FACULTY OF MECHANICAL
ENGINEERING
UNIVERSITY
OF WEST BOHEMIA

Приводы органов регулирования ядерных реакторов

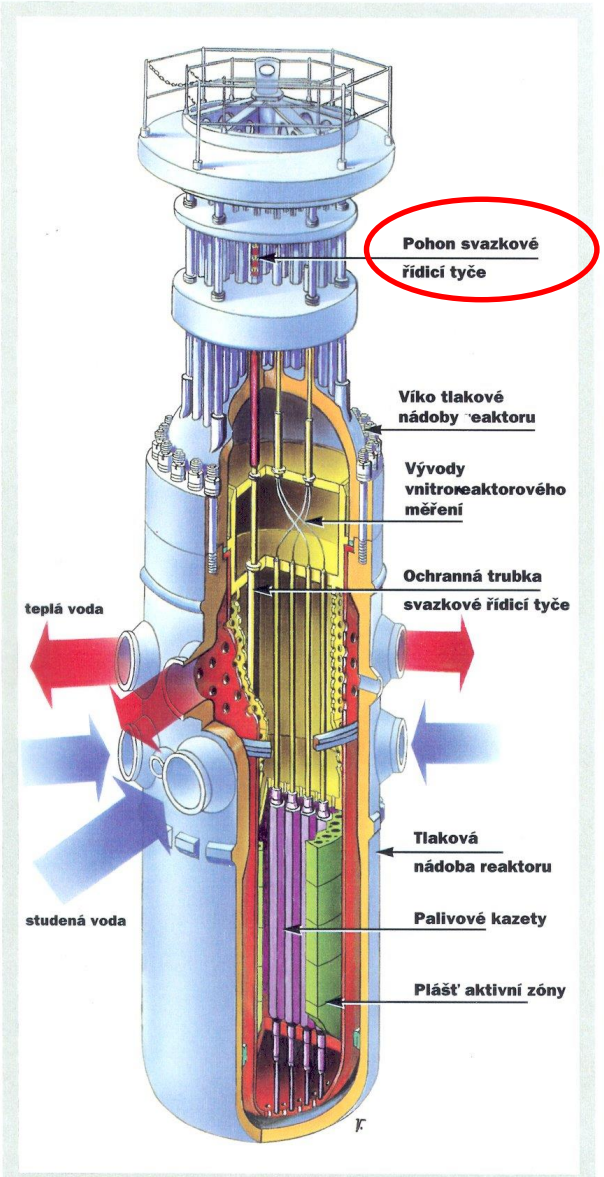
Требования к конструкции

Ян Здебор, к.т.н.

Заместитель декана машиностроительного факультета
Технический советник генерального директора ŠKODA JS

Проект „Развитие международного сотрудничества с украинскими ВУЗами в областях качества, энергетики и транспорта“
г. Харьков, 11/2018

Терминология



Приводы органов регулирования системы управления и защиты

- Приводы органов регулирования СУЗ (приводы ОР СУЗ)
- Регулирующие механизмы (РМ)
- Исполнительные механизмы СУЗ (ИМ)
- Control Rod Drive Mechanism
- Pohony řídících tyčí
- Pohony regulačních orgánů

Основные требования, предъявляемые к приводам ОР СУЗ

1. Общие требования

1.1 Приводы ОР СУЗ должны предотвращать самовольное перемещение ОР в направлении повышения положительной реактивности реактора при поломке и прекращении электроснабжения

1.2 приводы ОР СУЗ должны быть оснащены измерительными указателями положения ОР и концевыми выключателями, управляющими непосредственно ОР. В случае недостижимости непосредственного контакта должна гарантироваться правильная работа, с возможностью частичного контроля

1.3 Применяемые указатели положения ОР должны обеспечить достоверную информацию о положении ОР и в случае, если произойдет выключение и последующее включение электропитания. Одновременно должны обеспечить непрерывный и надежный контакт с рабочими частями ОР в эксплуатационных условиях.

1.4 В технических условиях отдельных исполнений ОР должны быть приведены конкретные числовые значения следующих величин:

- рабочая скорость перемещения ОР с разрешенными допусками
- время падения ОР в активную зону в режиме аварийной защиты или скорость перемещения в режиме аварийной защиты, с указанием времени, за которое данная скорость достигается
- достигаемая точность определения положения ОР
- рабочий ход ОР

1.5 Для отдельных исполнений приводов ОР СУЗ должны быть специфицированы требования по ремонтопригодности и обслуживанию

Основные требования, предъявляемые к приводам ОР СУЗ

2. Эксплуатационные требования

2.1 Требуемая скорость перемещения согласно [01]

L – длина активной зоны

$v = L.F^{-1}.k^{-1} . 10^{-4}$ [mm.s^{-1}]

k - полная эффективность ОР

F – коэффициент эффективности в рабочей точке с учетом средней эффективности

Обычно v ~ 10 ÷ 30 mm.s^{-1} в части активной зоны, где ОР наиболее эффективны. В зависимости от типа конструкции ОР перемещение ОР плавное или пошаговое. Размер шага определен вызываемой данным шагом реактивности. Скорость изменения не должна превышать значение 0,07 βef, причем вес 1 шага не должен превышать 0,3 βef органа ручного регулирования с эффективностью более чем 0,7 β_{ef}

2.2 Точность достижения требуемого положения

Согласно [01] требуемая точность 2.10^{-5} δk (в ВВЭР -1000 ± 10 мм)

2.3 Контроль положения ОР

2.4 Работа в режиме аварийной защиты

Основные требования, предъявляемые к приводам ОР СУЗ

3. Требования в отношении к ядерной безопасности

3.1 Надежное обеспечение перемещения ОР в направлении уменьшающейся реактивности

3.2 Ограничение скорости вносимой реактивности

3.3 Предотвращение возможности «выталкивания» ОР из АЗ

ВВЭР-440 – гидравлический упор

ВВЭР-1000 – закрытие защелок «выплыванием» запирающего и фиксирующего магнитов

3.4 Обеспечение быстрой реакции ОР при возникновении сигнала аварийной защиты

ВВЭР- 440 – период разгона до скорости падения

ВВЭР-1000 – время от подачи сигнала до начала движения ZT с кластером

3.5 Надежное освобождение ОР при его вводе в АЗ в случае возникновения аварийной ситуаци

3.6 Надежное обеспечение герметичности первого контура в соединениях ОР во всех эксплуатационных и аварийных ситуациях

3.7 Надежное охлаждение приводов ОР *(если это необходимо, как у ВВЭР-440)*

3.8 Надежное соединение приводов ОР с абсорбирующей частью ОР

Основные требования, предъявляемые к приводам ОР СУЗ

4. Требования, предъявляемые к конструкции приводов ОР:

Надежно обеспечить

- *перемещения ОР в направлении уменьшающейся реактивности*
- *целостность первого контура (компоненты, работающие под давлением I.O.)*

Проблемы на АЭС «Козлодуй», на АЭС «Тяньвань», … **[08]**

  - *Прочностные характеристики*
  - *Стойкость к коррозионно-напряженным нагрузкам*

- *свободное движение подвижных компонентов, подшипники (трение, износ,...)*
- *безотказную работу компонентов электромагнитных контуров*
- *материал обмотки катушек для особо сложных условий…*

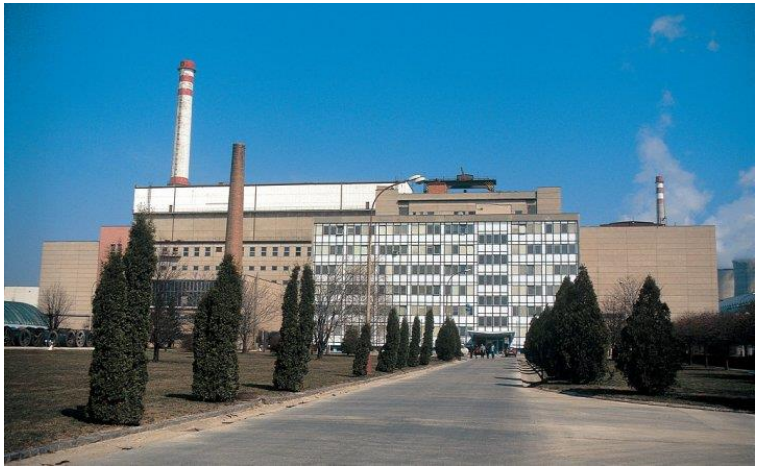
Приводы ОР СУЗ производства ŠKODA

История разработки приводов ОР в компании ŠKODA

1. **Приводы ОР СУЗ для АЭС А1 (GCHWR)**
   Ясловские Богунице

   Разработка: 1960 -1970

   Тяжеловодная программа была закрыта после последней аварии на АЭС А1. По решению чехословацкого правительства был начат переход к реакторам ВВЭР

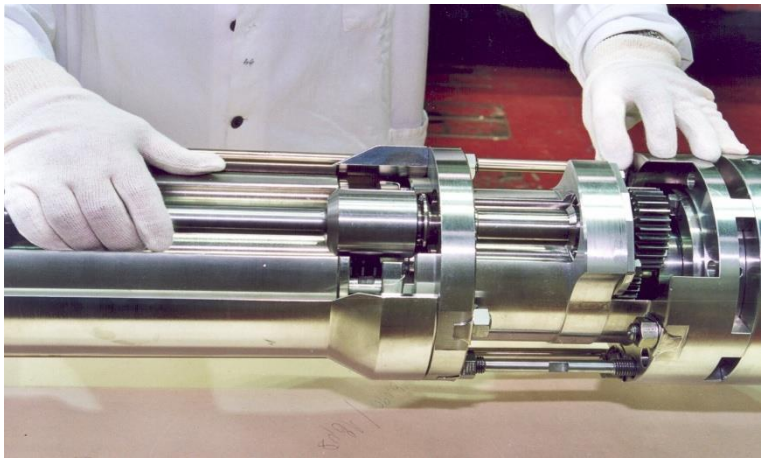


2. **Приводы ОР СУЗ для АЭС с реакторами ВВЭР-440/В-213**

   В 70-х годах было начато освоение лицензионного производства приводов ОР со сроком службы 5 лет по русскому проекту.

