



# АНАЛИЗ ФЛУКТУАЦИЙ МОЩНОСТИ И РЕАКТИВНОСТИ РУ БН-800 ПО ПОКАЗАНИЯМ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ (СДРУ)

+

Лукьянов Д.А., Кудряев А.А.  
Научно-технический центр «Диапром» (АО "НТЦД")

# Система диагностирования реакторной установки БН-800 (СДРУ)



- ✓ СДРУ в промышленной эксплуатации на 4 блоке Белоярской АЭС с 2016 года.
- ✓ СДРУ предназначена для комплексного контроля активной зоны РУ и обнаружения на ранней стадии отклонений от нормальной эксплуатации **реактивным, температурным и нейтронно-шумовым методами.**
- ✓ По показаниям СДРУ обеспечивается обнаружение аномалий: затеснение и блокировка проходных сечений ТВС, кипение натрия в ТВС, плавление твэл, всплытие ТВС, самоход стержней СУЗ, попадания инородных предметов или сред в активную зону, нарушение работы теплообменного оборудования и др.
- ✓ В составе СДРУ **4 канала измерения тока нейтронных детекторов** - забаковых подвесок ионизационных камер и **82 каналов измерения температуры** внутри корпуса реактора - над головками ТВС, на входе и выходе ПТО, по высоте активной зоны.
- ✓ При комплексном диагностировании также используются параметры из АСУТП (мощность реактора, положение органов СУЗ, частота вращения ГЦН-1 и др.) и показания оперативных систем контроля герметичности оболочек твэлов (КГО).

# Исходные данные

- В докладе представлены результаты анализа параметров СДРУ, характеризующих **флуктуации мощности и реактивности** реактора БН-800, при работе реактора с урановой загрузкой активной зоны и при переходе на уран-плутониевое МОКС-топливо.
- Анализ флуктуаций мощности и реактивности проводился по показаниям СДРУ, полученным в 7-12 микрокампаниях (МК) реактора БН-800.
- В 7 и 8 МК реактор работал на урановом топливе, в 9 МК была начата загрузка МОКС-топлива, которая была завершена в 11 МК.
- Показания измерительных каналов СДРУ, которые использовались при проведении анализа:
  - ток штатных забачковых подвесок ионизационных камер (I), А;
  - реактивность по показаниям реактиметров ЦВР-10 ( $\rho$ ),  $\beta_{эфф}$ .
- Период измерения и регистрации параметров составляет 1 с.

# Используемые параметры

- Для оценки **времени от начала МК** использовался параметр энерговыработки в эффективных сутках  $t_{эфф}$ , рассчитываемый СДРУ.
- Для **пересчета показаний тока нейтронной камеры в мощность** реактора использовался коэффициент  $K_{IN}$ , [%  $N_{НОМ}$ /А], который определялся для каждой МК методом наименьших квадратов на основе регрессионного уравнения:

