

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Невинномысский технологический институт (филиал)

---

Кафедра информационных систем, электропривода и автоматики

# **АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

методические указания к выполнению лабораторных работ  
для студентов направления подготовки

15.04.04 — Автоматизация технологических процессов и  
производств

Невинномысск 2023

Методические указания составлены в соответствии с требованиями ФГО ВО по направлению подготовки 15.04.04 — Автоматизация технологических процессов и производств.

Методические указания позволяют закрепить изучаемые теоретические вопросы постановки задач синтеза адаптивных регуляторов, построения моделей элементов систем управления и оценок их параметров.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

### «Экстремальная система автоматического регулирования»

**Цель работы** заключается в анализе переходных процессов в системе экстремального регулирования при изменении параметров регулятора. Качество установления экстремума определяется спомощью потерь на рысканье (потерь на поиск).

**Системой экстремального регулирования** называются системы, в которых задающие воздействия, т. е. заданные значения регулируемых величин, определяются автоматически в соответствии с экстремумом управляемой функции  $F(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ . Здесь не случайно регулируемая величина представлена в зависимости от многих координат системы, а не от одной. Дело в том, что алгоритм экстремального регулирования наиболее часто применяется для сложных объектов управления, управляемых по нескольким координатам. В этом случае  $F$  называют функцией цели управления. Например,  $F$  может быть экономическим показателем процесса - себестоимостью продукции. Экстремум функции  $F$  является неизвестным и непостоянным, так как и его величина и положение на статической характеристике объекта все время изменяются, поэтому экстремальные системы являются **нестационарными**. Недостаток априорной информации восполняется за счет текущей информации, получаемой в виде анализа реакции объекта на искусственно вводимые пробные воздействия.

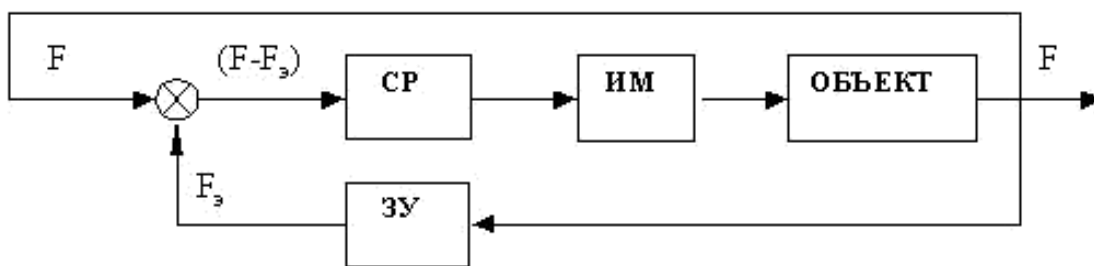
Наличие пробных движений - обязательная черта экстремальных систем.

В настоящее время разработано большое количество экстремальных систем. Движение к состоянию экстремума регулируемой функции  $F$  в этих системах осуществляется с помощью методов:

- слепого координатного поиска (в частности метода Гаусса-Зейделя),
- градиентного поиска,
- наискорейшего поиска.

Анализ и синтез экстремальных систем проводят в так называемом **квазистационарном режиме**. Этот режим можно искусственно создать, выбирая частоты пробных воздействий много больше частот изменения рабочих управляемых координат, а постоянные времени сглаживающих фильтров выбирая заведомо большими. В этом случае управляемая функция  $F$  изменяется во времени медленнее, чем от изменения рабочих управляемых координат.

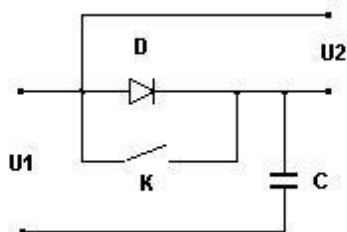
В лабораторной работе рассматривается одномерная система экстремального регулирования, работающая **по способу запоминания экстремума**.