   Разработка: 1990 – 2005 (сначала в сотрудничестве с Ижорскими заводами)

   - постепенное увеличение срока службы эксплуатируемых приводов ОР



3. **Приводы ОР СУЗ для АЭС с ВВЭР-1000/В320 (ВВЭР-1200)**

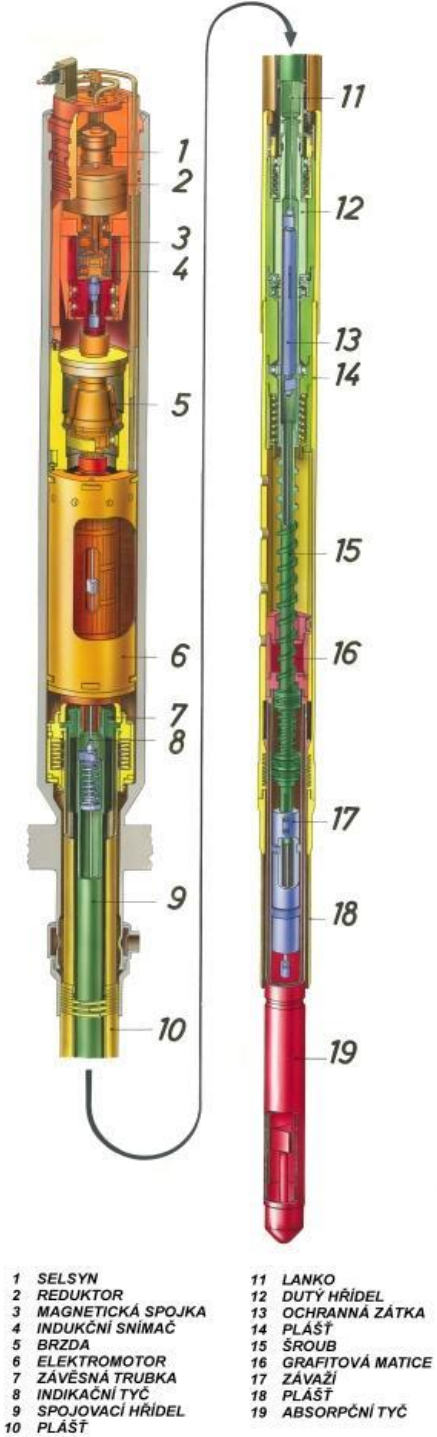
   Разработка: 1972 – приводы «ШЭМ» ŠKODA

   1982 – начало разработки ШЭМ-М (сначала в сотрудничестве с ОКБ Гидропресс)

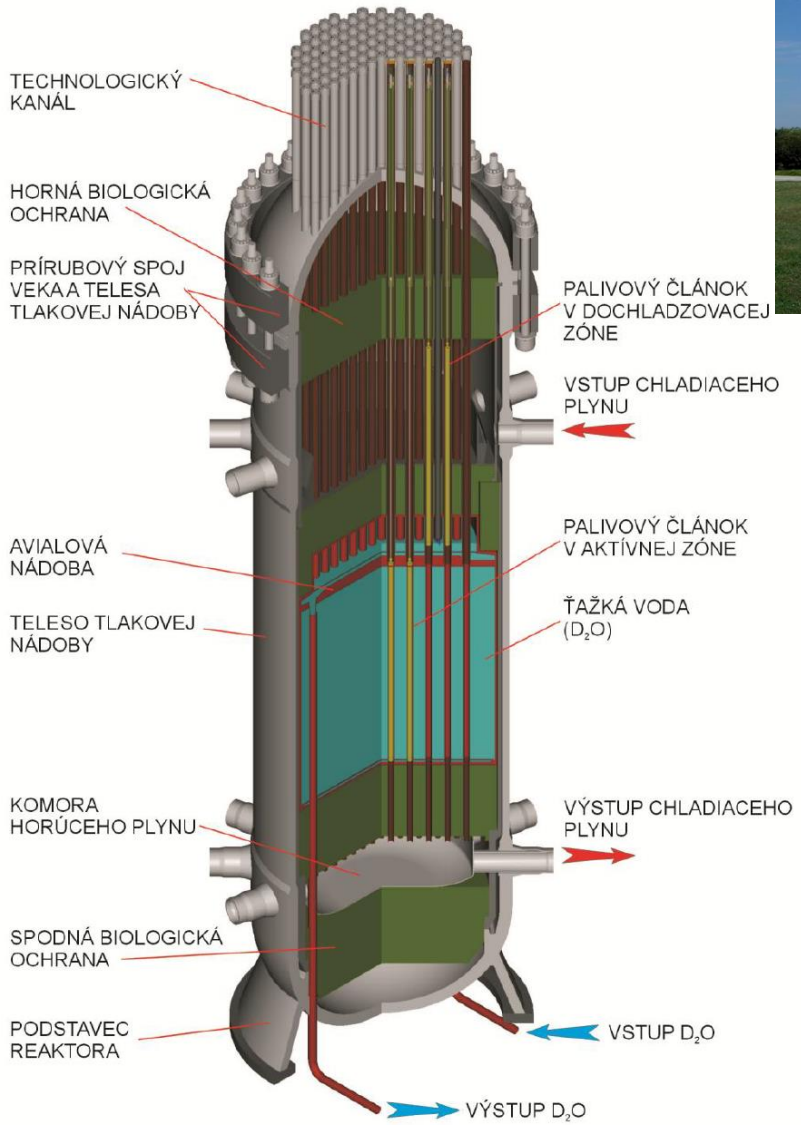
   1994 - самостоятельная разработка ШЭМ-М ŠKODA

4. **Приводы ОР СУЗ ŠKODA для исследовательских реакторов**

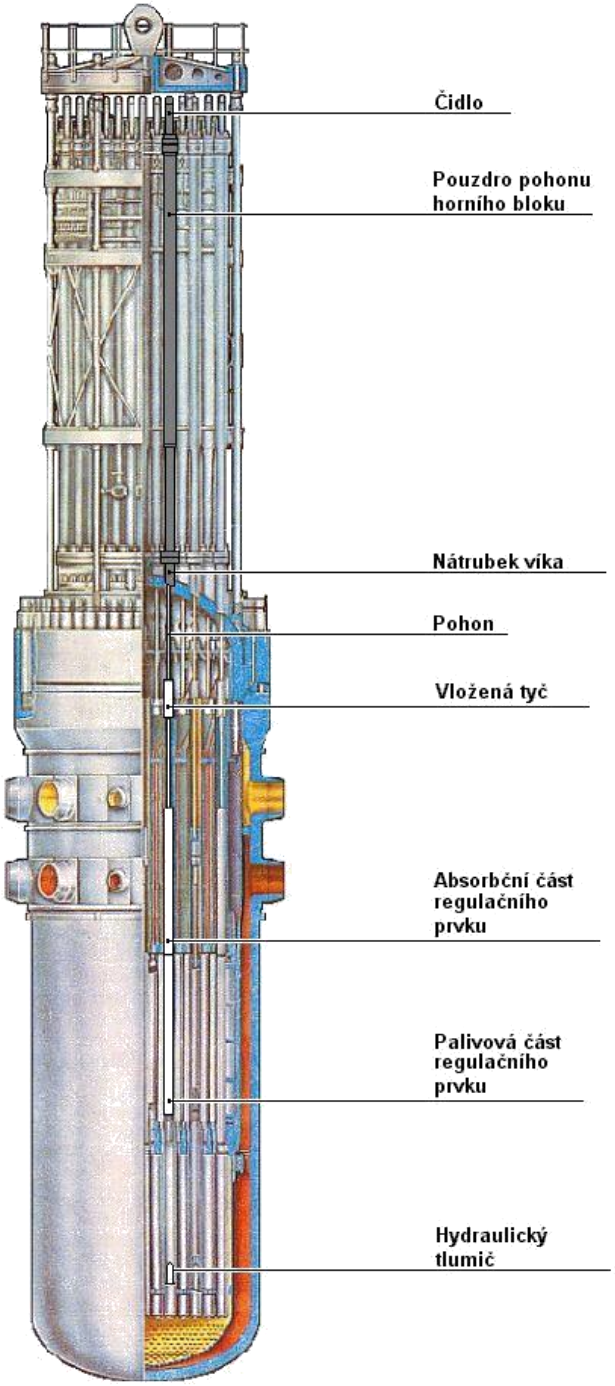
Приводы ОР СУЗ ŠKODA для АЭС «А1»



Приводы изг. из нерж. сталей (ЧССР)

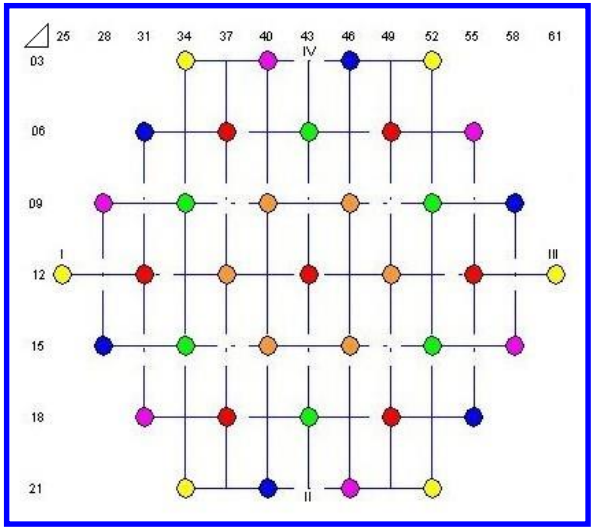


Приводы ОР СУЗ для АЭС ВВЭР- 440/В213



Приводы ОР СУЗ являются составной частью системы контроля и управления реактора ВВЭР-440/В213. В реакторе работает 37 приводов ОР СУЗ, которые разделены по функции в СУЗ на 6 рабочих групп. Обеспечивают следующие функции:

- **перемещение кассеты АРК в режиме регулирования реактора**
- **удерживание кассеты АРК в заданном положении**
- **сброс кассеты АРК в аварийном режиме реактора**
- **контроль фактического положения кассеты АРК**
- **установка кассеты АРК в заданное положение**



Расположение приводов ОР в реакторе

- 1. skupina
- 2. skupina
- 3. skupina
- 4. skupina
- 5. skupina
- 6. skupina (regulační)

Приводы ОР СУЗ для АЭС ВВЭР- 440/В213

Управление сроком службы

Управление сроком службы

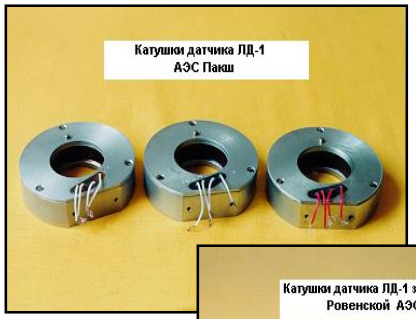
Объем испытаний материалов, выполняемых на образцах, отбираемых из наиболее нагружаемых компонентов одного привода после 10 и 14 лет эксплуатации

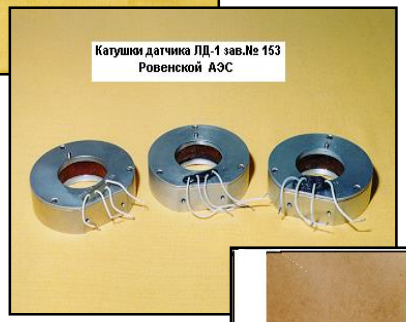
- Визуальный контроль
- Капиллярный контроль
- Испытание на растяжение
- Испытание на ударный изгиб
- Испытание на твердость
- Испытание на стойкость к межкристаллитной коррозии
- Металлографические испытания (макро и микроструктура), включая анализ поверхности
- Характеристики пружин
- Рентгеновский дифракционный анализ
- Сравнительные испытания

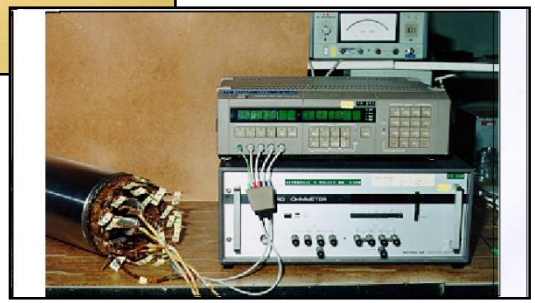
Приводы ОР СУЗ для АЭС ВВЭР- 440/В213

Управление сроком службы

Лабораторные испытания компонентах эксплуатируемых приводов ОР на АЭС «Пакш», «Дукованы», на Ровенской АЭС







Управление сроком службы

Лабораторные испытания

Почему сравнительные испытания?

- **Сравнение результатов с начальными значениями, определенными на стандартных образцах**
- **Определение отклонений механических, структурных и коррозионных свойств после 14 лет эксплуатации, по сравнению с исходным состоянием**

Рентгеновский дифракционный анализ

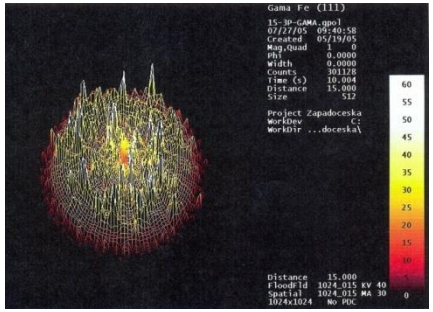
(20Ch17N2B-Š)

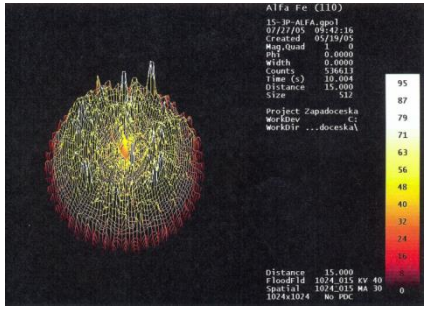
Утончение структуры

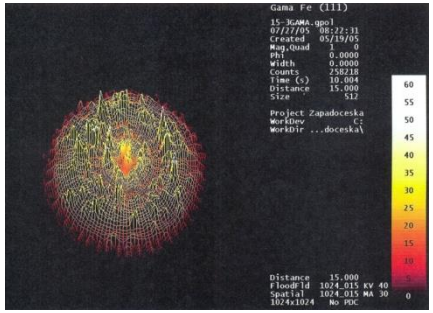
Внутренние напряжения

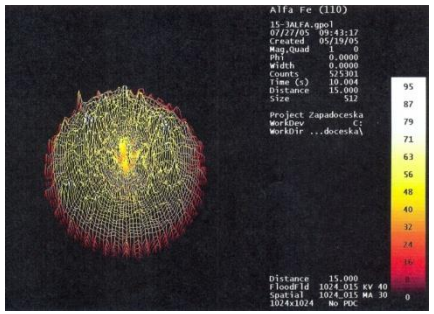
Сравнительный образец

Эксплуатируемый образец



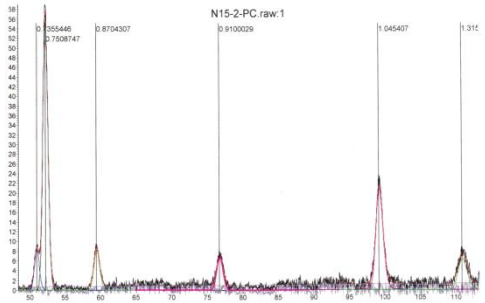






аустенит

феррит



Уровень внутренних напряжений 2-го вида пропорциональна полуширине дифракционных линий

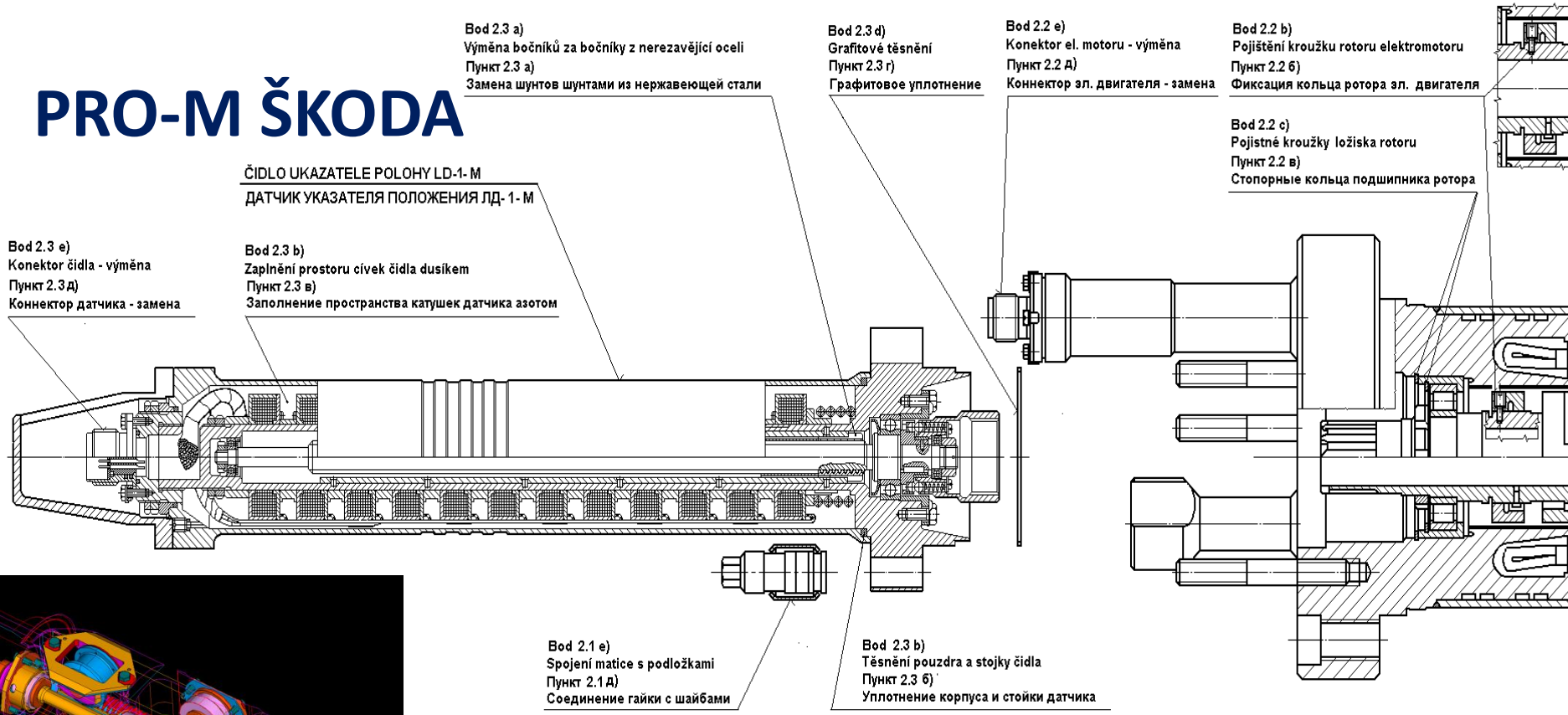
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA

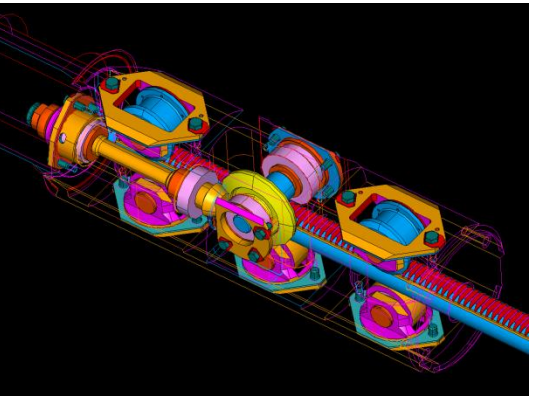
Приводы ОР СУЗ для АЭС ВВЭР- 440/В213

HON REGULAČNÍHO ORGÁNU
ODERNIZOVANÝ

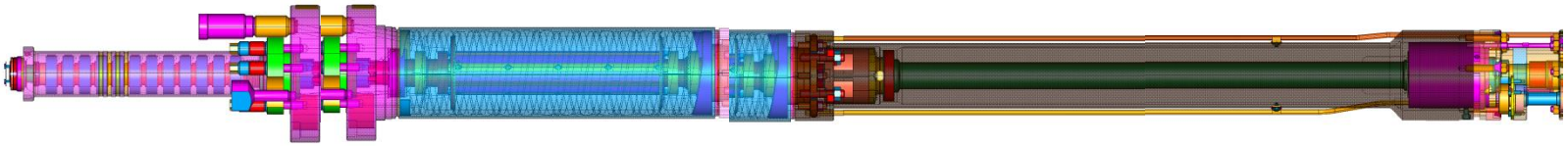
ИВОД РЕГУЛИРУЮЩЕГО ОРГАНА
ОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ

PRO-M ŠKODA

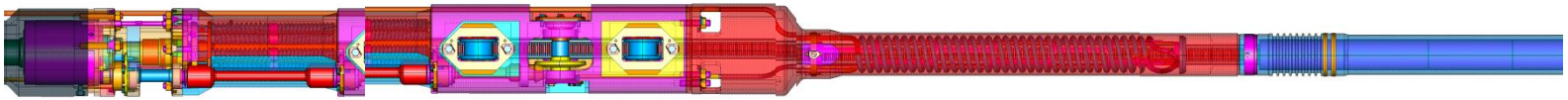


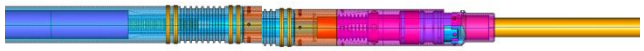


Приводы ОР СУЗ для АЭС ВВЭР- 440/В213

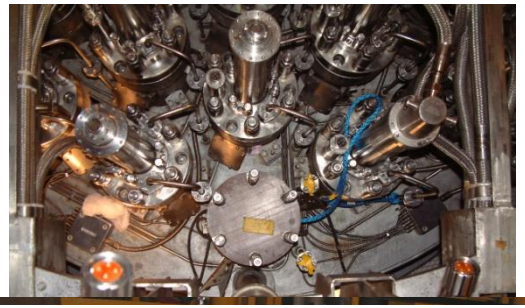


3D модель PRO-M





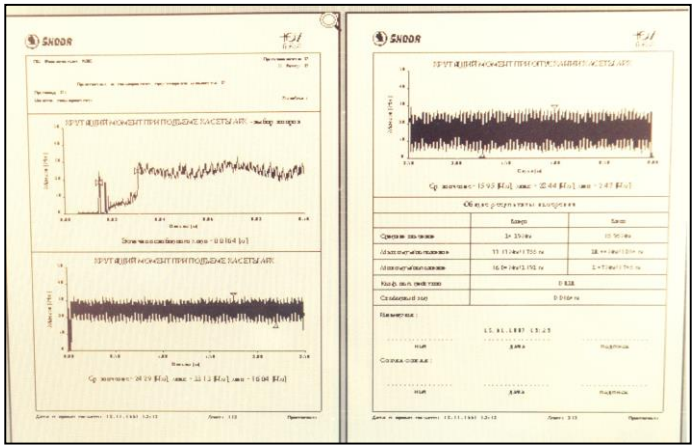
Приводы ОР СУЗ для АЭС ВВЭР- 440/В213



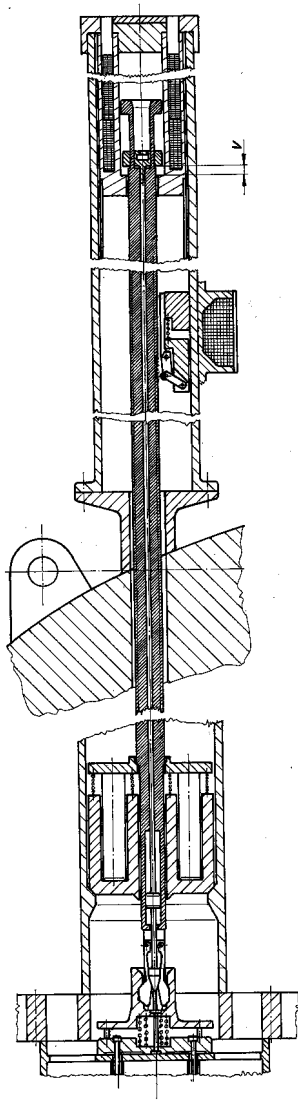
Гайковерт фланцевых соединений

Приспособления для обслуживания приводов

Оборудование для изменения Mk



Приводы ОР СУЗ для АЭС с ВВЭР - 1000



Привод ОР „LKM“ для первых блоков ВВЭР- 1000

разработка в ŠKODA на основании русского технического задания с 70-х лет

- **LKM I** Три рабочих катушки

  Параметры тестированы на прототипе

- **LKM II** Четыре рабочих катушки, с автоматическим управлением скоростью подъема

  v_1 ~ 10 мм/с

  v_2 ~ 20 мм/с

- **LKM III** Четыре рабочих катушки, с возможностью трех скоростей подъема

  Параметры тестированы на прототипе

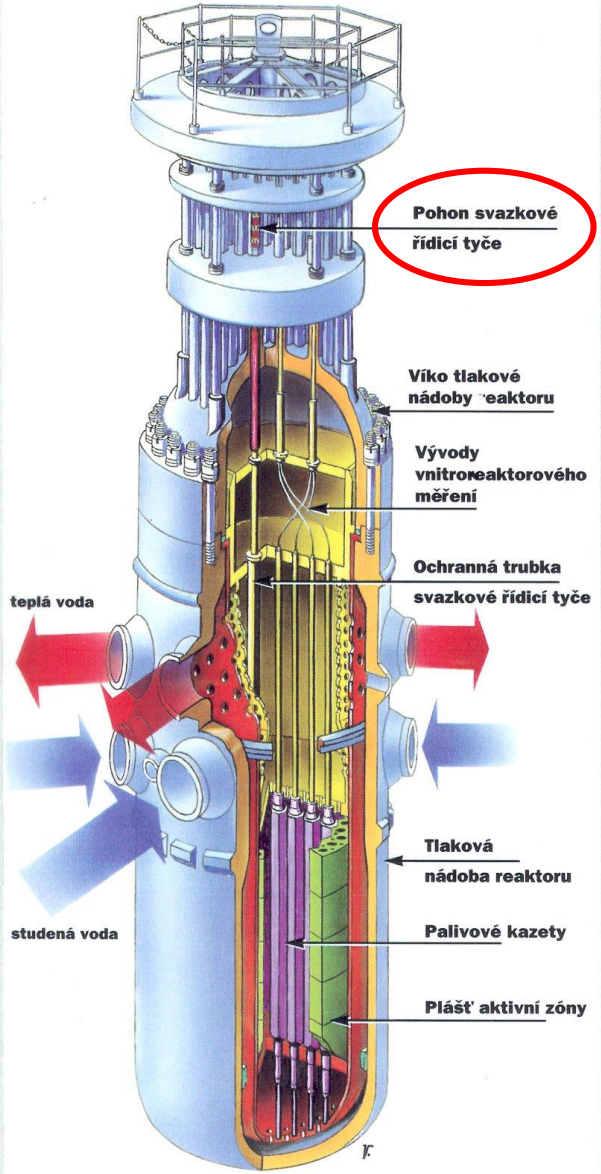
  v_1 ~ 10 мм/с

  v_2 ~ 20 мм/с

  v_3 ~ 30 мм/с

- *Разработка была основана на применении чехословацких нержавеющих сталей (примеры)*
  - *Компоненты, работающие под давлением – сталь 17246*
  - *Электромагниты - сталь 17041*
  - *Защелки - сталь 17042*

Приводы ОР СУЗ для АЭС с ВВЭР - 1000



Модернизация российских приводов ОР типа ШЭМ

в 80-е годы – сотрудничество с ОКБ Гидропресс

ШЭМ-М/1 – *срок службы 10 лет*

ШЭМ-М /2 – *срок службы 30 лет*

ШЭМ-М /3 – *срок службы 40 лет*

Поставлено более 1200 шт. для 12 блоков АЭС

ЧР - АЭС «Темелин»
Украина - Южно-Украинская АЭС, Ровенская АЭС, Хмельницкая АЭС, Запорожская АЭС

