

УДК 621.311

## СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ УЗЛОВ НАГРУЗКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ



### STATIC STABILITY OF LOAD NODES OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

**Беседин Евгений Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электроснабжения  
промышленных предприятий,  
Кубанский государственный  
технологический университет  
omega54@mail.ru

**Левченко Артем Валерьевич**

студент,  
Кубанский государственный  
технологический университет  
artemlew4enko@yandex.ru

**Недилько Станислав Александрович**

студент,  
Кубанский государственный  
технологический университет  
ККС\_snedilko@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные проблемы обеспечения устойчивости электроэнергетических систем. Отдельно рассмотрены вопросы исследования и обеспечения устойчивости узлов нагрузки промышленных предприятий. Подробно рассмотрены характеристики отдельных компонентов, входящих в узел нагрузки промышленного предприятия. На основании рассмотренных моделей был произведен анализ статической устойчивости узла нагрузки распределительного пункта РП-4 цеха микрокабеля кабельного завода. Сделаны выводы о запасе статической устойчивости данного узла нагрузки и о влиянии конденсаторных установок на запас статической устойчивости данного узла.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, узел нагрузки, статическая устойчивость, характеристики статической устойчивости, запас статической устойчивости.

**Besedin Evgeniy Alexeevich**

Candidate of technical sciences,  
Associate Professor, Associate Professor  
of the department of power supply  
of industrial enterprises,  
Kuban state technological university

**Levchenko Artem Valerjevich**

Student,  
Kuban state technological university

**Nedilko Stanislav Alexandrovich**

Student,  
Kuban state technological university

**Annotation.** The article deals with the main problems of ensuring the stability of electric power systems. Separately, the issues of research and ensuring the stability of load nodes of industrial enterprises are considered. The characteristics of individual components included in the load node of an industrial enterprise are considered in detail. Based on the considered models, the static stability of the load node of the RP-4 switchpoint of the MIC-rockable shop of the cable plant was analyzed. Conclusions are made about the stock of static stability of this load node and about the influence of capacitor installations on the stock of static stability of this node.

**Keywords:** electric power system, load node, static stability, characteristics of static stability, stock of static stability.

Э лектроэнергетические системы относятся к классу нелинейных сложных динамических систем, математический анализ которых не бывает полным из-за невозможности подробного математического описания процессов. Поэтому положения, принимаемые при анализе, сводятся, в основном, к совокупности упрощений, не искажающих суть процессов и позволяющих получить удовлетворительные по точности количественные результаты расчета. При вводе этих упрощений ослабляются затруднения, связанные с нелинейностью параметров и сложностью энергосистем.

Различают две разновидности нелинейностей в электроэнергетических системах: нелинейности параметров системы и нелинейности взаимосвязей между параметрами режима [1].

Под нелинейностью параметра системы понимается его зависимость от параметров режима либо от внешних факторов. К таким нелинейностям относятся температурные зависимости активных сопротивлений, зависимости реактивных сопротивлений от насыщения магнитных систем и другие технические нелинейности. При расчетах эти нелинейности обычно не учитываются, а случаи, когда такой учет необходим, оговариваются особо.

При математическом описании процессов нелинейности взаимосвязей между параметрами режима отражаются в виде систем нелинейных дифференциальных уравнений, не имеющих аналитических решений. Поэтому при расчетах динамической устойчивости используются, как правило, численные методы решения. При анализе статической устойчивости широко применяется линеаризация, то есть преобразование систем нелинейных уравнений к линейным формам, удобным для расчетов.

Одним из важных показателей сложности системы является ее высокая размерность. Для электроэнергетической системы характерны высокая физическая и высокая математическая размерности.

Под высокой физической размерностью понимается большое разнообразие объединенных в систему элементов и большое количество элементов каждого вида, что представляет большие затруднения при анализе процессов. Преодоление этих затруднений осуществляется путем эквивалентирования однотипных элементов, то есть путем математического представления группы элементов одним эквивалентным. В наибольшей мере эквивалентирование применяется к элементам генерации и потребления электрической энергии, а при анализе крупных энергообъединений эквивалентируются целые энергорайоны.