Система действует следующим образом. На вход объекта подается пробное воздействие и оценивается значение управляемой функции  $F$ . Определяются те воздействия, которые приближают  $F$  к экстремуму. Затем прикладываются рабочие воздействия к объекту и т. д. После прохождения точки экстремума  $F$  происходит реверс на входе объекта и начинаются колебания системы вокруг этой точки. В непрерывных экстремальных системах поисковые и рабочие воздействия производятся одновременно.

Выходная величина объекта  $F$  подается на запоминающее устройство ЗУ экстремального регулятора. Пусть имеем экстремум-максимум и запоминание происходит только при увеличении  $F$ . На уменьшение  $F$  запоминающее устройство не реагирует. Сигнал с ЗУ непрерывно подается на элемент сравнения и затем сигнал разности  $(F - F_э)$  поступает на сигнум-реле СР и далее на исполнительный механизм ИМ. При срабатывании реле запомненное значение  $F$  сбрасывается, и запоминание  $F$  начинается снова.

Например, если  $F$  является электрической величиной, то схема запоминающего устройства может быть такой:



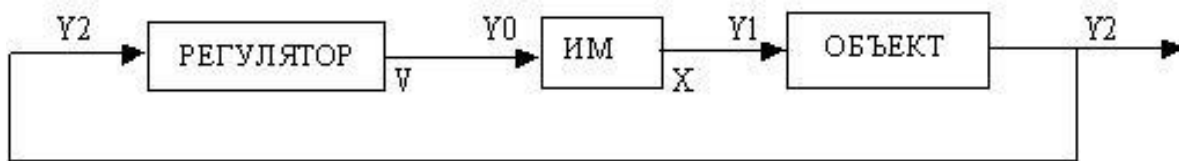
Напряжение  $U1$ , пропорциональное выходу объекта, подается на запоминающий конденсатор  $C$  через диод  $D$ . Диод шунтирован контактом сигнум-реле, который замыкается при срабатывании.

При увеличении  $U1$  диод пропускает входное напряжение, заряжая конденсатор до напряжения  $U1$ .

Когда экстремум-максимум достигнут и напряжение  $U1$  начинает уменьшаться, то диод запирается, появляется напряжение  $U2$  на выходе схемы, которое пропорционально разности  $dF = (F - F_э)$ . Когда  $dF$  превысит зону нечувствительности сигнум-реле, происходит его срабатывание и реверс исполнительного механизма. При этом контакты  $K$  реле замыкаются и происходит сброс запомненного значения  $F$ . Конденсатор снова заряжается до текущего значения  $F$ , и цикл работы повторяется.

Обобщенная структурная схема исследуемой системы представлена на

рисунке:



### Содержание работы.

1. Определить потери на поиск в переходном процессе экстремальной системы с параметрами:  $K=1$ ;  $T1=1c$ ;  $V=1$ ; зона нечувствительности  $D = 0.5$ . при изменении коэффициента усиления регулятора  $Kr$ . Найти среднее значение потерь на поиск.

2. Выполнить пункт 1 для этой же системы при изменении зоны нечувствительности регулятора  $D$ .

3. Выводы отразить в отчете по работе.

### Вопросы для самоподготовки:

1. Что называют потерями на поиск? Как они рассчитываются? Покажите на графике время переходного процесса в экстремальной системе.

2. Что называют квацистационарным режимом работы экстремальной системы? Этот режим создается реально в системе при проектировании или это математический формализм, удобный для анализа системы.

3. Представьте математическую модель системы в форме Коши.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### «Самонастраивающаяся система регулирования с эталонной моделью»

**Цель работы:** исследование качества адаптации самонастраивающейся системы (СНС) с эталонной моделью.

Необходимость применения адаптивных принципов управления возникает в тех случаях, когда диапазон изменения свойств объекта и внешних возмущений так велик, что показатели качества выходят за пределы заданных ограничений. А между тем любая неадаптивная система, работающая по принципу обратной связи, в силу этого принципа способна нейтрализовать изменения параметров объекта и среды в довольно больших пределах. И эти способности можно расширить, не прибегая к принципу адаптации.

