составляющей является помехой. Для борьбы с этой помехой, которой не было на входе, ставится специальное устройство в виде фильтра нижних частот, и тогда на выходе приемной системы в пределе получим

$$z(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{t-T}^t A^2/2 (1 + \cos 2\omega_0 t) = A^2/2, \quad (\text{В.3})$$

т. е. некоторую постоянную, пропорциональную эффективной мощности или эффективному значению напряжения. Нетрудно показать, что, если бы сигнал состоял из двух, трех и более тональных составляющих, результат был бы один и тот же. Это означает, что по результатам измерений типовым трактом нельзя определить, какой сигнал действовал на входе, и совершенно очевидно, что 50 % энергии сигнала трансформировалось в помеху, для борьбы с которой используется специальное устройство (фильтр нижних частот).

Таким образом, в типовом измерительном тракте происходят:

- 1) потеря информации о форме входного сигнала;
- 2) генерация помехи, которой не было на входе и для борьбы с которой применяется специальное устройство (фильтр нижних частот).

**Пример 2.** Известно решение задачи об оптимальной фильтрации в виде корреляционного приемника (рис. В.2), реализующего алгоритмы оптимального приема в соответствии со следующим выражением:

$$z(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(t) S(t - \tau) dt, \quad (\text{В.4})$$

где  $x(t) = S(t) + n(t)$ ;  $S(t)$  — детерминированный сигнал;  $n(t)$  — помеха в виде стационарного случайного процесса с нормальным законом распределения;  $\tau$  — скользящая задержка копии сигнала.

Решим задачу оптимального приема для условий примера 1. Тогда

$$Z(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t A^2/2 \sin \omega_0 t \sin [\omega_0 (t - \tau)] dt. \quad (\text{В.5})$$



Рис. В.2. Обобщенная схема оптимального корреляционного приемника

Максимальное значение это выражение принимает, когда время задержки сигнала относительно его копии  $\tau = 0$ , т. е.

$$Z(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t A^2/2 \sin \omega_0 t dt.$$

Очевидно, это приводит к тому же результату и тем же выводам, что и в примере 1.

Несмотря на кажущуюся простоту и очевидную парадоксальность полученных результатов, необходимость подобного рода исследований, направленных на определение области применения современной концепции, появилась в результате столетнего ее развития, когда практические и теоретические результаты вплотную приблизились к границам ее возможностей. Внутренняя парадоксальность современной концепции измерений достаточно всесторонне (но не исчерпывающе) рассмотрена в известной книге Л. М. Финка [48], выводы которой, однако, достаточно далеки от вывода о необходимости формирования новой концепции измерений, и тем не менее такая необходимость достаточно очевидна по нижеследующим причинам.

Во-первых, существует круг задач, решение которых принципиально невозможно в рамках существующей концепции. К таким задачам в первую очередь относится идентификации источников шумоизлучения по характеру их шумов. В существующей концепции в качестве статистических характеристик шумовых и шумоподобных процессов используются моменты второго порядка (энергетический спектр, корреляционная функция и др.),



которые не содержат информации о законе изменения мгновенных значений и фазовых спектрах и поэтому однозначно не характеризуют данный конкретный шумовой процесс, а следовательно, и его источник излучения. Это означает, что совершенно разные шумовые процессы от разных источников могут иметь одинаковые статистические характеристики. Такое положение не только делает принципиально невозможным решение задач идентификации, но и существенно затрудняет решение задачи распознавания образов в целом, накладывает ограничения на решение задач обнаружения, измерения координат и т. д.

Во-вторых, в рамках существующей концепции имеются парадоксальные решения, связанные с понятиями информации, количества информации, скорости передачи информации, пропускной способности канала и др. [48]. Это в конечном счете приводит к тому, что принимаемые на основе полученной информации решения не адекватны реальному процессу или ситуации.

В-третьих, в настоящее время существуют методы, теоретические и технические решения, которые не укладываются в рамки современной концепции измерений. К их числу следует отнести в первую очередь осциллографические методы, которые в принципе позволяют получить информацию о законах изменения мгновенных значений процесса, но без оценки ее статистической достоверности. К ним же относятся когерентные методы накопления, которые также позволяют получить эту информацию, но при наличии априорной информации о временных параметрах процесса. Однако и эта информация теряется при установлении корреляционной взаимосвязи двух процессов.

Имеются и другие методы и технические решения [45, 47], которые не вписываются в рамки существующей концепции измерений и на возможности которых она накладывает свои ограничения.

Столетний опыт формирования и эксплуатации современной концепции измерений показывает, что с методологической точки зрения качество измерений определяется следующими факторами.