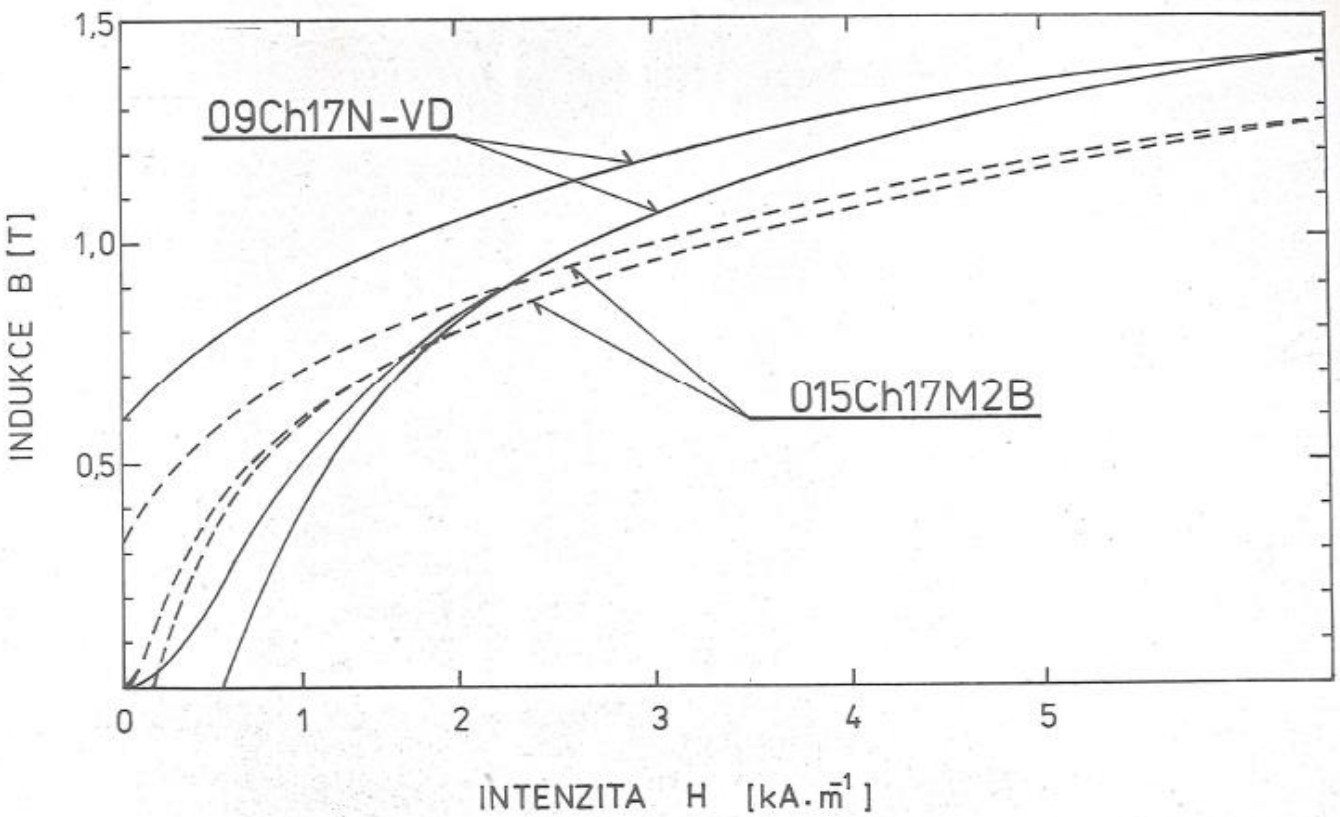
Приводы ОР СУЗ для АЭС с ВВЭР - 1000

Оптимизация магнитных контуров

Материал для магнитных контуров

«суперферрит» 015Ch17M2B

(разработано в сотрудничестве с POLDI Kladno)

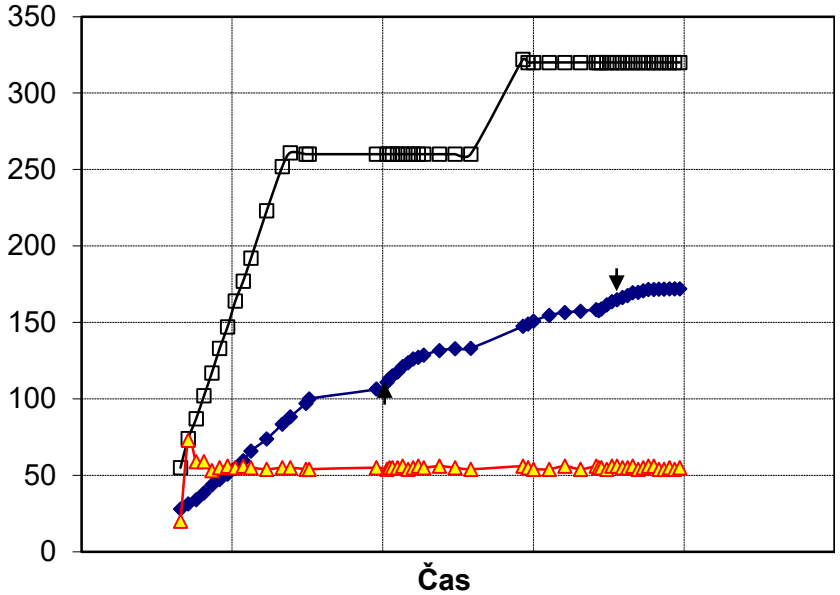


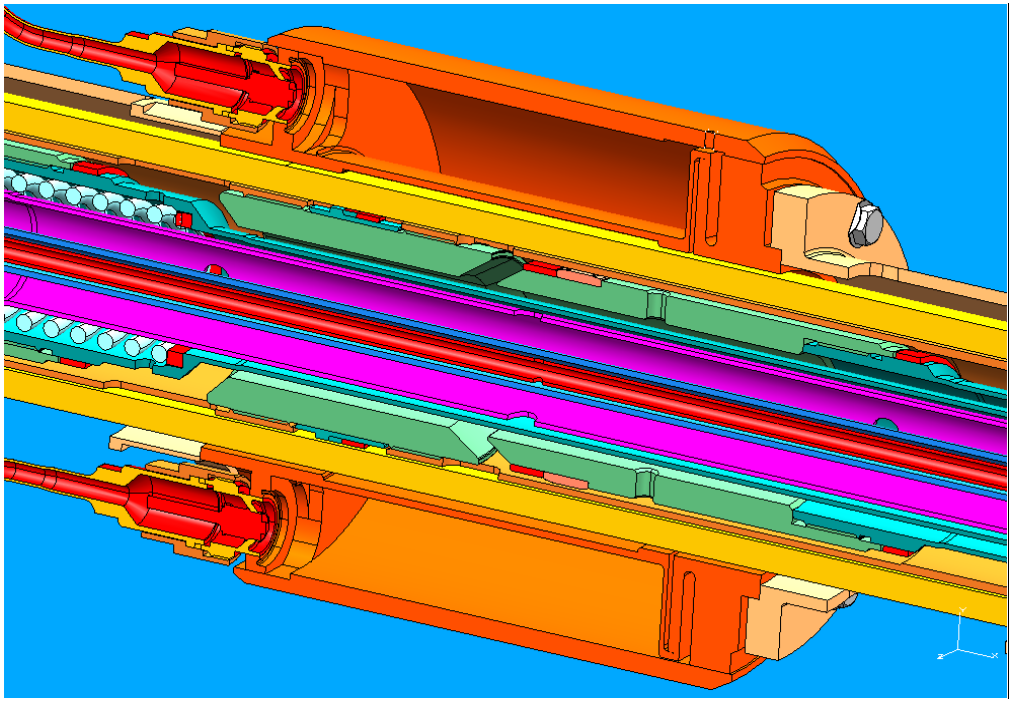
Замена низкоуглеродной магнитно мягкой стали типа 09Х17Н-ВД нержавеющей сталью 015Х17М2Б

Приводы ОР СУЗ для АЭС с ВВЭР - 1000

Оптимизация магнитных контуров ШЭМ-М/З

- разработка новых изолирующих систем для постоянной эксплуатации при температуре обмотки ~ 300°C
- разработка новых разъемов