Расширение функциональных возможностей неадаптивных систем управления с обратной связью, приближающее их по свойствам к адаптивным системам, возможно:

- с помощью увеличения коэффициентов усиления систем до бесконечности без нарушения устойчивости,

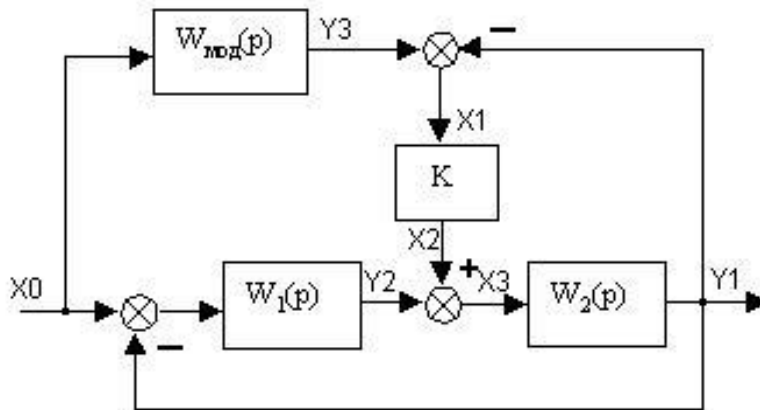
- вс помощью введения автоколебательных скользящих режимов в релейных системах,

- с помощью систем с переменной структурой регулятора. Такие системы управления называют иногда системами с пассивной адаптацией.

Самонастраивающиеся системы с эталонной моделью также являются системами с подобного рода адаптацией, использующей скользящий режим работы релейного регулятора. Техническую реализацию скользящего режима мы пока не затрагиваем, этот вопрос будет рассмотрен в Работе №8. Пока будем считать, что в нашем распоряжении есть усилитель регулятора с очень большим коэффициентом усиления.

Самонастраивающиеся системы с эталонной моделью фактически представляют собой безпоисковые СНС с замкнутым контуром самонастройки, но, в отличие от СНС с настраиваемой моделью, здесь сигнал самонастройки не изменяет параметры настройки регулятора, как требует принцип адаптации, а формируется определенным образом и подается на вход объекта.

Структурная схема такой системы может быть представлена в следующем виде:



Модель  $W_{\text{мод}}(p)$  является физическим устройством, реализованным в аналоговом или цифровом виде, и на вход ее подаются те же воздействия, что и на объект управления. Выходы объекта и модели вычитаются и разность их (ошибка контура настройки) подается на вход объекта через усилитель с большим коэффициентом усиления  $K$ .

Хотя сигнал разбаланса контура самонастройки в этой системе не воздействует непосредственно на параметры настройки регулятора  $W_1(p)$ , а подается на вход объекта, можно показать, что оба эти варианта являются равносильными.

В теории СНС различают два вида моделей - настраиваемые и эталонные. При настраиваемых моделях их параметры меняются в процессе идентификации до тех пор, пока сигналы с выходов объекта и модели не сравниваются. Если же задается эталонная модель процесса, то разность сигналов с выходов объекта и модели служит для изменения параметров регулятора, при которых качество процесса наконец станет соответствовать желаемому, заданному эталонной моделью.

Найдем передаточную функцию замкнутой системы. Уравнения звеньев, согласно схемы системы, имеют вид:

$$Y_2 = W_1(p) * (X_0 - Y_1);$$

$$Y_3 = W_{\text{мод}}(p) * X_0;$$

$$X_1 = Y_3 - Y_1;$$

$$X_2 = K * X_1;$$

$$X_3 = Y_2 + X_2;$$

$$Y_1 = W_2(p) * X_3;$$

Исключая промежуточные переменные, находим передаточную функцию системы:

$$\Phi(p) = \frac{Y_1(p)}{X_0} = \frac{W_1(p) \cdot W_2(p) + K \cdot W_2(p) \cdot W_{\text{мод}}(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) + K \cdot W_2(p)} \quad (1)$$

Если считать, что  $K=K_3$  достаточно велико, а лучше всего  $K_3$  стремится к бесконечности, тогда:

$$Y_1 \approx W_{\text{мод}}(p) * X_0 \quad (2)$$

то есть качество переходного процесса не зависит от медленноменяющихся параметров объекта, а определяется заданной эталонной моделью  $W_{\text{мод}}(p)$ .

