

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 681.511.4

ДЕРЮШЕВ

Андрей Анатольевич

**АНАЛИЗ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ  
ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ  
С ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫМИ СТРУКТУРОЙ И ПАРАМЕТРАМИ**

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск 2004

Работа выполнена в Учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель –

доктор технических наук, доцент Шилин Л.Ю.

(Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, кафедра теоретических основ электротехники)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Кузнецов В.П.

(Учреждение образования «Минский институт управления», кафедра информационных технологий)

кандидат технических наук, доцент Горошко В.И.

(Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники)

Оппонирующая организация –

Унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт средств автоматизации»

Защита состоится 24 июня 2004 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при Учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, БГУИР, корп. 1, ауд. 232, тел.: 239-89-89.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы диссертации.** Диссертационная работа посвящена разработке импульсных устройств фазовой синхронизации с переключаемыми структурой и параметрами (ИУФСП), что вызвано необходимостью повышения быстродействия, улучшения спектральных характеристик, обеспечения лучшей электромагнитной совместимости импульсных устройств фазовой синхронизации (ИУФС). По сравнению с традиционными ИУФС, ИУФСП позволяют достичь более высоких технических характеристик, обладают сравнительно простой схемотехнической реализацией, малой массой, энергопотреблением, большей универсальностью. Именно поэтому в наши дни наблюдается значительный рост числа публикаций по этой тематике как в странах ближнего, так и дальнего зарубежья.

Анализ публикаций по теме диссертации показал, что к настоящему моменту отсутствуют методы исследования ИУФСП, которые бы в полной мере учитывали нелинейные свойства и интегральную импульсную модуляцию, позволяли проводить расчет динамических и точностных характеристик в режимах частотного и фазового детектирования, определять спектральные свойства выходного сигнала с учетом собственных шумов и наличия сигналов помехи, позволяли исследовать устройства с различными алгоритмами переключения. Так как возможности создания аналитических методов ограничены наличием нелинейностей и интегральной импульсной модуляции, то возрастающая потребность в применении новых высокоэффективных устройств фазовой синхронизации вызывает необходимость создания машинно-ориентированных методов анализа и синтеза ИУФСП.

Решение указанных задач позволяет повысить эффективность систем автоматики, связи, телемеханики, других систем, содержащих ИУФС, при снижении требуемых материальных затрат, что особенно актуально для предприятий Республики Беларусь в современных экономических условиях.

### **Связь работы с крупными научными программами, темами.**

Исследования по теме диссертационной работы проводились в рамках госбюджетных научно-исследовательских работ ГР№20002331 «Анализ, синтез и разработка на их основе современных методов компьютерного проектирования дискретных систем управления» (2000-2001 гг.), ГБ№01-2026 «Разработать методы анализа и синтеза импульсных электрических цепей с фазовым управлением и электромеханических систем» (2001-2005 гг.).

**Цель и задачи исследования.** Целью данной диссертационной работы является разработка машинно-ориентированных методов анализа и параметрического синтеза импульсных устройств фазовой синхронизации с переключаемыми структурой и параметрами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать универсальные и специализированные математические модели ИУФСП, позволяющие проводить как сравнительный анализ устройств различной схемотехнической реализации, так и обеспечить минимальные вычислительные затраты при параметрическом синтезе; при этом в моделях должна учитываться интегральная модуляция, нелинейные свойства различных блоков устройства;
- разработать алгоритмы анализа устойчивости ИУФС с переключаемыми структурой и параметрами;
- разработать метод параметрического синтеза, обеспечивающий учет требований к спектральным характеристикам, устойчивости и быстродействию;
- разработать пакет прикладных программ для автоматизации анализа и синтеза ИУФСП, произвести его верификацию;
- разработать алгоритмы переключения структуры и параметров, позволяющие увеличить быстродействие ИУФСП при сохранении спектральных характеристик;
- провести цифровое и натурное моделирование ИУФСП.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются импульсные устройства фазовой синхронизации с интегральной модуляцией. Предметом исследования является использование в ИУФС переключаемых структуры и параметров для улучшения быстродействия и качественных характеристик устройства.

**Методология и методы проведенного исследования.** В ходе достижения цели исследования использовались методы теории автоматического управления, матрично-топологические методы анализа и синтеза электронных схем, метод переменных состояния, методы решения дифференциальных уравнений, в том числе с особенностями, методы оптимизации, методы анализа устойчивости, методы теории вероятностей и статистики.

#### **Научная новизна и значимость полученных результатов.**

Разработаны эффективные в вычислительном плане математические модели ИУФС с переключаемыми структурой и параметрами с интегральной импульсной модуляцией на основе метода переменных состояния, позволяющие исследовать ИУФСП в режимах частотного и фазового детектирования с учетом нелинейных свойств устройства.

Впервые разработана универсальная имитационная модель, которая позволяет проводить исследование ИУФС как без переключения, так и с различными алгоритмами переключения, в режимах частотного и фазового детектирования, с учетом нелинейностей отдельных блоков устройства.

Предложен оригинальный (подана заявка на изобретение) способ формирования сигнала, пропорционального разности фаз, позволяющий улучшить характеристики импульсно-фазовых детекторов по быстродействию. Впервые разработаны алгоритмы переключения структуры и параметров ИУФС, позволяющие уменьшить длительность переходного процесса по частоте в устройствах с безынерционным и инерционным объектами управления при использовании коммутирующего элемента с ограниченной частотой переключений.

Впервые разработан метод параметрического синтеза ИУФС с переключаемыми структурой и параметрами с учетом требований к быстродействию, устойчивости, синхронизму и спектральным характеристикам устройства.

### **Практическая значимость полученных результатов.**

1. Создана инженерная методика проектирования ИУФСП с интегральной импульсной модуляцией, позволяющая проводить анализ и параметрический синтез устройств с учетом дискретных и нелинейных свойств с различными алгоритмами переключения структуры и параметров.