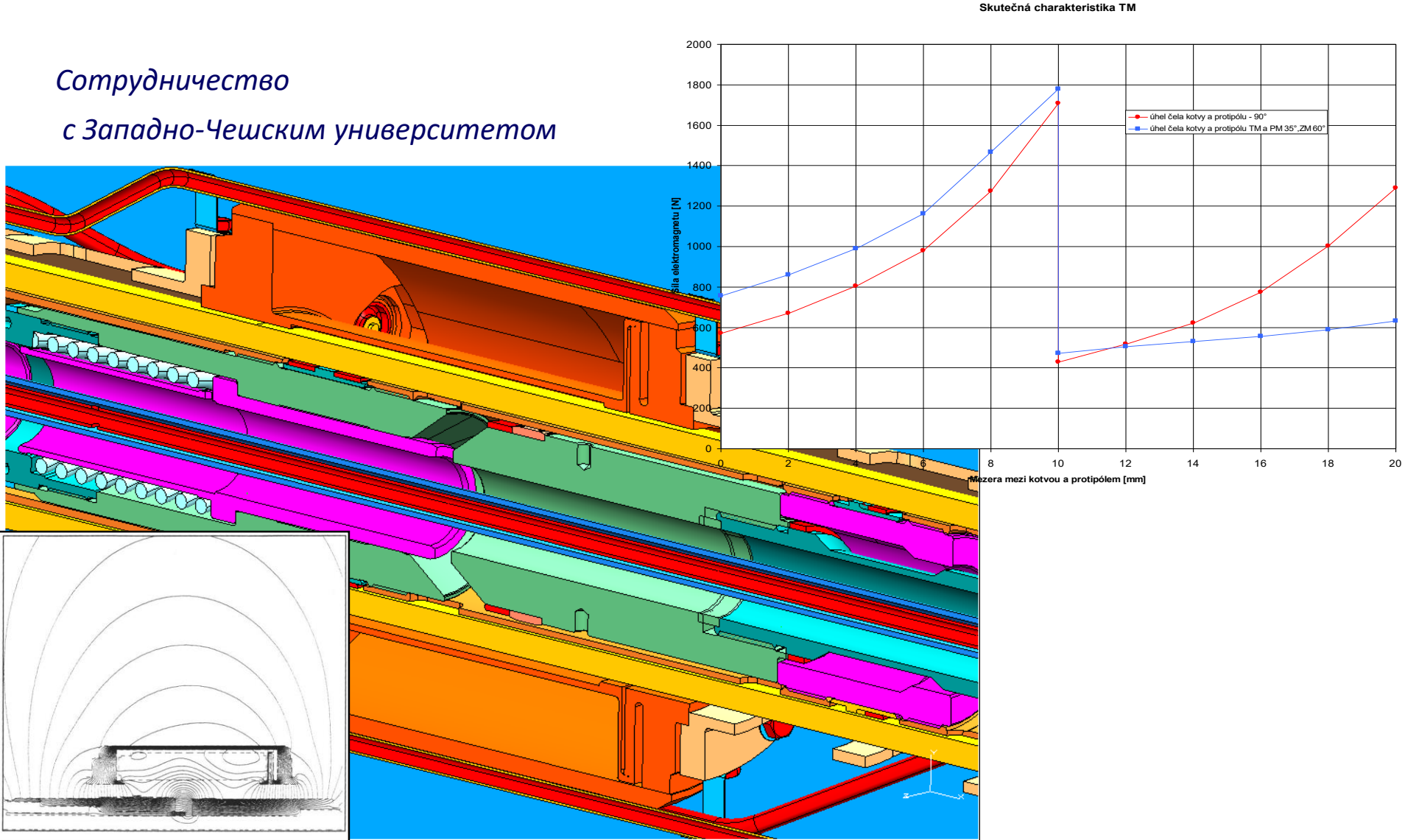


Приводы ОР СУЗ для АЭС с ВВЭР - 1000

Оптимизация магнитных контуров ШЭМ-М/3

Сотрудничество

с Западно-Чешским университетом



Приводы ОР СУЗ для АЭС с РБМК

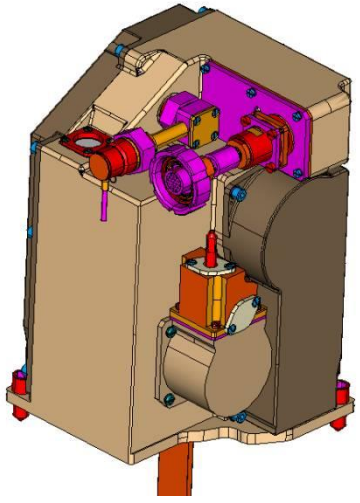
Приводы АЗ/БСМ – 274/20

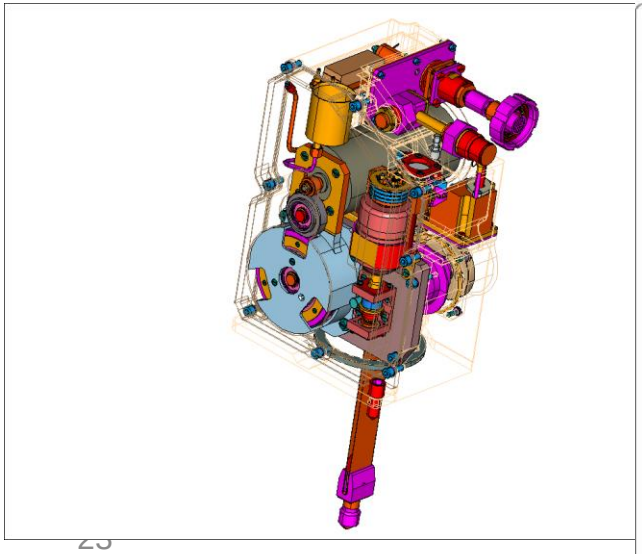
Модернизация в ŠKODA JS

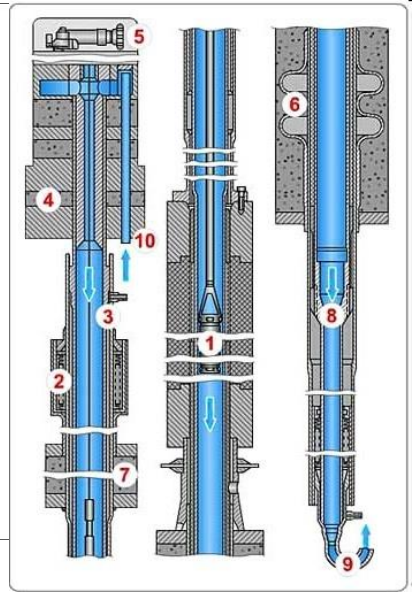
Поставлено:
58 шт. на Игналинскую АЭС, Литва

Рабочий ход: 7000 ± 50 мм
Скорость перемещения ОР: 200 - 400 мм/с
Габаритные размеры 245 x 245 x 365 мм

Вес привода: 45 кг



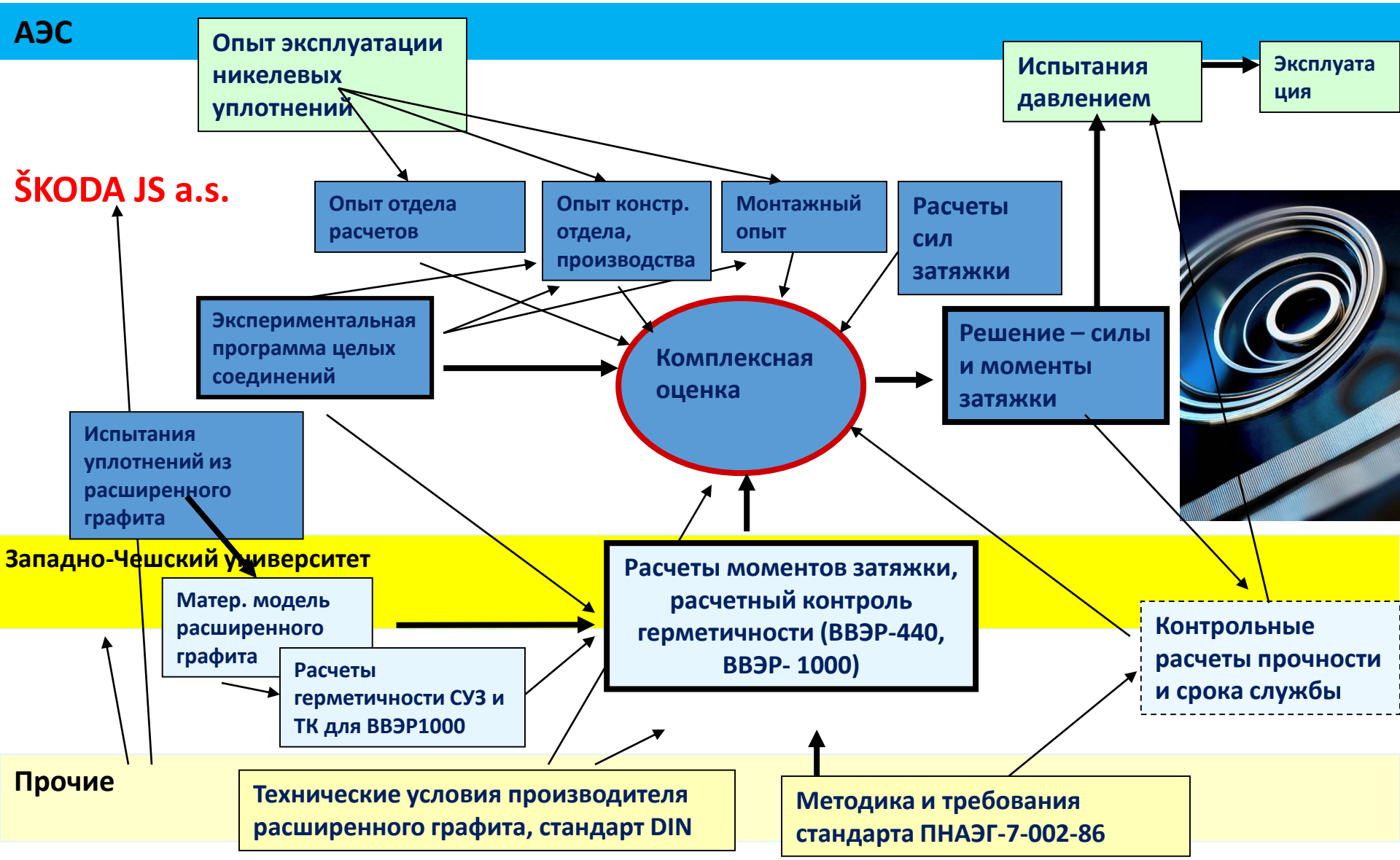




FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA

Замена уплотнительных колец фланцевых соединений приводов ОР прокладками из расширенного графита