$$N = I \times K_{IN} \quad (1)$$

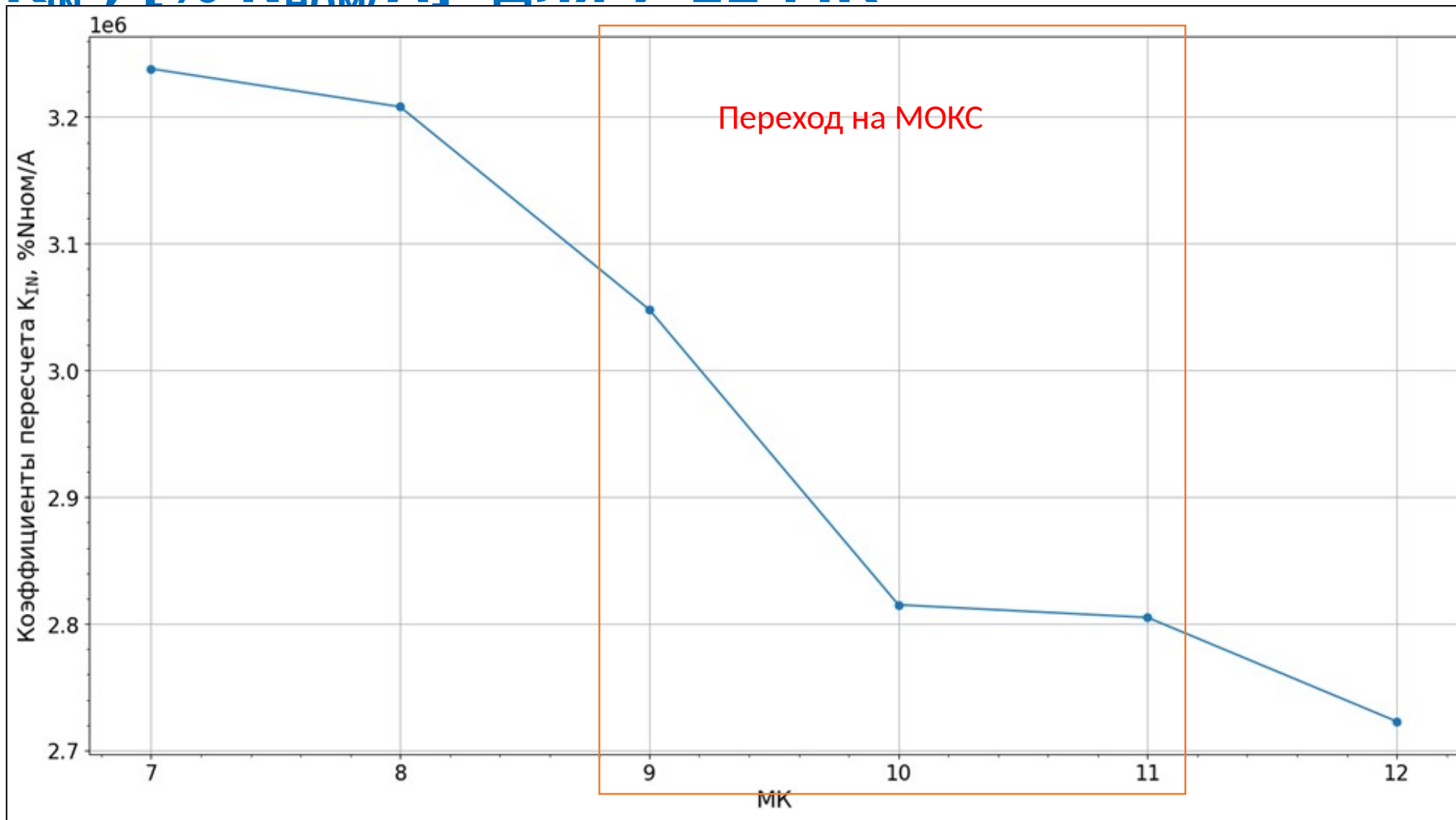
где  $N$  – значение параметра АСУТП «Мощность средняя», [%  $N_{НОМ}$ ]  
определяется по показаниям 6 измерительных каналов АКНП;

$I$  – значение тока нейтронной камеры СДРУ, [А]

- **Параметр мощности по току**  $N_I = I \times K_{IN}$ , [%  $N_{НОМ}$ ]

*Расхождения показаний параметров мощности по току  $I \times K_{IN}$  и средней мощности  $N$  незначительны и обусловлены проведением тарировки мощности реактора.*