Качество настройки в такой системе будет зависеть от того, насколько большим можно взять коэффициент усиления  $K_3$ , чтобы не вызвать неустойчивости системы. Поэтому желательно выбрать  $W_{\text{мод}}(p)$  так, чтобы условия устойчивости при бесконечно большом коэффициенте  $K_3$  выполнялись.

В настоящей лабораторной работе исследуется система с эталонной моделью следующего вида:

передаточная функция объекта задана:

$$W_2(p) = \frac{K_2}{p \cdot (T_2 \cdot p + 1)}$$

передаточная функция регулятора:

$$W_1(p) = \frac{K_1}{(T_1 \cdot p + 1)}$$

передаточная функция эталонной модели выбрана в виде:

$$W_{\text{мод}}(p) = \frac{K_4}{(T_4 \cdot p + 1)}$$

функции адаптера в контуре самонастройки выполняет усилитель с коэффициентом усиления  $K_3$ .

### Содержание работы

1. Определить переходный процесс в системе без включения эталонной модели. Параметры объекта и регулятора рекомендуются следующие:

$$K_{об} = 1; T_{об} = 0.3; K_r = 1; T_r = 1;$$

Выявить зависимость качества регулирования от изменения параметров объекта регулирования ( $K_{об}$  или  $T_{об}$ ), вызванных внешними возмущениями.

2. Настроить контур самонастройки на приемлемое качество самонастройки, увеличивая коэффициент усиления контура  $K_3$ .



3. Определить переходный процесс в этой же системе при включении контура самонастройки и эталонной модели с параметрами:

$$K_m = 1; T_m = 0.3;$$

при тех же изменениях параметров объекта, вызванных внешними возмущениями. Добиться наилучшей адаптации системы к внешним возмущениям.

### **Вопросы для самоподготовки:**

1. Каковы основные недостатки адаптивных систем данного типа? Насколько легко практически реализовать данный алгоритм?

2. Как по-вашему можно реализовать усилитель с очень большим коэффициентом усиления?

3. Существуют ли какие-то ограничения на параметры эталонной модели, или их можно задавать сколь угодно малыми?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

### «Исследование систем с переменной структурой»

Системы с переменной структурой (СПС) являются отдельным классом адаптивных систем, называемым иногда **САМООРГАНИЗУЮЩИМИСЯ** системами. Управляющее устройство СПС имеет несколько структур, реализующих различные законы регулирования. В процессе работы под действием определенных команд происходит подключение к объекту этих структур в определенной последовательности. В результате система в целом приобретает свойства, которых она не могла бы иметь при работе с фиксированной структурой управляющего устройства. Этим можно воспользоваться для существенного улучшения качества регулирования или для сохранения неизменным показателя качества в адаптивных системах.

Анализ работы СПС проводят методом фазовой плоскости в координатах ошибки регулирования  $X_1$  и ее производной  $X_2$ . В этом фазовом пространстве выделяют гиперповерхность, проходящую через начало координат и пересекающую фазовую плоскость по определенным линиям (линиям переключения). Эта гиперповерхность называется **ГИПЕРПОВЕРХНОСТЬЮ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ**. Всякий раз, когда изображающая точка попадает на гиперповерхность, происходит переключение структур в управляющем устройстве. Логiku переключения всегда можно подобрать так, чтобы в результате нескольких переключений устанавливался устойчивый режим работы.

В практике синтеза СПС наиболее интересно направление по созданию **ИСКУССТВЕННЫХ ГИПЕРПОВЕРХНОСТЕЙ**.

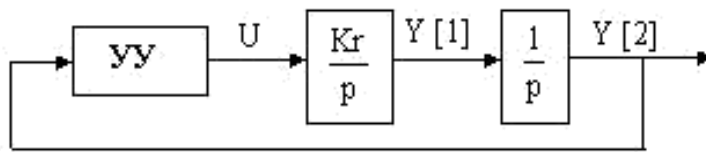
Когда структуры и их параметры подбираются таким образом, чтобы фазовые траектории изображающей точки в окрестности гиперповерхности располагались так, чтобы изображающая точка, раз попав на гиперповерхность, уже не могла ее покинуть и, двигаясь по ней в соответствии с ее дифференциальным уравнением, приходила бы в стационарное состояние. Такой режим называют идеально **СКОЛЬЗЯЩИМ**, вы познакомились с ним в третьей лабораторной работе. В скользящем режиме переключение структур происходит с большой частотой, а движение изображающей точки уже не зависит от параметров переключаемых структур и определяется только уравнением гиперповерхности.