Под высокой математической размерностью подразумевается большое количество дифференциальных и алгебраических уравнений, требуемых для математического описания процессов. Размерность систем этих уравнений, используемых для уточненного описания процессов крупных энергообъединений, исчисляется в десятках тысяч. Эффективным приемом снижения математической размерности является условное разделение общей совокупности процессов на быстрые и медленные процессы. Примером такого разделения является широко используемое отдельное рассмотрение электромагнитных и электромеханических процессов. Дальнейшее снижение математической размерности достигается путем использования упрощенных математических моделей, отражающих наиболее существенные явления в элементах электроэнергетических систем. Для оценки допустимости использования этих моделей при решении практических задач проводятся специальные исследования.

Одним из упрощающих приемов, широко используемых при анализе переходных процессов, является замена реальных динамических характеристик элементов электроэнергетических систем их статическими характеристиками, а также рассмотрение энергосистемы, динамической по свойствам, как системы позиционной. Под позиционной системой понимается такая система, в которой параметры режима зависят только от данного ее состояния независимо от того, как было достигнуто это состояние.

Под статическими характеристиками понимаются графически или аналитически выраженные связи между параметрами режима. Эти связи выявляются в условиях установившегося режима системы или в переходном режиме, но при допущениях, позволяющих считать эти связи не зависящими от времени. Для статической характеристики характерна зависимость между параметрами режима вида

$$x = \varphi(y_1, y_2, \dots, y_n). \quad (1)$$

Статические характеристики достаточно полно описывают позиционную систему, динамические характеристики – динамическую систему.

*Статические характеристики нагрузки.* В соответствии с общим определением понятия статической характеристики элемента, под статическими характеристиками нагрузки понимают зависимости ее активной и реактивной мощностей по напряжению и частоте, получаемые при настолько медленном изменении этих параметров, что можно не учитывать влияние факторов времени [2].

В некоторых случаях рассматривают зависимость активной или реактивной мощности нагрузки совместно по напряжению и частоте, однако, как правило, каждая статическая характеристика нагрузки рассматривается как функция одной переменной, то есть:

при  $f = const$ :

$$P_{HU} = \varphi_P(U); \quad (2)$$

$$Q_{HU} = \varphi_Q(U); \quad (3)$$

при  $U = const$ :

$$P_{Hf} = \varphi_P(f); \quad (4)$$

$$Q_{Hf} = \varphi_Q(f), \quad (5)$$

Различают статические характеристики отдельных элементов и комплексной нагрузки в целом. При этом под комплексной понимают сложную нагрузку, состоящую из множества элементов и имеющую один узел подключения к питающей электрической сети.

Рассмотрим статические характеристики некоторых наиболее распространенных элементов и комплексной нагрузки.

**Осветительная нагрузка.** Активная мощность, потребляемая осветительной установкой, содержащей лампы накаливания, не зависит от частоты и приблизительно пропорциональна напряжению в степени 1,6 (рис. 1):

$$P_{ЛНУ} = kU^{1,6}, \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Реактивную мощность такая нагрузка не потребляет.

Активная мощность ламп накаливания не подчиняется квадратичной зависимости от напряжения по той причине, что сопротивление лампы увеличивается с ростом напряжения. При сопротивлении  $R = const$  характеристика будет квадратичной. Приблизительно такую характеристику имеют нагревательные приборы инфракрасного излучения, у которых диапазон температурных изменений сопротивления значительно меньше, чем у лампы накаливания.