2. Создан пакет программ для автоматизации анализа и параметрического синтеза ИУФСП. Организация вычислений по математическим моделям с различной степенью детализации позволила уменьшить время вычислений при обеспечении достаточной в инженерной практике точности.

3. Пакет прикладных программ «ИУФС 2.11» вошел в состав программного обеспечения, поставляемому по договору № 58 на ФГУП «Салют», г. Москва.

4. Разработанный метод параметрического синтеза применен при разработке блока управления и синхронизации CU2210 квазинепрерывного лазера LF2210, что позволило повысить технические характеристики устройства при снижении затрат на проектирование, изготовление и наладку.

5. Разработанные методы и программные средства анализа и параметрического синтеза ИУФС с переключаемыми структурой и параметрами используются в учебном процессе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

На защиту выносятся следующие научные положения:

математические модели импульсных устройств фазовой синхронизации с переключаемыми структурой и параметрами на основе метода переменных состояния;

универсальная имитационная модель для исследования ИУФС как без переключения, так и с различными алгоритмами переключения в режимах частотного и фазового детектирования с учетом дискретных и нелинейных

свойств;

способ формирования сигнала, пропорционального разности фаз, позволяющий улучшить характеристики импульсно-фазовых детекторов по быстродействию; алгоритмы переключения структуры и параметров ИУФС, позволяющие уменьшить длительность переходного процесса по частоте в устройствах с безынерционным и инерционным объектами управления при использовании коммутирующего элемента с ограниченной частотой переключений;

метод параметрического синтеза ИУФС с переключаемыми структурой и параметрами, позволяющий проводить параметрических синтез ИУФСП с учетом требований к быстродействию, устойчивости, синхронизму и спектральным характеристикам устройства.

**Личный вклад соискателя.** Математические модели ИУФСП на основе метода переменных состояния, а также метод параметрического синтеза ИУФСП с алгоритмами переключения второй группы и алгоритм анализа устойчивости в «малом» были разработаны автором совместно с д.т.н., доцентом Л. Ю. Шилиным; блок управления и синхронизации СУ2210 квазинепрерывного лазера LF2210 разработан совместно с ведущими конструкторами СП «Солар ТИИ» И. В. Хлябой и А. В. Полищуком; остальные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих научно-технических конференциях и семинарах: международная конференция «Наука и образование в условиях социально-экономической трансформации общества», Витебск, 2001 г.; 9-я всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2002», Москва, 2002 г.; 38-я научно-техническая конференция студентов и аспирантов УО «БГУИР» «Информационные технологии и управление», Минск, 2002 г.; 5-я Международная летняя школа-семинар аспирантов и студентов «Современные информационные технологии», Браслав, 2002 г.; 6-я Республиканская научная конференция студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях», Гомель, 2003 г.; 39-я научно-техническая конференция студентов и аспирантов УО «БГУИР» «Информационные технологии и управление», Минск, 2003 г.; 6-я Международная летняя школа-семинар аспирантов и студентов «Современные информационные технологии», Браслав, 2003г.; Международная научно-техническая конференция «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов», Минск, 2003 г.

**Опубликованность результатов.** По результатам диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, из них 5 статей в республиканских и

международных журналах, 3 статьи в сборниках трудов научно-технических конференций, 2 тезисов докладов на научно-технических конференциях, 1 заявка на изобретение. Общий объем опубликованных материалов составляет 41 страницу.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 181 наименования и 3 приложений. Полный объем диссертации составляет 192 страницы, из которых 63 иллюстрации занимают 41,5 страницу, 3 приложения – 44 страницы, список использованных источников – 12 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** охарактеризовано современное состояние исследований импульсных устройств фазовой синхронизации, определены направления диссертационного исследования.

**В первой главе** рассмотрены и проанализированы принципы построения современных ИУФС. Показано, что для преодоления основного противоречия между требованиями к спектральным характеристиками и быстродействию, возникающего при проектировании ИУФС, наряду с традиционным подходом (созданием многопетлевых устройств), начинает развиваться подход, состоящий в использовании ИУФС с переключаемыми структурой и параметрами. Проведен анализ структурных схем ИУФСП, в результате которого предложена обобщенная структурная схема данного класса устройств.

Для анализа ИУФСП предложено использовать математические модели на основе метода переменных состояния.

Опишем алгоритм получения данных моделей на примере устройств с переключаемой структурой. В общем случае сигнал с выхода импульсно-фазового детектора имеет вид:

$$u_0(t) = \begin{cases} u^+(t), t \in [nT, nT + \tau_n^+]; \\ 0, t \in [nT + \tau_n^+, nT + \tau_n^+ + \tau_n^0]; \\ -u^-(t), t \in [nT + \tau_n^+ + \tau_n^0, nT + \tau_n^+ + \tau_n^0 + \tau_n^-]; \\ 0, t \in [nT + \tau_n^+ + \tau_n^0 + \tau_n^-, nT + kT]. \end{cases} \quad (1)$$

При этом фильтрующе-корректирующее звено (ФКЗ) описывается уравнениями состояния вида

$$\begin{cases} \dot{X}_L(t) = A_{1L} X_L(t) + A_{2L} u_0(t); \\ u_\Phi(t) = D_{1L} X_L(t) + d_{2L} u_0(t), \end{cases} \quad (2)$$

где индекс  $L$  указывает на принадлежность к соответствующей структуре.