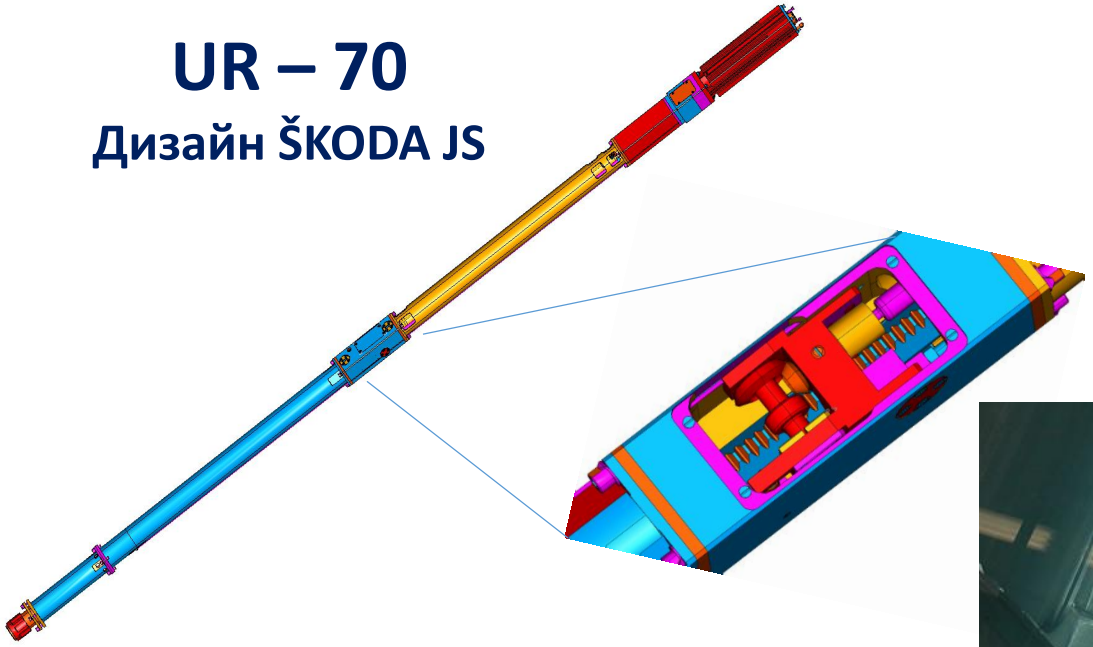
Расчет сил затяжки и моментов шпилек, контроль герметичности соединений

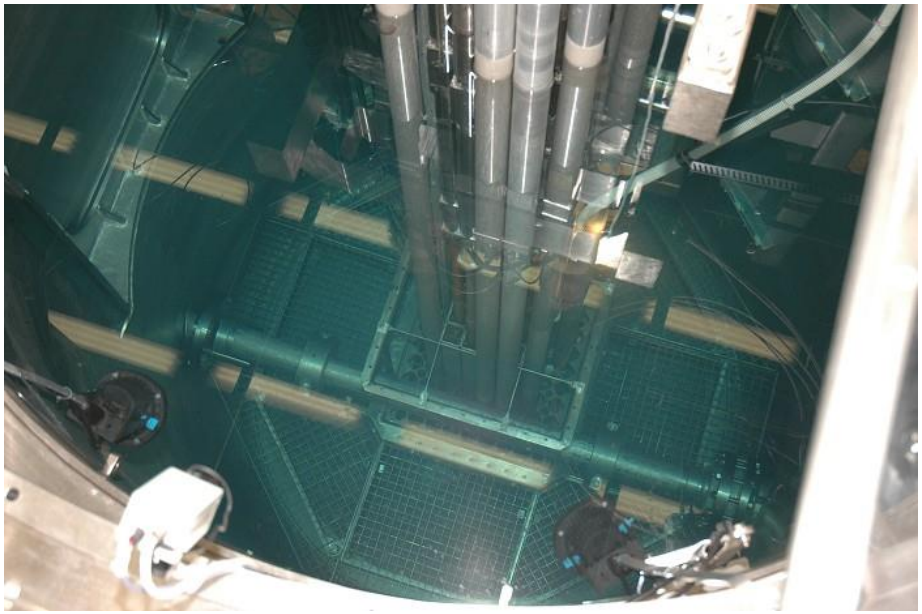


Приводы ОР СУЗ ŠKODA для исследовательских и учебных реакторов

UR – 70

Дизайн ŠKODA JS

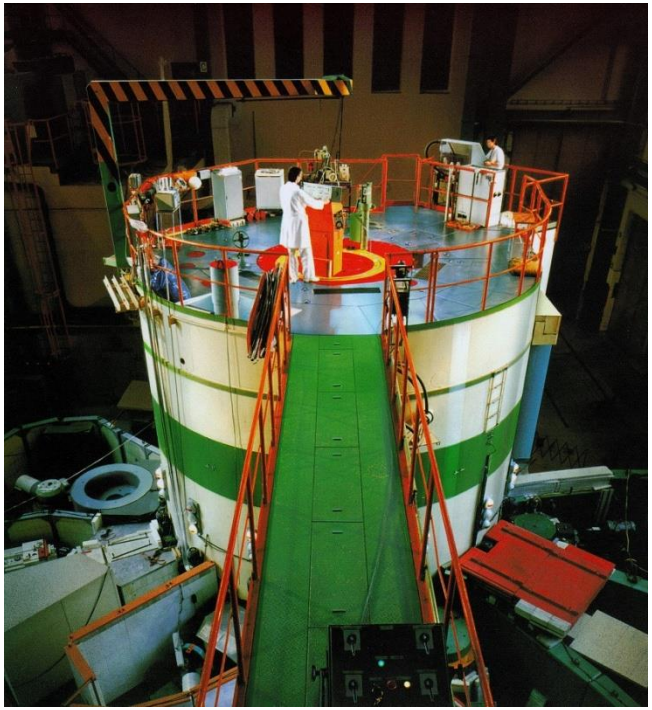




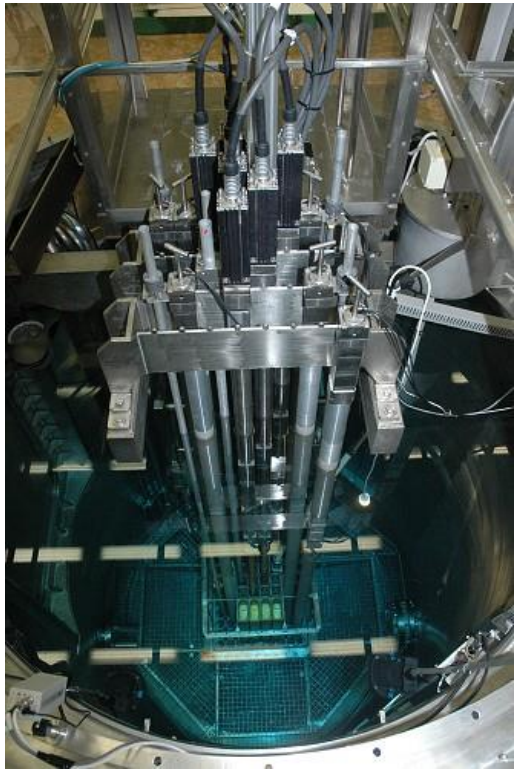
Максимальный подъем:	**704 мм**
Скорость перемещения ОР:	**1 – 39 мм/с**
Источник перемещения:	**шаговый электродвигатель**
Вес привода:	**около 40 кг**
Наружные размеры:	**70x70 мм**
Длина:	**4,2 – 5,3 м** (в зависимости от типа реактора)
Вес поднимаемой части:	**10,4 кг**

Приводы ОР СУЗ ŠKODA для исследовательских и учебных реакторов

Реконструкция системы управления исследовательских реакторов в Чешкой Республике



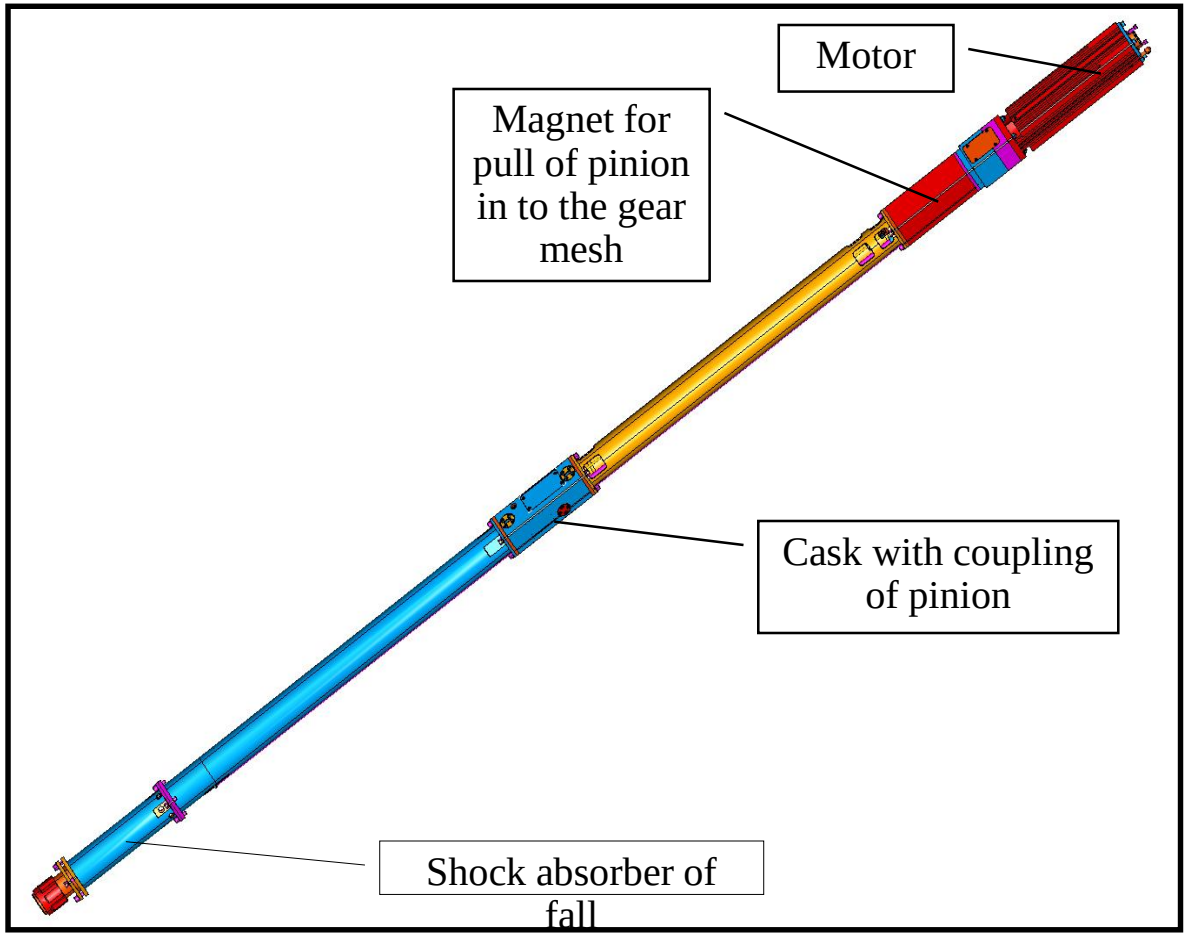
Реактор LVR-15:
- Институт ядерных исследований Řež u Prahy
- тепловая мощность - 10MW