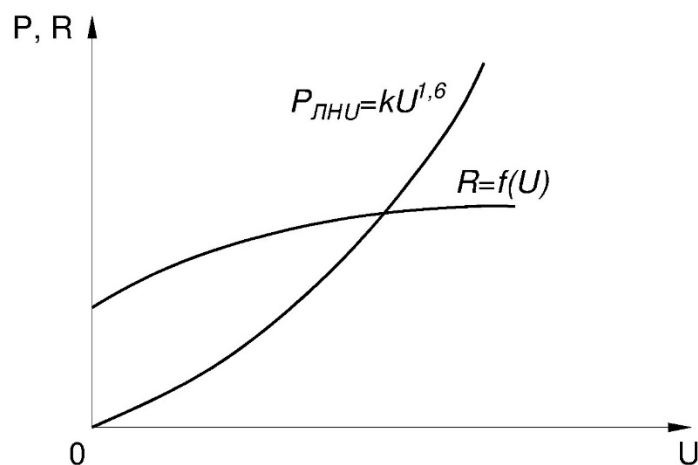


Рисунок 1 – Характеристики осветительной установки

Активная мощность осветительных люминесцентных ламп от величины напряжения в пределах рабочего диапазона практически не зависит. Однако есть заметная зависимость от частоты. При изменении частоты на 1 % активная мощность люминесцентных ламп изменяется в том же направлении на 0,5–0,8 %.

**Реактор и батарея статических конденсаторов.** Активная мощность реакторов и батарей статических конденсаторов определяется потерями и, как правило, не учитывается.

Статические характеристики реактивной мощности реактора и батареи статических конденсаторов определяются квадратичными зависимостями (рис. 2) по формулам:

$$Q_{PU} = U^2/x_p, \quad x_p > 0; \quad (7)$$

$$Q_{КБУ} = U^2/x_{KB}, \quad x_{KB} < 0. \quad (8)$$

При заданном направлении мощности от узла к элементу  $Q_p > 0$ ,  $Q_{KB} < 0$ .

Статические характеристики реактивной мощности реактора и конденсаторной батареи по частоте вычисляются по выражениям:

$$Q_{Pf} = U^2 / 2\pi f L_p, \quad U = const; \quad (9)$$

$$Q_{KBf} = U^2 / 2\pi f C_{KB}, \quad U = const, \quad (10)$$

где  $L_p$  – индуктивность реактора;  $C_{KB}$  – емкость конденсаторной батареи.

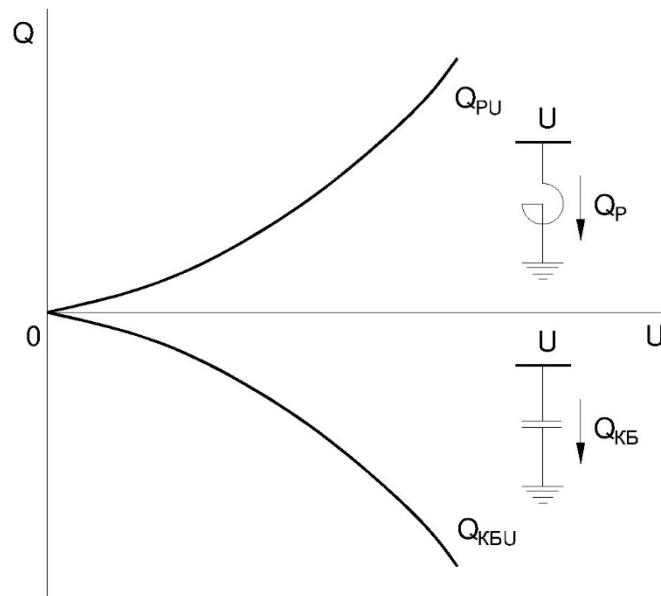


Рисунок 2 – Статические характеристики реактивной мощности реактора  $Q_{pU}$  и батареи статических конденсаторов  $Q_{KBf}$

**Асинхронный двигатель.** Принципиальное отличие асинхронного двигателя от синхронного заключается в том, что его ротор вращается несколько медленнее, чем электромагнитное поле статора, то есть имеет место скольжение [3]:

$$s = \frac{\omega_c - \omega_{AD}}{\omega_c}. \quad (11)$$

где  $\omega_c$ ,  $\omega_{AD}$  – частоты синхронная и двигателя соответственно.

Активная мощность  $P_{AD}$ , потребляемая двигателем из сети, определяется мощностью приводимого в движение механизма:

$$P_{AD} = P_{mex}, \quad (12)$$

которая зависит от скорости вращения  $\omega_{AD}$  ротора двигателя и, соответственно, от скольжения:

$$P_{mex} = P_{mex}(s). \quad (13)$$

Характеристика активной мощности двигателя определяется параметрами его схемы замещения. В упрощенном виде такая схема приведена на рисунке 3.