Для получения математической модели устройства необходимо найти

значения вектора состояния  $X_L(t)$  на каждом из интервалов  $t \in [nT, nT + \tau_n^+]$ ,  $t \in [nT + \tau_n^+, nT + \tau_n^+ + \tau_n^0]$ ,  $t \in [nT + \tau_n^+ + \tau_n^0, nT + \tau_n^+ + \tau_n^0 + \tau_n^-]$ ,  $t \in [nT + \tau_n^+ + \tau_n^0 + \tau_n^-, (n+k)T]$  по формуле

$$X_L(t) = H_L(t - t_0)X_L(t_0) + \int_{t_0}^t H_L(t - \lambda)A_{2L}u_0(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

с учетом алгоритма переключения

$$L = \pi(X(t), t), \quad (4)$$

где  $X(t) = \{X_1(t), X_2(t) \dots X_{L_{\max}}(t)\}$ ,

и дополнить полученные выражения уравнением замыкания:

$$\int_{nT + \tau_n^+ + \tau_n^0}^{(n+k)T + \tau_{n+k}^+ + \tau_{n+k}^0} \omega(t) dt = 2\pi j N, \quad (5)$$

где  $j$  – число импульсов обратной связи на интервале  $[nT + \tau_n^+ + \tau_n^0, (n+k)T + \tau_{n+k}^0]$ ,

$N$  – величина, обратная коэффициенту передачи цепи ОС,

с учетом взаимосвязи выходной частоты устройства и напряжения на выходе ФКЗ:

$$\omega(t) = \omega_y(t) + g(t), \quad (6)$$

где  $\omega_y(t)$ ,  $g(t)$  – соответственно управляемая и неуправляемая составляющие выходной частоты.

Данная математическая модель позволяет исследовать работу устройства с интегральной модуляцией первого и второго рода в режимах частотного и фазового детектирования при различных алгоритмах переключения структуры, а также при совместном переключении структуры и параметров.

На основе математической модели импульсных устройств фазовой синхронизации с переключаемой структурой разработана более эффективная в вычислительном отношении математическая модель ИУФС с переключаемыми параметрами, позволяющая исследовать работу устройства с интегральной модуляцией с учетом дискретных и нелинейных свойств при различных алгоритмах переключения параметров.

В качестве частного случая математической модели ИУФСП получена математическая модель устройства без переключения. Перечислены условия, при которых данная модель может использоваться для приближенного расчета ИУФСП.

**Во второй главе** наряду с математическими моделями на основе метода переменных состояния рассматривается имитационная модель ИУФСП. Необходимость разработки данной модели вызвана тем, что в настоящее время существует достаточно большая номенклатура ИУФС с различной структурой



и схемотехнической реализацией. При этом программные средства, созданные на базе математических моделей на основе метода переменных состояния, не позволяют провести быстрое сравнительное моделирование устройств с различной структурой, так как для каждого варианта структурной схемы приходится разрабатывать свою модель. Временные затраты на создание модели и дальнейшую программную реализацию при сравнительном моделировании различных устройств, когда моделирование каждого из них проводится всего несколько раз, являются неоправданно большими.

Проведенный обзор существующих программных средств для автоматизации проектирования ИУФС показал, что данные программные средства можно разделить на две группы: универсальные, предназначенные для моделирования различных электронных устройств на уровне принципиальных схем; специализированные, предназначенные для расчета систем и устройств фазовой синхронизации. К настоящему времени не существует современных специализированных программ, предназначенных для исследования ИУФС с переключаемой структурой и параметрами с учетом дискретных и нелинейных свойств. Универсальные программные средства могут использоваться для расчета ИУФС, однако в силу своей универсальности и моделирования на принципиальном уровне требуют значительных временных затрат при подготовке схемы к моделированию, а также непосредственно при расчете схемы, что ставит вопрос времени при проведении повторяющихся вычислений (например, при определении полосы захвата).

Построение имитационной модели состоит в составлении математических описаний каждого блока устройства с последующим их объединением с помощью уравнения замыкания, которое имеет вид

$$\varphi_n = K_{OC} \int_{t_{OC_{n-1}}}^{t_{OC_n}} \omega(t) dt = K_{OC} \int_{t_{OC_{n-1}}}^{t_{OC_n}} \omega_n(t) + g(t) dt = 2\pi, \quad (7)$$

при этом выходной сигнал каждого блока в  $m$ -й момент времени зависит от входных сигналов, действующих в этот момент времени, а также от значения переменных, характеризующих результат действия предыдущих входных сигналов.

С целью получения соответствующих математических описаний проведено рассмотрение различных схемотехнических вариантов построения основных блоков, входящих в состав ИУФС, в результате чего получены алгоритмы их имитационного моделирования.

Анализ традиционных принципов построения отдельных блоков ИУФС позволил выявить их недостатки и возможные пути их устранения. В результате был предложен оригинальный (подана заявка на изобретение) способ формирования сигнала, пропорционального разности фаз [11]: в известном способе получения сигнала, пропорционального разности фаз двух

исследуемых сигналов, путем формирования на первом накопительном элементе сигнала, пропорционального временному интервалу от последнего импульса первого исследуемого сигнала, выборки его значения в момент прихода импульса второго исследуемого сигнала и хранения полученного значения на втором накопительном элементе, формирование сигнала, пропорционального временному интервалу от последнего импульса первого исследуемого сигнала и хранение полученного после выборки значения осуществляют в двухтактном режиме как на первом, так и на втором накопительных элементах. В отличие от известных, данный способ позволяет полностью устранить одну из причин уменьшения быстродействия импульсно-фазовых детекторов, использующих накопительный элемент.

Для исследования работы ИУФСЦ в условиях действия шумов в имитационную модель введены два эквивалентных источника шума, причем один из них служит для моделирования шумов, возникающих внутри петли фазовой автоподстройки, второй – для учета действия внепетлевых источников. Для моделирования данных источников сначала генерируется псевдослучайная последовательность чисел из интервала  $[0, 1]$  с равномерным законом распределения, затем по правилу Неймана производится формирование последовательности с заданным законом распределения, математическим ожиданием и дисперсией.

Для реализации вычислений по математическим описаниям отдельных блоков и уравнению замыкания (7) предложен алгоритм имитационного моделирования ИУФСЦ.

На основе предложенного алгоритма в среде Delphi разработана программа имитационного моделирования ИУФСЦ. Программа имеет встроенные математические описание различных схмотехнических реализаций основных блоков ИУФС, а также позволяет разработчику добавлять в программу свои линейные и нелинейные описания.