**ЦЕЛЮЮ РАБОТЫ** является: изучение качества регулирования СПС в зависимости от параметров переключаемых регуляторов и от уравнения гиперповерхности переключения.

Мы рассматриваем работу объекта второго порядка, управляемого идеальным регулятором пропорционального или интегрального типа. В зависимости от свойств управляемого объекта фазовые портреты систем будут различные.

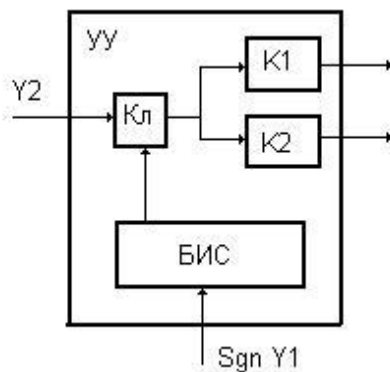
**СИСТЕМА 1** состоит из астатического объекта и астатического регулятора, следовательно в такой фиксированной структуре является

структурно-неустойчивой:



Так как корни характеристического уравнения системы являются чисто мнимыми, то фазовый портрет представляет собой эллипс с центром в начале координат. Направление большей полуоси эллипса зависит от коэффициента усиления регулятора.

Предположим, что структура управляющего устройства имеет вид:



где  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты усиления регулятора ( пусть  $K_1 > K_2 > 0$ );  $K_л$  - управляемый ключ; БИС – блок изменения структуры.

БИС управляет переключением структур с коэффициентами  $K_1$  и  $K_2$  в зависимости от информации о состоянии системы.

Допустим также, что информация о состоянии системы не является полной, мы можем измерять только сигнал ошибки  $Y[2]$  и знак ее производной  $Sgn Y[1]$ .

Линиями переключения структур будут оси координат фазовой плоскости.

Уравнения движения системы будут иметь следующий вид:

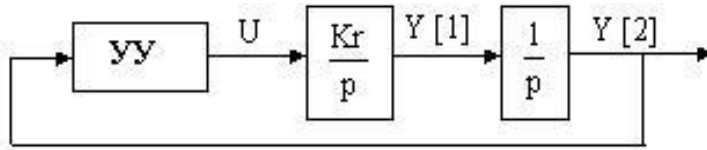
$$\begin{cases} \frac{d^2 Y[2]}{dt^2} = -K_r \cdot K_1 \cdot Y[2]; & \text{при } Y[2] \cdot Y[1] > 0; \\ \frac{d^2 Y[2]}{dt^2} = -K_r \cdot K_2 \cdot Y[2]; & \text{при } Y[2] \cdot Y[1] < 0 \end{cases}$$

Переходный процесс в такой системе представляет собой затухающие колебания. Это видно из фазового портрета системы.

Таким образом в этой системе за счет сочетания неустойчивых структур можно получить устойчивую структуру. Важно то, что для этого мы используем ограниченную информацию о процессе. Однако качество

регулирования нас не устраивает, колебательность процесса слишком велика.

**СИСТЕМА 2** имеет такую же структуру:



Уравнения движения системы относительно ошибки регулирования без учета управляющего устройства УУ имеют тот же вид:

$$\begin{cases} \frac{d^2 Y[2]}{dt^2} = -K_r \cdot K_1 \cdot Y[2]; & \text{при } Y[2] \cdot Y[1] > 0; \\ \frac{d^2 Y[2]}{dt^2} = -K_r \cdot K_2 \cdot Y[2]; & \text{при } Y[2] \cdot Y[1] < 0 \end{cases}$$

Фазовый портрет системы, так как корни ее являются чисто мнимыми, представляет собой эллипс с центром в начале координат. Направление большей полуоси эллипса зависит от коэффициента усиления регулятора.