1) *типом модели* или, точнее говоря, степенью соответствия параметров реального физического процесса параметрам его математической модели, заданной в общем случае в виде случайного процесса.

При этом в качестве критерия этого соответствия следует принимать критерий синтеза, в соответствии с которым воспроизведенный по множеству измеренных параметров процесс (аппроксимирующая функция) должен обеспечивать экстраполяцию значений реального физического процесса с заданной степенью точности. В этом случае такие критерии, как критерий согласия Колмогорова, ХИ-квадрат и др., являются составной частью критерия синтеза на стадии измерения параметров;

2) *типом математических преобразований* (алгоритмов), техническая реализация которых обеспечивает измерение необходимого множества параметров с заданной степенью точности;

3) *физическим смыслом* измеряемых величин и их соответствием реальному физическому процессу.

Согласно такому подходу проведен всесторонний анализ современной концепции измерений и установлены следующие факты.

1. По типу используемых математических *моделей* реальных физических процессов (сигналов и помех) современная концепция измерений является *обобщенной*, так как в качестве модели используются случайные процессы, свойства которых формулируются самыми общими понятиями, например, «помеха» или «шум»: стационарный, эргодический, гауссовский процесс. При этом в модели не учитываются структура реального физического процесса, т. е. законы изменения его мгновенных значений, а также реальные условия наблюдения.

2. По типу математических преобразований и методам обработки современная концепция измерений является *интегральной*, так как основные преобразования и алгоритмы обработки имеют вид интегралов либо интегральных сумм: интегральные преобразования Фурье, интегральные преобразования Хинчина—Винера, интеграл Дюамеля, энергетический спектр, корреляционная функция и т. д.

3. По физическому смыслу современная концепция измерений является *энергетической*, так как основные физические величины, которые подлежат измерению, — это эффективное значение напряжения, мощность, мощность на единицу частоты, энергия и т. д. Их математическими аналогами являются соответственно среднеквадратическое отклонение, дисперсия, функция спектральной плотности, функция корреляции и др.

Таким образом, современная, исторически сложившаяся концепция измерений и соответствующая ей теория анализа и синтеза сложных процессов может быть определена как *обобщенная интегральная энергетическая концепция (ОИЭК)*.

Основным недостатком существующей концепции является то, что по результатам измерений параметров физического процесса (поля) нельзя однозначно синтезировать исходный процесс. Так, например, равномерный (прямоугольный) энергетический спектр может иметь белый шум, короткий импульс, колебания вида  $\sin x/X$ , ЛЧМ-колебания и т. д. С точки зрения решения задач обнаружения и распознавания образов этот недостаток является *фундаментальным*.

Попытка создать информационную концепцию на основе меры Шеннона [54], которая может быть охарактеризована как обобщенная интегральная информационная концепция (ОИИК), указанный недостаток не устраняет. Отсюда следует необходимость введения новой меры, позволяющей по результатам измерений восстановить исходный процесс с заданной степенью точности.

Изложенное свидетельствует об актуальности разработки новой концепции измерения параметров физических полей, которая позволяла бы измерять как четные, так и нечетные статистические характеристики параметров физических полей, в том числе моменты 1-го порядка, которые несут информацию о законах изменения мгновенных значений параметров физических процессов и полей и соответствующей ей теории анализа и синтеза моделей сложных процессов.

С точки зрения критерия синтеза, т. е. восстановления процесса по результатам измерений с заданной степенью точности, наибольший интерес представляют модели сложных процессов и методы их анализа и синтеза во временной области, при этом в качестве сложного процесса целесообразно рассматривать модели шумового или шумоподобного процесса.

Цели и задачи настоящего труда заключаются в следующем:

- оценка современной теории анализа и синтеза сложных процессов на основе существующей концепции измерения параметров физических полей;
- анализ методологии моделей и методов исследования существующей концепции и выявление фундаментальных ограничений;
- обоснование конструктивного объекта для колебательных процессов;
- разработка теории анализа и синтеза моделей сложных процессов на основе новой концепции измерений;
- разработка методологии анализа и синтеза детализированных (конструктивных) моделей сложных процессов во временной области;
- разработка методов статистического анализа детализированных (конструктивных) моделей шумовых и шумоподобных процессов и измерения их статистических характеристик;
- разработка приложения теории анализа и синтеза сложных процессов к решению проблемы обнаружения сигналов на основе новой концепции измерения параметров физических полей;
- разработка приложения методов новой концепции для решения проблемы обнаружения сигналов;
- экспериментальные исследования в интересах проверки основных положений новой концепции измерения параметров физических процессов и полей применительно к решению задач обнаружения.