С помощью разработанной программы проведено сравнительное моделирование устройства с традиционным импульсно-фазовым детектором и устройства с детектором, реализующим предлагаемый способ [11], в результате чего сделан вывод об эффективности предлагаемого способа. С помощью моделей на основе метода переменных состояния проведено сравнительное исследование устройств с триггерным фазовым детектором с переключаемой структурой и переключаемыми параметрами, при этом в качестве алгоритмов переключения использовались алгоритмы, производящие переключения в зависимости от времени или значений элементов вектора состояния. В результате проведенного моделирования был сделан вывод, что при одинаковых требованиях к спектральным характеристикам наилучшим быстродействием из рассмотренных устройств обладают устройства с переключаемой структурой и предварительной установкой начальных значений

переменных состояния, однако реализация подобных устройств на практике вызывает значительное увеличение стоимости. При отсутствии установки начальных значений переменных состояния устройства с переключаемой структурой проигрывают в быстродействии устройствам с переключаемыми параметрами.

Проведенное сравнение результатов моделирования по предложенным моделям с результатами практических измерений показало, что получаемые зависимости имеют расхождение не более пяти процентов; при этом обе модели обеспечивают одинаковую точность вычислений в моменты времени, соответствующие моментам прихода импульсов опорного генератора и обратной связи, имитационная модель позволяет проводить также расчет значений сигналов между этими моментами времени, уступая первой модели в быстродействии.

**В третьей главе** рассматриваются вопросы анализа устойчивости ИУФСП в «малом» и в «большом».

Для унификации процесса анализа устойчивости рассматриваемого класса устройств проведена классификация ИУФСП в зависимости от устойчивости устройства в «малом» в отсутствие переключения и последовательной фиксации активного состояния каждой структуры либо набора параметров.

Для сокращения времени, необходимого для построения областей устойчивости, при сохранении высокой точности вычислений, предлагается двухэтапный алгоритм анализа устойчивости ИУФСП. На первом этапе производится анализ устойчивости устройства без учета действия алгоритма переключения, на втором этапе производится анализ устойчивости с учетом работы коммутирующего устройства. Расчеты для реализации первого этапа анализа устойчивости производятся по линеаризованным моделям; на втором этапе расчет проводится с помощью цифрового моделирования по нелинейным моделям, так как аналитические методы позволяют определить полосы удержания и захвата с фильтрующе-корректирующим звеном не выше первого порядка, и даже при этом приходится вводить упрощающие предположения, в то время как цифровое моделирование позволяет рассчитывать характеристики устройств любого порядка.

Определение полосы захвата для каждой структуры производится путем многократного моделирования переходных процессов при изменяющейся начальной частотной расстройке и фазовом рассогласовании, равном максимальному фазовому рассогласованию, возникающем при переключении с предыдущей структуры; при расчете на наихудший случай фазовой рассогласование принимается равным максимальному рассогласованию из всех, которые могут возникнуть в данном устройстве; для сокращения времени

вычислений определение полосы захвата производится относительно полосы удержания.

При проведении цифрового моделирования для определения полосы захвата требуемые вычислительные затраты в значительной мере определяются алгоритмом определения сходимости переходного процесса. В диссертационной работе предложен новый алгоритм для решения указанной задачи. В отличие от известных, данный алгоритм позволяет учитывать возможность возникновения как однопериодного, так и многопериодного захватов, что упрощает анализ устройства и сокращает требуемые затраты машинного времени.

Для автоматизации исследования устойчивости ИУФСП на базе предложенного двухэтапного алгоритма разработан пакет программ, с помощью которого проведено построение областей устойчивости различных устройств.

Для устройств, устойчивых в «малом» при любой структуре или наборе параметров в отсутствие переключения, проведен сравнительный анализ фазовых портретов с целью выявления условий, при которых минимальны требования к блоку переключения. Показано, что данные требования минимальны при наличии единой устойчивой особой точки на проекциях фазовых траекторий, построенных для каждой структуры или набора параметров; при этом на возможное время переключения накладывается ограничение только снизу, что позволяет в качестве управляющего использовать устройство, осуществляющее переключения структуры либо параметров по фиксированной временной программе.

Рассмотрен вопрос обеспечения устойчивости устройств, не обладающих устойчивостью в отсутствие переключения. Для обеспечения устойчивости данных устройств необходимо производить многократные переключения так, чтобы обеспечить движение изображающей точки в желаемом направлении, при этом в зависимости от направления проекций фазовых траекторий по разные стороны линии переключения можно выделить два случая: с одной стороны линии переключения проекции фазовых траекторий направлены к этой линии, с другой стороны – от линии переключения (фазовые траектории–сонаправленные); проекции всех фазовых траекторий направлены к линии переключения (фазовые траектории–противоположнонаправленные). Показано, что устойчивость устройства, включающем в себя структуры или наборы параметров, которым соответствуют сонаправленные фазовые портреты, может нарушиться с течением времени, например, при увеличении инерционности коммутирующего элемента. Поэтому с практической точки зрения предпочтительнее использовать структуры, которым соответствуют противоположнонаправленные фазовые портреты.

Рассмотрен вопрос влияния быстродействия коммутирующего устройства

на устойчивость ИУФСП. Отмечено, что для устройств, неустойчивых при отсутствии переключения при любой структуре, в случае реального (с конечным быстродействием) коммутирующего элемента не выполняется условие асимптотической устойчивости; в этом случае необходимо использовать понятие практической устойчивости. Приведено выражение для значения  $\varepsilon$ , характеризующего минимальное расстояние изображающей точки на фазовом портрете рассматриваемого устройства от положения равновесия асимптотически устойчивого устройства.