Предположим, что структура управляющего устройства имеет тот же вид, но, в отличие от системы 1, мы можем измерять сигнал ошибки Y2 и знак некоторой S- комбинации сигналов Y1 и Y2:

$$S = \text{Sgn} Y_1 = C * Y_2;$$

где C –const.

Данное выражение является уравнением прямой, проведенной на фазовой плоскости через начало координат. Назовем эту линию ГИПЕРЛИНИЕЙ ВЫРОЖДЕННОГО ДВИЖЕНИЯ. Величина C определяет угол наклона линии. Эту линию и будем в данном случае считать линией переключения структур. Второй линией переключения является ось координат фазовой плоскости Y[2]=0.

Тогда логика переключений структур УУ для обеспечения устойчивого режима работы может быть иной:

$$U = \begin{cases} K_1 * Y[2]; & \text{при } Y[2]*S > 0; \\ K_2 * Y[2]; & \text{при } Y[2]*S < 0; \end{cases}$$

Таким образом, мы вводим искусственную линию переключения структур, проходящую через начало координат под определенным углом относительно осей, и организуем устойчивый режим. Важно заметить, что

искусственные линии переключения не присутствуют в фазовом портрете ни одной из переключаемых структур. Подбирая угол наклона линии  $S$  и соотношение коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ , можно обеспечить определенное качество переходного процесса в системе, но видно, что он также будет колебательным.

**СИСТЕМА 3** имеет ту же структуру, но для избежания колебаний в переходном процессе реализуем скользящий режим. Для этого переключения в системе должны производиться в таких местах, где фазовые траектории направлены навстречу друг другу. В настоящей системе это можно сделать, просто изменив знак сигнала на выходе второго регулятора.

В результате изображающая точка, попадая на линию переключения, не может ее покинуть и вынуждена двигаться в начало координат, что и представляет скользящий режим в данной системе.

Практически этот режим будет сопровождаться вибрациями из-за быстрых переключений. В идеальном случае вибрации будут иметь амплитуду, равную нулю и бесконечную частоту.

### **Содержание работы**

1. Определить параметры переходного процесса в системе с переменной структурой №1. Параметры системы выбрать следующими:

$$K_1=3; K_2=1; K_r=1;$$

Изменяя параметры управляющего устройства  $K_1$  и  $K_2$ , получить наилучший в смысле быстродействия переходный процесс.

2. Определить влияние параметров управляющего устройства ( $K_1/K_2$ ) и коэффициента наклона линии переключения ( $C$ ) на качество регулирования в системах № 2 и № 3.

3. Добиться наилучшего в смысле быстродействия переходного процесса во всех трех системах. Какой способ переключения структур является более предпочтительным?

### **Вопросы для самоподготовки:**

1. Почему для реализации систем СПС стремятся использовать неустойчивые структуры?

2. Постройте фазовые портреты для предложенных структур трех систем СПС.

3. Запишите уравнение и постройте искусственную линию вырожденного движения, проходящую через начало координат для 1 квадранта фазовой плоскости.

4. Для исследуемых систем имеет значение, с какого регулятора начать движение – с  $K_1$  или с  $K_2$ ?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

### **Перечень основной литературы:**

1. Решетникова Г.Н. Адаптивные системы : учебное пособие / Решетникова Г.Н.. — Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2016. — 112 с. — Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/109015.html> (дата обращения: 30.03.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

### **Перечень дополнительной литературы:**

1. Гайдук А.Р. Адаптивные системы управления : учебное пособие / Гайдук А.Р., Плаксиенко Е.А.. — Ростов-на-Дону, Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2018. — 120 с. — ISBN 978-5-9275-2882-0. — Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/87697.html> (дата обращения: 30.03.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

2. Бобцов А.А. Адаптивное управление возмущенными системами : учебное пособие / Бобцов А.А., Никифоров В.О., Пыркин А.А.. — Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2015. — 127 с. — Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/65763.html> (дата обращения: 23.04.2022). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.