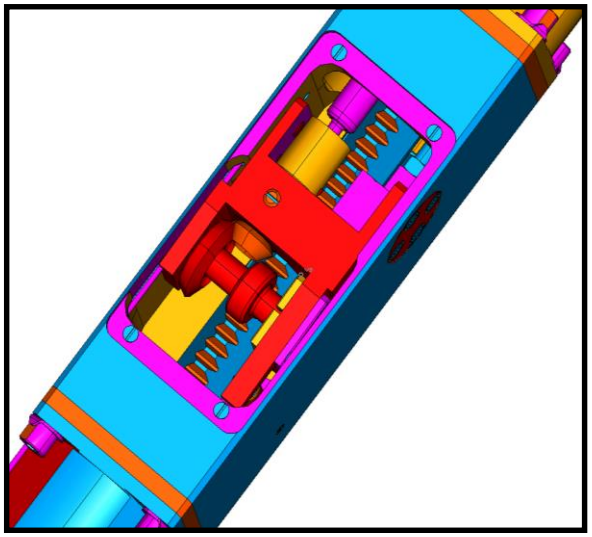
Реактор VR-1 (Воробей):
- ČVUT - FJFI Praha
- тепоплвая мощность $\leq$ 1kW

Приводы ОР СУЗ ŠKODA для исследовательских и учебных реакторов

Реконструкция системы управления реактора ИРТ200 в ИЯИ в Софии, Болгария (приостановлено)



Модернизированный привод UR-70



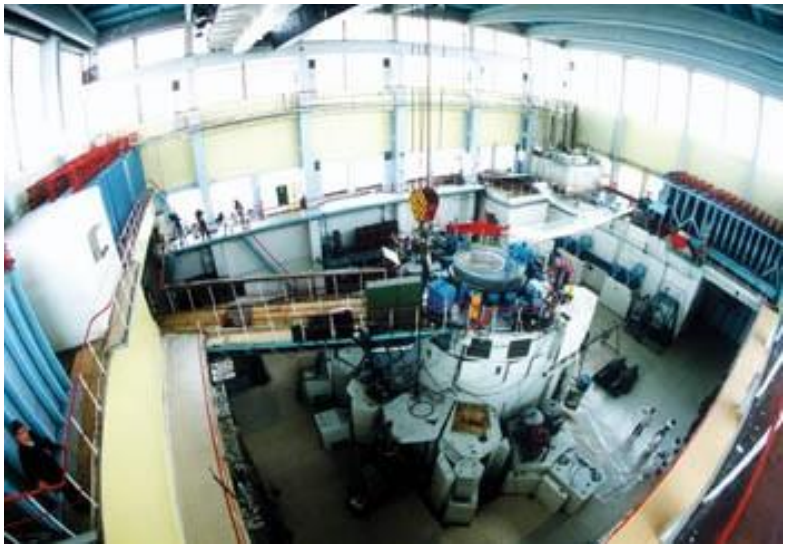
Приводы ОР СУЗ ŠKODA для исследовательских и учебных реакторов

Реконструкция системы управления реактора ВВР-К в ИЯФ в Алматы, Казахстан

Актуальный проект ŠKODA JS

В 2014 г. ŠKODA JS выиграла тендер на модернизацию приводов реактора ВВР-К в ИЯФ Алматы, Казахстан

Общая длина: 5,1 м
Подъем: 700 мм
Скорость перемещения ОР: 4 мм/с
Время падения ОР в активную зону не более 0,8 с



- **Разработка нового привода ОР**
- **(включая направляющий канал и абсорбирующие стержни с B4C)**
- **Очень ограниченное пространство для привода (до Ø 54мм)**
- **Высокая радиационная нагрузка (до 100 мЗв/час)**
- **поставка 12 шт. приводов, 10 шт. каналов и 12 шт. абсорбирующих стержней**

Приводы ОР СУЗ ŠKODA для исследовательских и учебных реакторов

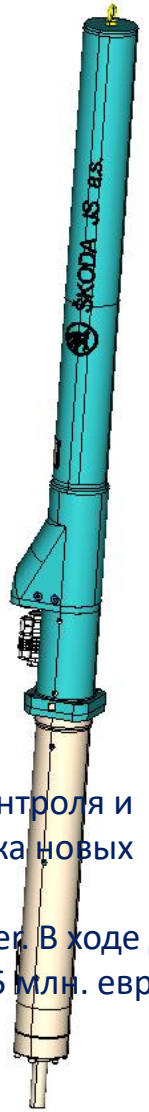
Реконструкция системы управления реактора TRIGA в Вене, Австрия

Актуальный проект ŠKODA JS

- **Комплектная реконструкция управляющей системы**
- **Поставка 3 шт. новых приводов**
- **(2x электромеханических, 1 электропневматический)**

без абсорбирующих стержней и каналов – останутся исходные

-**Среда с легкой радиационной нагрузкой и достатком места для нового привода**



Новая система и приводы управляющих стержней для исследовательского реактора в Вене

В первой половине 2013 г. компания ŠKODA JS приняла участие в тендере на модернизацию системы контроля и управления исследовательского реактора TRIGA в Вене. Составной частью заказа является также поставка новых приводов регулирующих стержней.
Свое предложение компания в августе предоставила в сотрудничестве с чешской компанией Data Partner. В ходе двух туров консультаций и уточнения предложения компания смогла победить и получить заказ объемом 1,5 млн. евро (более чем 40 млн. чешских крон).
Главными конкурентами была американская компания General Electric и аргентинская компания INVAP

Заключение

В мире имеется лишь несколько разработчиков и производителей приводов ОР СУЗ для АЭС. Для реакторов с водой под давлением в России это ОКБ Гидропресс и ИЗ, в Западной Европе ныне лишь фирма Jeumont, которая производит приводы ОР СУЗ для компании Areva, а в США – компания Westinghouse.

По американской лицензии приводы ОР СУЗ производятся в Японии, Корее и в Китае.

Компания ŠKODA JS является одной из немногих компаний, которая приводы ОР СУЗ не только производит, но и занимается разработками новых конструкций. Это, в сочетании с участием в сервисном обслуживании производимых приводов, позволяет компании сохранять позицию своей продукции на мировом уровне.

Спасибо за Ваше внимание!

Список литературы

[01] И.Я.Емельянов, В.В.Воскобойников, Б.А.Масленок: Основы конструирования исполнительных механизмов управления ядерных реакторов, Энергоатомиздат Москва,1987

[02] L.Haniger, J.Zdebor: Pohony regulačních orgánů reaktorů VVER na jaderných elektrárnách v ČSSR, ČSKAE, ÚISJP Zbraslav, 4/1988

[03] V.N. Shah a kol. : Residual Life Assesment of Major Light Water Reactor Components - Overview, NUREG/CR - 4731, EGG-2469, Volume 2, U.S. NRC, 11/1989

[04] J.R. Lamarsh; A.J. Baratha : Introduction to Nuclear Engineering; Prentice-Hall, Inc., New Jersey 2001

[05] В.П.Никитюк, А.Г.Казахмедов, В.П.Ваулин, И.Т.Ершов, В.П.Денисов: Приводы СУЗ реакторов ВВЭР для атомных электростанций, ИКЦ «Академкнига», 2004

[06] J.Zdebor, E.Pribulla :Control of Selected VVER Components Life Time ŠKODA JS Experience, 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Bejing, China, August 7-12, 2005

[07] J. Zdebor : Pohony regulačních orgánů ŠKODA nové generace, Bezpečnost jaderné energie, SÚJB Praha, 3/4 2006

[08] Семинар ВАО АЭС «АСПЕКТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ВО ВРЕМЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТИВНОСТЬЮ НА ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРАХ» 02-04.07.2007, МОСКВА

[09] J. Zdebor, M.Dvořáková : Mětallovědčeskije aspekty upravljenija srokom služby privodov ARK VVER 440, 10. mezinárodní konference „Problemy metallověděnija oborudovanija AES“, St. Petěrburg, Rusko 10/2008

[10] J. Zdebor : Pohony řídících tyčí jaderných reaktorů, Modelování a měřeni v energetice, Západočeská univerzita, Seminář Nečtiny, 05/2010

[11] J. Zdebor : Design, spolehlivost a životnost zařízení v jaderné energetice, VŠB TU Ostrava, 06/2013

[12] J. Zdebor : Pohony RO jaderných reaktorů, Studentská konference CENELÍN, ČVUT Praha, 09/2015