**Четвертая глава** диссертации посвящена параметрическому синтезу ИУФСП.

Отмечено, что как качественные показатели устройства в установившемся режиме, так и длительность переходных процессов во многом зависят от выбора алгоритма переключения структуры и параметров ИУФС; кроме того, алгоритм переключения в значительной степени определяет схемотехническую сложность разрабатываемого устройства.

Предложены новые алгоритмы переключения структуры и параметров ИУФСП. В отличие от известных, данные алгоритмы позволяют уменьшить длительность переходного процесса по частоте при незначительном увеличении длительности переходного процесса по фазе в устройствах с безынерционным и инерционным объектами управления с помощью коммутирующего устройства с конечным быстродействием.

Проведено исследование способа повышения быстродействия импульсных устройств фазовой синхронизации с помощью предварительной установки частоты, в результате которого для дальнейшего увеличения быстродействия предложено совместное использование предварительной установки частоты и переключения постоянных времени знаменателя передаточной функции фильтрующе-корректирующих звеньев. Процесс выбора требуемых постоянных времени проиллюстрирован числовым примером. Показано, что не всегда уменьшение постоянных времени знаменателя передаточной функции ФКЗ приводит к уменьшению длительности переходного процесса; проведен анализ причин этого явления.

Проведена классификация существующих и предложенных алгоритмов переключения в зависимости от цели использования алгоритма, времени, в течение которого происходят переключения, способа реализации. В зависимости от времени, в течение которого в ИУФС происходят переключения структуры и параметров, алгоритмы переключения были разделены на две группы: алгоритмы, согласно которым переключение структуры и параметров происходит только во время протекания переходных процессов; алгоритмы, согласно которым переключение структуры и параметров происходит как во время протекания переходных процессов, так и в

установившемся режиме.

Предложены методы синтеза ИУФСП с алгоритмами переключения, относящимся к первой и второй группам. Отметим, что алгоритмы первой группы позволяют преодолеть противоречие между требованиями к спектральным характеристикам и требованиям к быстродействию путем разделения их между различными структурами либо наборами параметров. Структурная схема, описывающая метод синтеза с алгоритмом переключения первой группы, приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структура процесса параметрического синтеза ИУФСП с алгоритмом переключения первой группы

В соответствии с данным методом проектирование ИУФСП производится в четыре этапа. На первом этапе производится выбор параметров устройства с первой структурой либо набором параметров (блок 3), при этом основной задачей является обеспечение выполнения требований технического задания по качественным характеристикам выходного сигнала в установившемся режиме. При успешном окончании первого этапа происходит формирование ограничений на параметры устройства со второй структурой либо набором параметров, что необходимо для обеспечения желаемого поведения устройства в режиме переключений. На втором этапе с учетом этих ограничений производится выбор параметров устройства со второй активной структурой (блок 5), при этом основное внимание уделяется выполнению требований технического задания по быстродействию. На третьем этапе (блок 6, 7) производится целостный

анализ устройства и уточнение параметров. После успешного завершения третьего этапа происходит переход к четвертому, на котором осуществляется переход от структурной к принципиальной схеме устройства и

документирование параметров. Алгоритмы переключения второй группы не позволяют провести разделение требований к спектральным характеристикам ИУФСП и требований к быстродействию между различными структурами либо наборами параметров. Параметрический синтез ИУФСП с данными алгоритмами переключения выполняется в три этапа. На первом этапе синтеза производится предварительный выбор параметров всех структур, входящих в ИУФСП, по линеаризованным моделям, при этом проверяются условия выполнения условий устойчивости и обеспечения требуемых качественных характеристик выходного сигнала. На втором этапе производится коррекция значений, найденных на первом этапе, по нелинейным моделям, при этом проверяется выполнение требований технического задания к быстродействию. На третьем этапе параметрического синтеза осуществляются переход от структурной к принципиальной схеме устройства и документирование параметров.

При переходе от структурной к принципиальной схеме ИУФСП следует учитывать тот факт, что в настоящее время многие функциональные блоки устройства, такие как импульсно-фазовые детекторы, управляемые генераторы, реализованы в виде интегральных схем (ИС); в большинстве практических случаев разработчик может не проектировать данные блоки с использованием дискретных элементов, а остановить свой выбор на ИС с требуемыми параметрами. Такой подход значительно упрощает реализацию ИУФС при достижении высоких технических характеристик, однако затрудняет реализацию алгоритма переключения в данных блоках, поэтому для реализации переключения наиболее широко используются ФКЗ с переключаемыми структурой и параметрами (ФКЗП). Второй причиной, по которой переключение вводится в блок ФКЗ, является то, что данный блок является одним из наиболее инерционных блоков ИУФС.

Отмечено, что хотя синтез ФКЗ с переключаемой структурой может осуществляться путем последовательной реализации каждой из структур по известным коэффициентам передаточной функции с помощью методов, разработанных для синтеза ФКЗ без переключения и последующим параллельным включением полученных звеньев, однако такой подход является схемотехнически избыточным, особенно при синтезе ФКЗ с переключаемыми параметрами (ФКЗПП).

Для устранения указанного недостатка предложен метод параметрического синтеза принципиальной схемы ФКЗП. Синтез принципиальной схемы ФКЗП проводится в четыре этапа. На первом этапе по виду передаточной функции производится построение принципиальной схемы на основе типовых звеньев без переключения. На втором этапе производится расчет коэффициентов передаточной функции в символьном виде и выбор места включения коммутирующего элемента. На третьем этапе производится

просчет значений целевой функции в  $k$  точках, выбранных в допустимой области номиналов элементов при помощи ЛП-т последовательности, по формуле:

$$f^k = 100 \left( \sum_{i=1}^n \left| \frac{b_{\alpha i}^k}{b_{\alpha i}} - 1 \right| + \sum_{j=1}^m \left| \frac{a_{\sigma j}^k}{a_{\sigma j}} - 1 \right| + \sum_{i=1}^n \left| \frac{b_{\pi i}^k}{b_{\pi i}} - 1 \right| + \sum_{j=1}^m \left| \frac{a_{\eta j}^k}{a_{\eta j}} - 1 \right| \right), \quad (8)$$

после чего производится сокращение области поиска. На четвертом этапе производится минимизация целевой функции (8) методом Хука-Дживса.