Для построения характеристики электромагнитной мощности следует определить активную мощность, выделяемую на сопротивлении  $r/s$ . В соответствии со схемой замещения двигателя для электромагнитной мощности  $P$  имеем:

$$P = I_s^2 \frac{r}{s} = \frac{U^2}{x_s^2 + (r/s)^2} \cdot \frac{r}{s}, \quad (14)$$

или, после преобразований:

$$P = \frac{U^2 sr}{x_s^2 s^2 + r^2}, \quad (15)$$

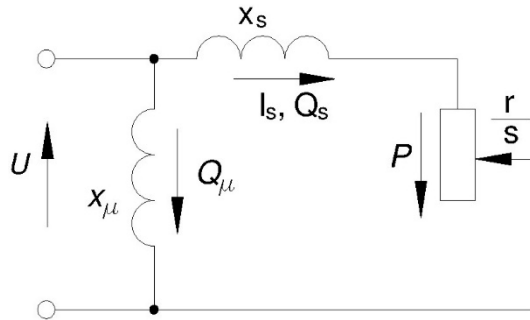


Рисунок 3 – Схема замещения асинхронного двигателя:

$x_s, x_\mu$  – сопротивления рассеяния и намагничивания двигателя;  $r/s$  – активное сопротивление

Как следует из (15), электромагнитная мощность асинхронного двигателя является функцией напряжения и скольжения. Обычно построение характеристик этой мощности производится в функции скольжения при фиксированных значениях напряжения.

Поскольку и электромагнитная и механическая мощности являются функциями скольжения, равенство (12) можно представить в более конкретной форме:

$$P_{AD}(s) = P_{mex}(s). \quad (16)$$

Очевидно, что это равенство выполняется в точках пересечения характеристик  $P_{AD}(s)$  и  $P_{mex}(s)$ . Поскольку электромагнитная мощность является также и функцией напряжения, то образуется серия точек, соответствующих различным значениям напряжения. По этим точкам может быть построена статическая характеристика потребляемой мощности асинхронного двигателя по напряжению.

Таким образом, в общем случае активная мощность асинхронного двигателя зависит от напряжения, то есть  $P_{ADU} \neq const$ . Однако, если  $P_{mex}(s) = const$ , то и  $P_{ADU} = const$ .

Соответственно схеме замещения (см. рис. 3) реактивная мощность асинхронного двигателя представляет собой сумму двух составляющих:

$$Q_{AD} = Q_\mu + Q_s = \frac{U^2}{x_\mu} + I_s^2 x_s \quad (17)$$

или

$$Q_{ADU} = \frac{U^2}{x_\mu} + \frac{U^2 s^2 x_s^2}{x_s^2 s^2 + r^2}. \quad (18)$$

С учетом вышеизложенного был произведен анализ статической устойчивости кабельного завода. В качестве объекта исследования был взят распределительный пункт РП-4 цеха микрокабеля. Исходная структурная схема данного узла нагрузки приведена на рисунке 4. В результате расчетов были получены статические характеристики данного узла нагрузки для различных значений емкости компенсирующего устройства. На рисунке 5 приведены статические характеристики для значения компенсирующего устройства, равного 0,21 МВар.

В целом расчеты показали, что данный узел обладает достаточно высоким запасом статической устойчивости. Также расчеты подтвердили отрицательное влияние емкости на статическую устойчивость узла нагрузки.

Аналогично была проанализирована статическая устойчивость узла нагрузки электроаппаратного завода по вышеизложенной методике. Результаты анализа показали результаты, аналогичные кабельному заводу.