В процессе исследований использованы методы системологии, феноменологии, современной математики, функционального анализа, теории вероятностей и математической статистики, статистической радиотехники и гидроакустики, теории обнаружения сигналов, распознавания образов, виртуальной динамики и др.

В результате исследований были выявлены фундаментальные ограничения существующей концепции измерения параметров физических полей. Определена новая концепция измерения параметров физических полей, отличительными признаками которой являются:

- по типу моделей — конструктивные (детализированные) модели сложных процессов, позволяющие выделить в сложном процессе информационную зону;
- по типу математических преобразований — применение статистик моментов 1-го порядка и их производных для определения формы сингулярных составляющих сложных (шумовых или шумоподобных) процессов и тенденций их изменения;
- по физическому смыслу — обеспечивающая статистически достоверные измерения мгновенных значений процесса и законов их изменения при заданных значениях фазы и на заданном фазовом интервале.

На основе новой концепции создана теория анализа и синтеза моделей сложных процессов, которая как система основных идей и закономерностей включает следующие основные элементы:

- феноменологическую методологию анализа и синтеза моделей сложных процессов;
  - методологию анализа и синтеза моделей сложных процессов во временной области на основе критерия отношения порядка;
  - статистический конструктивный анализ сложных процессов.
- В соответствии с новой теорией разработаны:
- новое решение задачи оптимальной фильтрации;
  - новые методы обнаружения сигналов, алгоритмы и устройства, их реализующие.

Прикладное значение исследований состоит в том, что их результаты могут служить основой для разработки нового поколения радиоэлектронных средств различного целевого назначения, дополняя и расширяя множество измеряемых статистических характеристик, и тем самым повысить эффективность решения задач обнаружения, распознавания образов, измерения координат разнородных объектов. Новая концепция и разработанная теория не опровергают и не отвергают известных положений в теории и практике развития радиоэлектронных средств. Она дополняет и

расширяет информационное поле, подобно тому как математическое ожидание не отвергает дисперсию, а увеличивает наши знания о реальном процессе.

В процессе работы для проверки отдельных теоретических положений были созданы и испытаны приборы, описанные в тексте данного научного труда. Эффективность разработанных методов проиллюстрирована применительно к решению проблемы обнаружения сигналов. Все полученные результаты являются новыми.

Материалы, предваряющие данный фундаментальный труд, опубликованы в 136 печатных источниках, в числе которых 25 авторских свидетельств на изобретения, учебные пособия и монография. Новизна основных элементов новой теории подтверждена их публикациями на межведомственном, союзном и международном уровнях (около 40 статей), авторскими свидетельствами, а также НИР, выполненных под научным руководством автора (26 НИР).

Автор выражает особую благодарность профессору С. Д. Ковтуненко и профессору А. П. Прошину за научную помощь, а также Ю. В. Тарасовой за техническую помощь в работе.



### ДАНИЛОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ

Родился в 1939 г. в Ленинграде в семье офицера ВМФ. Окончил ВВМУРЭ им. А. С. Попова. Избрал подводный профиль подготовки, дипломный проект выполнил на кафедре гидроакустики и защитил с отличием. Был назначен на Тихоокеанский флот, где участвовал в боевых службах в акватории Тихого океана по обнаружению кораблей потенциального противника и слежению за ними.

С апреля 1970 г. по март 1974 г. состоял адъюнктком, а затем до июля 1980 г. преподавателем на кафедре гидроакустики. В 1977 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование возможностей выделения сингулярной составляющей шумовых последовательностей в интересах классификации целей». До ноября 1982 г. был старшим научным сотрудником-докторантом и в течение последующих лет — старшим преподавателем. Ученое звание доцента присвоено 11 сентября 1985 г., профессора — 20 марта 1996 г.

В последующие годы проводил плодотворные исследования: опубликовал 150 научных статей, получил 26 свидетельств на изобретения. Работал в должности заместителя директора НИЦ «Кристалл» по научной работе (июль 1992 г. — июнь 1998 г.), затем профессора-консультанта НИИ информатизации и автоматизации Академии наук России (июль 1992 г. — сентябрь 2002 г.). Избран членом-корреспондентом Международной академии информатизации 14 мая 1997 г., профессором Академии военных наук — 29 декабря 1999 г. По совокупности научных работ Международной университет фундаментального образования в 2014 г. присудил ему степень *Grand Doctor of Technical Science*.

Последние годы Владимир Николаевич продолжает научную работу в качестве старшего научного сотрудника Государственного научно-исследовательского института прикладных проблем (ФГУП «ГосНИИПП»).