Для автоматизации вычислений по указанному методу разработан пакет программ, позволяющий не только синтезировать принципиальную схему ФКЗП по полученной на предыдущих этапах параметрического синтеза ИУФС передаточной функции, но и вводить переключение в уже существующие ФКЗ, заданные принципиальной схемой.

С помощью предлагаемого метода параметрического синтеза ИУФСП разработан блок управления и синхронизации CU2210 квазинепрерывного лазера LF2210; устройство фазовой синхронизации, входящее в состав данного блока, обладает следующими техническими характеристиками:

1. Частота входного сигнала может принимать одно из следующих значений: 500 кГц, 1 МГц, 2 МГц, 2,5 МГц, 5МГц, 10 МГц.
2. Устройство должно обеспечивать две выходные частоты: 50 МГц, 1 МГц.
3. Форма входного и выходного сигналов – прямоугольная.
4. Напряжение входного сигнала высокого уровня – не более 10 В.
5. Напряжение входного сигнала низкого уровня – не менее -10 В.
6. Напряжение выходного сигнала высокого уровня – не более 5 В.
7. Напряжение выходного сигнала низкого уровня – не менее -5 В.
8. Напряжение гистерезиса на входе –  $\pm 0,25$  В.
6. Дисперсия выходного сигнала с частотой 50 МГц – не нормируется.
7. Среднеквадратическое отклонение фазы выходного сигнала с частотой 1 МГц  $-2,6 \cdot 10^{-9}$  рад.
8. Блок осуществляет «привязку» импульса сигнала «запуск» к сигналу с частотой 1 МГц.
9. Частота импульсов сигнала «запуск» –  $1 \div 15000$  Гц.
10. Интервал задержки импульсов сигнала «запуск» относительно импульса сигнала частоты 1МГц регулируется в пределах, определяемых формулой
 
$$\left( -\frac{10^6}{2F_3} + 5 \right) \div \left( \frac{10^6}{2F_3} - 15 \right).$$
11. Входное и выходное сопротивления устройства – 50 Ом.
12. Длительность переходного процесса –  $\leq 0.5$  мс.
13. Питание блока осуществляется от сети переменного тока напряжением 220( $\pm 10\%$ ) В с частотой 50/60 Гц.



14. Диапазон рабочих температур – от 10°C до 35°C при относительной влажности до 85%.

На рис. 2 а и б для разработанного устройства приведены, соответственно, график зависимости выходной частоты от времени в переходном режиме, построенный с помощью математического моделирования, а также результаты практических измерений (на рис. 2, б масштабы составляют 0,1мс/дел, 10 МГц/дел); на рис. 3 представлена область устойчивости устройства.

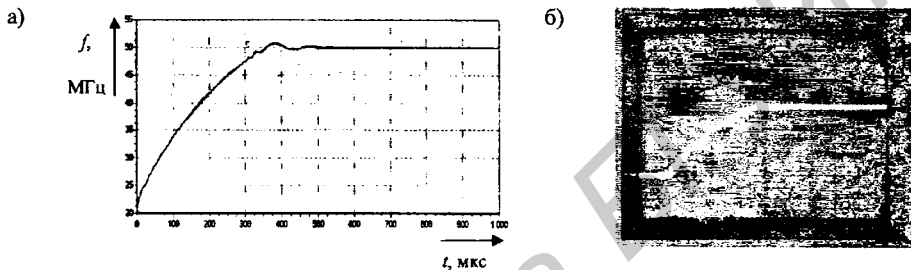


Рис. 2. Зависимость выходной частоты в переходном режиме

Проведен сравнительный анализ разработанного устройства с устройством без переключения, имеющего такие же спектральные характеристики выходного сигнала и спроектированным по традиционной методике. Показано, что применение ИУФС с переключаемыми параметрами в данном случае позволило в более чем пять раз уменьшить длительность переходного процесса при незначительном схемотехническом усложнении устройства.

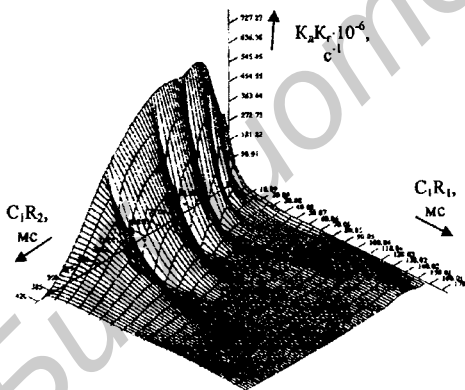


Рис. 3. Область устойчивости устройства

Приложения содержат листинги программ имитационного моделирования ИУФС, автоматизации синтеза ФКЗП, а также акты внедрения результатов диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью и очерченным кругом задач получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана эффективная в вычислительном отношении математическая модель импульсных устройств фазовой синхронизации с переключаемыми структурой и параметрами на основе метода переменных состояния. В отличие от известных, данная модель является высокоточной машинно-ориентированной моделью, позволяющей исследовать ИУФСП с различными алгоритмами переключения в режимах частотного и фазового детектирования с учетом дискретных и нелинейных свойств устройства [5, 6, 7, 8].

2. Разработана универсальная имитационная модель импульсных устройств фазовой синхронизации. В отличие от известных, данная модель позволяет проводить исследование ИУФС как без переключения, так и с различными алгоритмами переключения структуры и параметров, в режимах частотного и фазового детектирования, учитывать нелинейности отдельных блоков устройства, действие вне- и внутриспетлевых источников шумов [2, 6].