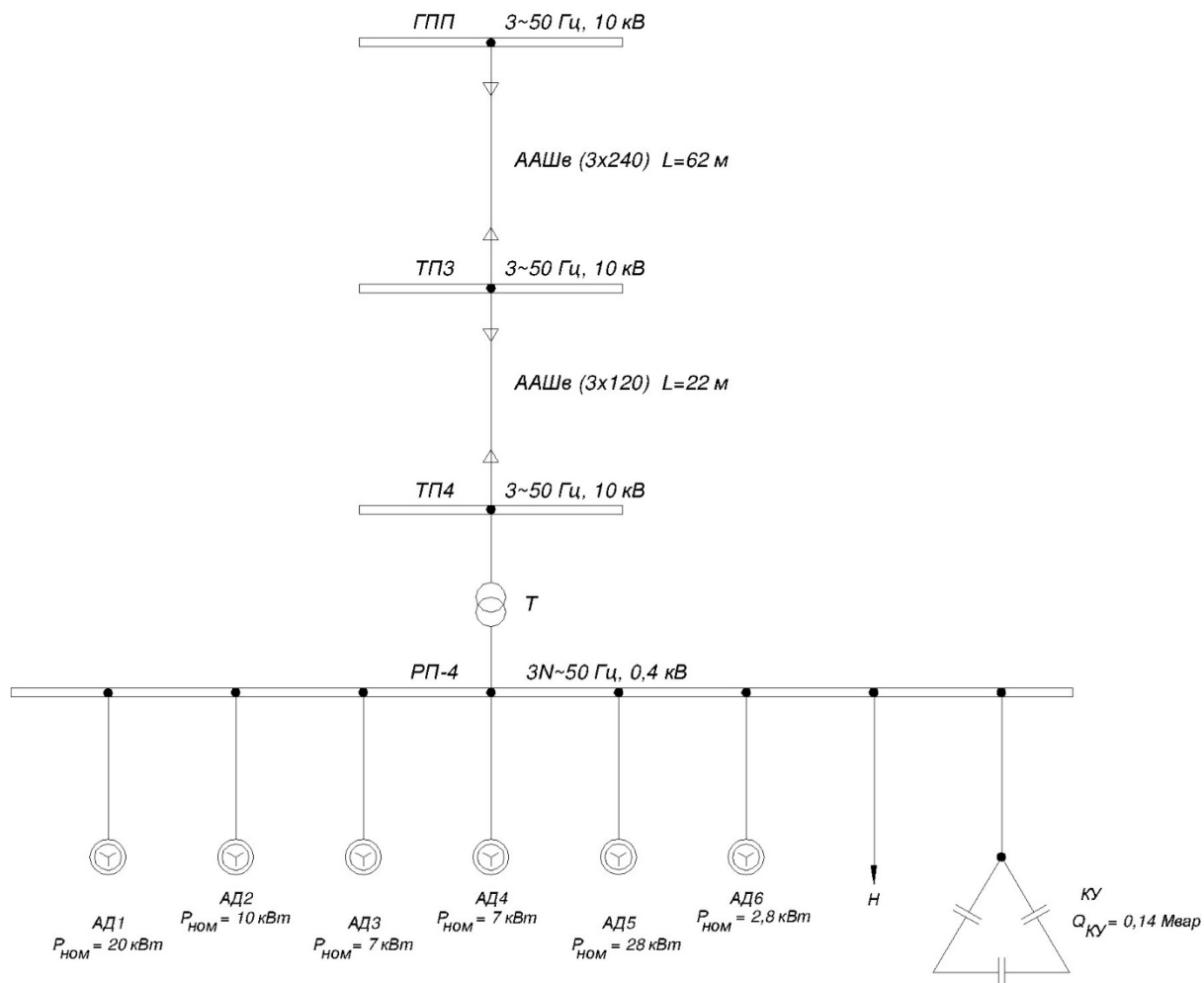


Рисунок 4 – Исходная структурная схема узла нагрузки кабельного завода

$$Q_{\text{КУ}} = 0,21 \text{ Мвар}$$

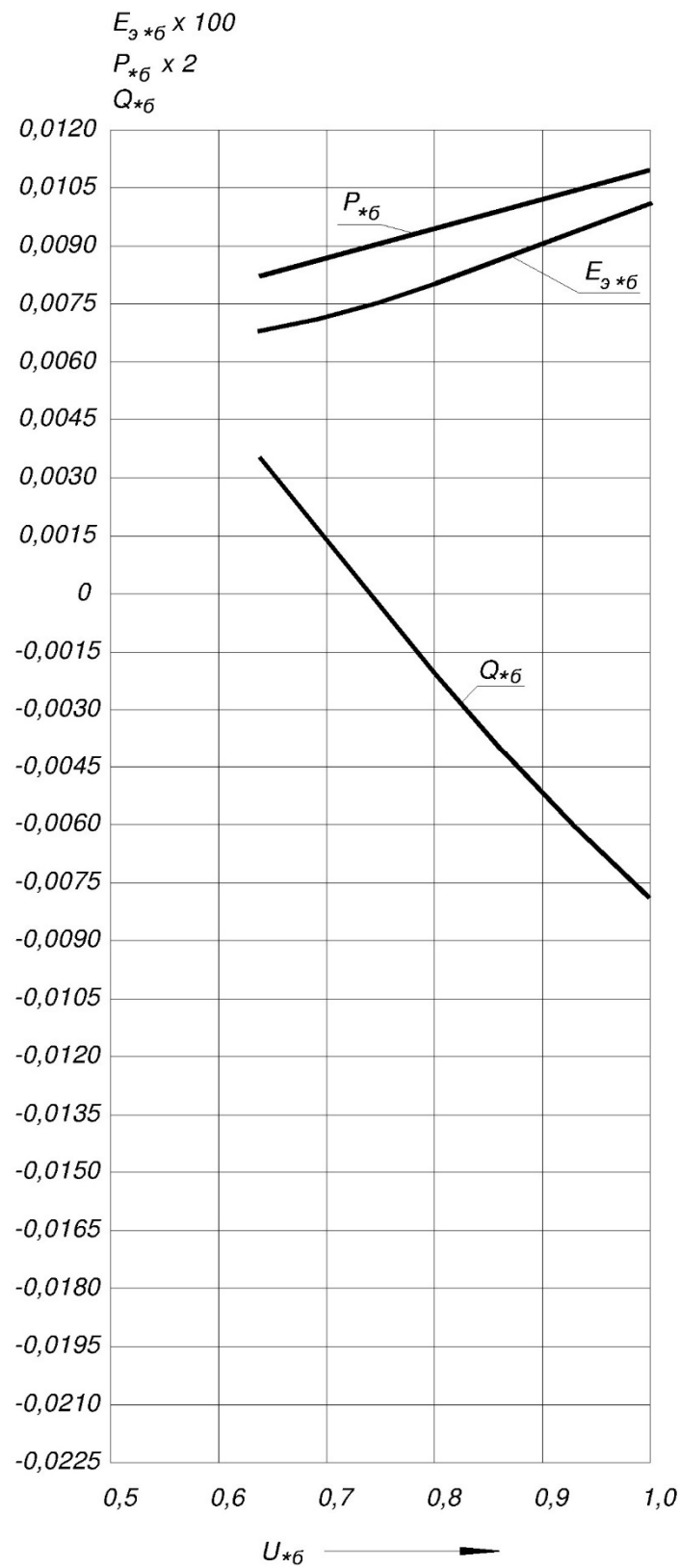


Рисунок 5 – Диаграммы зависимостей параметров узла нагрузки

### Литература

1. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоиздат, 1990. – 390 с.

2. Хрущев Ю.В., Заповодников К.И., Юшков А.Ю. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах : учебное пособие / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 160 с.
3. Эрнст А.Д. Электромеханические переходные процессы в электрических системах : Курс лекций. – Нижневартовск : Изд-во НВГУ, 2013. – 130 с.

### **References**

1. Gurevich Yu.E., Libova L.E., Okin A.A. Calculations of stability and emergency automation in power systems. – M. : Energoizdat, 1990. – 390 p.
2. Khrushchev Yu.V., Zapodovnikov K.I., Yushkov A.Yu. Electromechanical transients in electric power systems: a textbook / Tomsk Polytechnic University. – Tomsk : Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2012. – 160 p.
3. Ernst A.D. Electromechanical transients in electrical systems : a course of lectures. – Nizhnevartovsk : publishing house of Nizhnevartovsk state University, 2013. – 130 p.