3. Предложен оригинальный (подана заявка на изобретение) способ формирования сигнала, пропорционального разности фаз. В отличие от известных, данный способ полностью устраняет одну из причин уменьшения быстродействия импульсно-фазовых детекторов, использующих накопительный элемент. Разработаны алгоритмы переключения структуры и параметров ИУФС. В отличие от известных, данные алгоритмы позволяют уменьшить длительность переходного процесса по частоте в устройствах с безынерционным и инерционным объектами управления при использовании коммутирующего элемента с ограниченной частотой переключений [3,4,11].

4. Разработан метод параметрического синтеза ИУФС. В отличие от известных, данный метод позволяет проводить параметрический синтез ИУФС с различными алгоритмами переключения структуры и параметров, учитывать требования к синхронизму, устойчивости, быстродействию и спектральным характеристикам устройства, а также осуществлять переход от структурной к принципиальной схеме ИУФСП [1, 4, 9, 10].

С использованием предложенных моделей, методов и алгоритмов был создан блок управления и синхронизации CU2210 квазинепрерывного лазера LF2210, внедренный на СП «Солар ТИИ», разработан пакет прикладных программ «ИУФС 2.11», вошедший в состав программного обеспечения, поставленного на ФГУП «Салют». Результаты диссертационной работы также используются в учебном процессе БГУИР на кафедре ТОЭ в курсах «Основы автоматизированного проектирования электрических цепей», «Проектирование электрических цепей на ПЭВМ».

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в журналах*

1. Дерюшев А. А., Шилин Л. Ю. Синтез фильтрующе-корректирующих звеньев с изменяемой передаточной функцией для импульсных устройств фазовой синхронизации // Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ. – Энергетика. – 2002. – № 4. – С. 34–38.
2. Дерюшев А. А., Шилин Л. Ю. К вопросу имитационного моделирования импульсно-фазовых систем // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – № 1(13)/2. – С. 241–243.
3. Дерюшев А. А. Алгоритм изменения структуры импульсных устройств фазовой синхронизации // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – № 1(15)/2. – С. 148–150.
4. Дерюшев А. А. Способы повышения быстродействия импульсных устройств фазовой синхронизации // Доклады БГУИР. – 2003. – Т.1, № 4. – С. 131–137.
5. Дерюшев А. А., Шилин Л. Ю. Анализ импульсных устройств фазовой синхронизации с накачкой заряда // Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ. – Энергетика. – 2004. – № 2. – С. 21–28.

### *Статьи в сборниках трудов научно-технических конференций*

6. Дерюшев А. А., Шилин Л. Ю. Математические модели импульсно-фазовых систем управления // Наука и образование в условиях социально-экономической трансформации общества: Сборник докладов международной научной конференции / Ин-т современных знаний. – Витебск, 2001. – С. 459–461.
7. Дерюшев А. А., Шилин Л. Ю., Столбанов Н. А. Анализ импульсных устройств фазовой синхронизации с отключаемым сигналом управления // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: Материалы Международной НТК / Белорусский государственный технологический университет. – Мн., 2003. – С. 62–65.
8. Дерюшев А. А., Шилин Л. Ю., Столбанов Н. А. Анализ импульсных устройств фазовой синхронизации с изменяемой передаточной функцией // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: Материалы Международной НТК / Белорусский государственный технологический университет. – Мн., 2003. – С. 60–62.

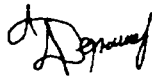
### *Тезисы докладов научно-технических конференций*

9. Дерюшев А. А. Автоматизация проектирования фильтрующе-корректирующих звеньев с ~~изменяемой~~ передаточной функцией // Микроэлектроника и информатика. – 2002. Тезисы докладов, Зеленоград, 17–18 апр. 2002 г. / Моск. гос. ин-т электронной техники – М. 2002. – С. 63.

10. Дерюшев А. А. Синтез импульсно-фазовых устройств с изменяемой передаточной функцией // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Материалы VI Республиканской научной конференции студентов и аспирантов/ Гомельский гос. ун-т. им. Ф. Скорины. – Гомель, 2003. – С. 19–20.

*Заявка на изобретение*

11. Способ формирования сигнала, пропорционального разности фаз: Заявка на изобр. № А 20030182 ВУ, МПК 7 Н03 D 13/00 / Дерюшев А.А. – Заявл. 28.02.2003; Оpubл. 30.09.2003 // Афіцыйны бюлетэнь / Нацыянальны центр інтэлектуальнай уласнасці. – 2003. – № 3. – С. 67–68.



ДЗЕРУШАЎ Андрэй Анатольевіч

## АНАЛІЗ І ПАРАМЕТРЫЧНЫ СІНТЭЗ ІМПУЛЬСНЫХ ПРЫЛАД ФАЗАВАЙ СІНХРАНІЗАЦЫІ З ПЕРАКЛЮЧАЛЬНЫМІ СТРУКТУРАЙ І ПАРАМЕТРАМІ

Ключавыя словы: імпульсныя прылады фазавай сінхранізацыі, пераключальная структура і параметры, лічбавае мадэляванне, аналіз, параметрычны сінтэз.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца імпульсныя прылады фазавай сінхранізацыі (ІПФС) з інтэгральнай мадуляцыяй. Прадметам даследавання з'яўляецца выкарыстанне ў ІПФС пераключальных структуры і параметраў для паліпшэння хуткадзейння і якасных характарыстык прылад.

Мэтай работы з'яўляецца распрацоўка машынна-арыентаваных метадаў аналізу і параметрычнага сінтэзу імпульсных прылад фазавай сінхранізацыі з пераключальнымі структурай і параметрамі (ІПФСП).

Распрацаваны матэматычныя мадэлі ІПФСІ на аснове метаду пераменных стану. У адрозненне ад вядомых, гэтыя мадэлі з'яўляюцца высокакакладнымі машынна-арыентаванымі мадэлямі, якія дазваляюць даследаваць ІПФСП з рознымі алгарытмамі пераключэння ў рэжымах частотнага і фазовага дэтэктавання з улікам дыскрэтных і нелінейных якасцей прылады. Створана ўніверсальная імітацыйная мадэль ІПФС, якая, у адрозненне ад вядомых, дазваляе праводзіць даследаванне ІПФС як без пераключэння, так і з рознымі алгарытмамі пераключэння структуры і параметраў, у рэжымах частотнага і фазовага дэтэктавання, улічваюць нелінейнасці асобных блокаў прылады, дзейнасць па-за- і ўнутрыпетлявых крыніц шумоў. Прадстаўлен арыгінальны (паdana заяўка на вынаходніцтва) спосаб фарміравання сігналу, прапарцыянальнага рознасці фаз, а таксама алгарытмы пераключэння структуры і параметраў ІПФСП. Распрацаваны метады параметрычнага сінтэзу ІПФСП. У адрозненне ад вядомых, метады дазваляе праводзіць параметрычны сінтэз ІПФС з рознымі алгарытмамі пераключэння, улічваюць патрабаванні да хуткадзейння, устойлівасці, сінхранізму і спектральных характарыстык прылады, а таксама ажыццяўляць пераход ад структурнай да прынцыповай схемы ІПФСП.

З выкарыстаннем распрацаваных мадэлей, метадаў і алгарытмаў быў створаны блок кіравання і сінхранізацыі CU2210 лазера LF2210, які ўжываецца на СП «Салар ТП»; распрацавана праграмае забеспячэнне для ФДУП «Салют»; вынікі працы таксама выкарыстоўваюцца ў вучэбным працэсе Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта інфарматыкі і радыёэлектронікі.

ДЕРЮШЕВ Андрей Анатольевич

## АНАЛИЗ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ С ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫМИ СТРУКТУРОЙ И ПАРАМЕТРАМИ

Ключевые слова: импульсные устройства фазовой синхронизации, переключаемая структура и параметры, цифровое моделирование, анализ, параметрический синтез.

Объектом исследования являются импульсные устройства фазовой синхронизации с интегральной модуляцией. Предметом исследования является использование в ИУФС переключаемых структуры и параметров для улучшения быстродействия и качественных характеристик устройства.

Целью работы является разработка машинно-ориентированных методов анализа и параметрического синтеза импульсных устройств фазовой синхронизации с переключаемыми структурой и параметрами (ИУФСП).

Разработаны математические модели ИУФСП на основе метода переменных состояния. В отличие от известных, данные модели являются высокоточными машинно-ориентированными моделями, позволяющими исследовать ИУФСП с различными алгоритмами переключения в режимах частотного и фазового детектирования с учетом дискретных и нелинейных свойств устройства. Создана универсальная имитационная модель ИУФС. В отличие от известных, данная модель позволяет проводить исследование ИУФС как без переключения, так и с различными алгоритмами переключения структуры и параметров, в режимах частотного и фазового детектирования, учитывать нелинейности отдельных блоков устройства, действие вне- и внутриспетлевых источников шумов. Предложен оригинальный (подана заявка на изобретение) способ формирования сигнала, пропорционального разности фаз; алгоритмы переключения структуры и параметров ИУФСП. Разработан метод параметрического синтеза ИУФСП. В отличие от известных, данный метод позволяет проводить параметрический синтез ИУФС с различными алгоритмами переключения, учитывать требования к быстродействию, устойчивости, синхронизму и спектральным характеристикам устройства, а также осуществлять переход от структурной к принципиальной схеме ИУФСП.

С использованием предложенных моделей, методов и алгоритмов был создан блок управления и синхронизации CU2210 лазера LF2210, внедренный на СП «Солар ТИИ», разработано программное обеспечение для ФГУП «Салют»; результаты работы также внедрены в учебный процесс Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

## SUMMARY

DERYUSHEV Andrei Anatolyevich

THE ANALYSIS AND PARAMETRICAL SYNTHESIS OF PULSE PLL  
WITH SWITCHED STRUCTURE AND PARAMETERS

Key words: pulse PLL, switched structure and parameters, digital modeling, the analysis, parametrical synthesis.

The thesis deals with pulse phase-locked loops (PPLL) with combined modulation, which are the object under investigations. It focuses on the use in PPLL switched structure and parameters for improvement of speed and qualitative characteristics of the device.

The objective of work is the development of the machine-oriented methods of the analysis and parametrical synthesis of switched PPLL (SPPLL).

Mathematical models SPPLL are developed on the basis of a method of state variables. As contrary to known, the given models are the precision machine-oriented models, allowing investigating SPPLL with various algorithms of switching in modes of frequency and phase detecting in view of discrete and nonlinear properties of the device.

Universal simulation model SPPLL is developed. In comparison to known, the model allows to carry out research PPLL both without switching, and with various algorithms of switching structure and parameters, modes of frequency and phase detecting, to take into account nonlinearity of separate blocks of the device, action of external of and intraloopback sources of noise.

The original way of formation of the signal proportional to a difference of phases is offered (the application for the invention has been sent). Algorithms of switching structure and parameters SPPLL are developed.

The method of parametrical synthesis SPPLL is developed. As contrary to known, the given method allows to carry out parametrical synthesis SPPLL with various algorithms of switching, to take into account requirements to speed, stability, to synchronism and spectral characteristics of the device, and also to carry out transition from structural to basic circuit SPPLL.

With the use of the models, methods and algorithms suggested the control unit CU2210 of laser LF2210, introduced on the joint venture «Solar TII» has been created, the software for FSUP "Salute" is developed; the results of work also are introduced into educational process of the Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

ДЕРЮШЕВ Андрей Анатольевич

**АНАЛИЗ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ  
ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ  
С ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ СТРУКТУРОЙ И ПАРАМЕТРАМИ**

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать	12.05.2004.	Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная.	Печать ризографическая.	Усл. печ.л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,2.	Тираж 80 экз.	Заказ 305.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Лицензия ЛВ №509 от 03.08.2001. Лицензия ЛП №156 от 30.12.2002.

220013, Минск, П. Бровка, 6.