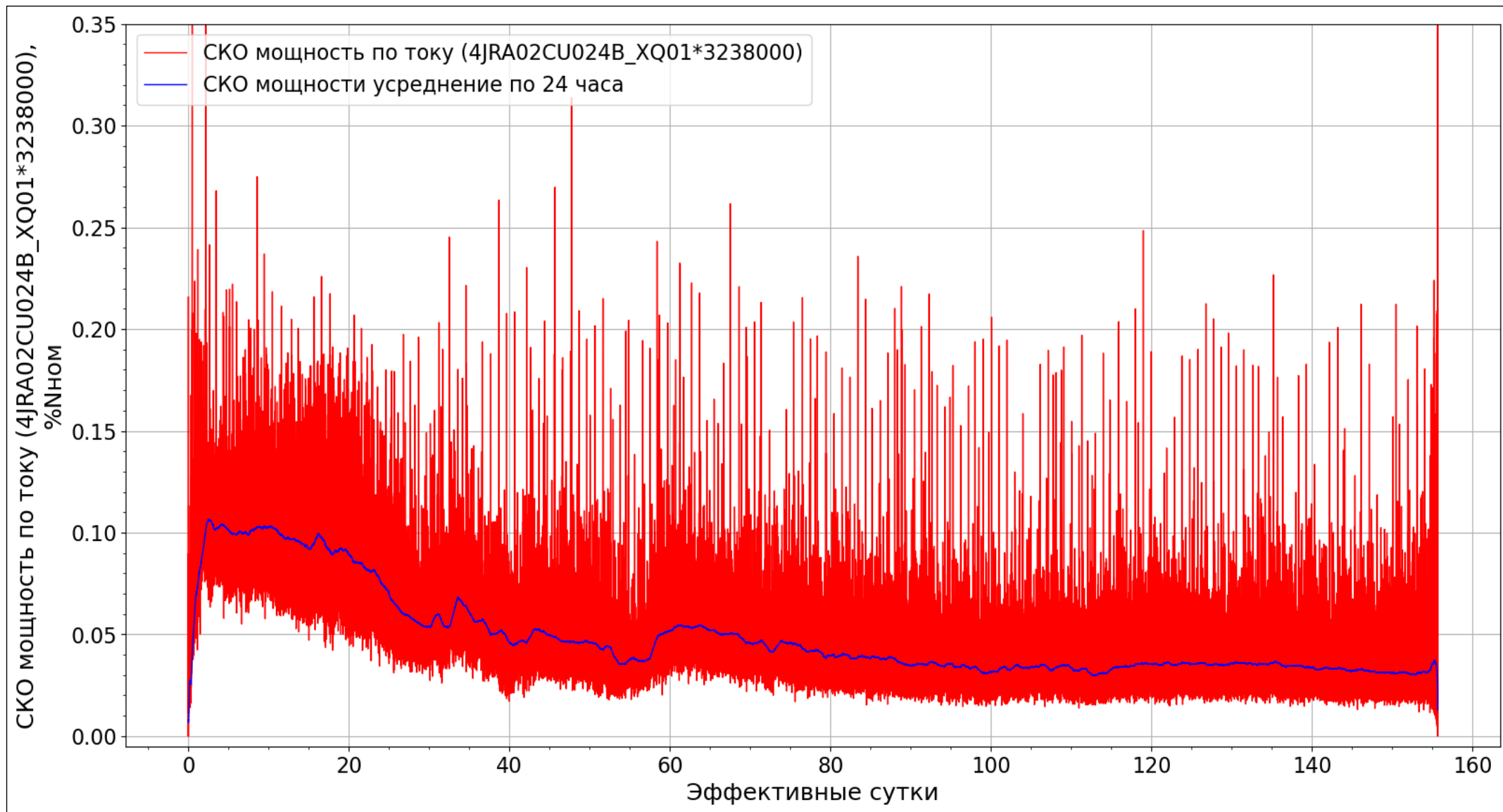
# Коэффициент пересчета тока нейтронной камеры в мощность реактора $K_{IN}$ , [% $N_{ном}/A$ ] для 7-12 МК



# Анализ флуктуации мощности реактора

- В качестве параметра флуктуации (меры изменчивости) параметра мощности по току камеры  $N_1$  использовалась статистика **среднеквадратического отклонения (СКО)**.
- Интервал времени между последовательными значениями  $N_1$  1 с.
- Расчет СКО проводился по скользящему окну 60 с, затем полученная выборка поминутных значений СКО сглаживалась методом скользящего среднего по окну 1 сутки.
- *В качестве альтернативной непараметрической меры изменчивости также использовалась статистика межквартильный размах, получены аналогичные результаты.*

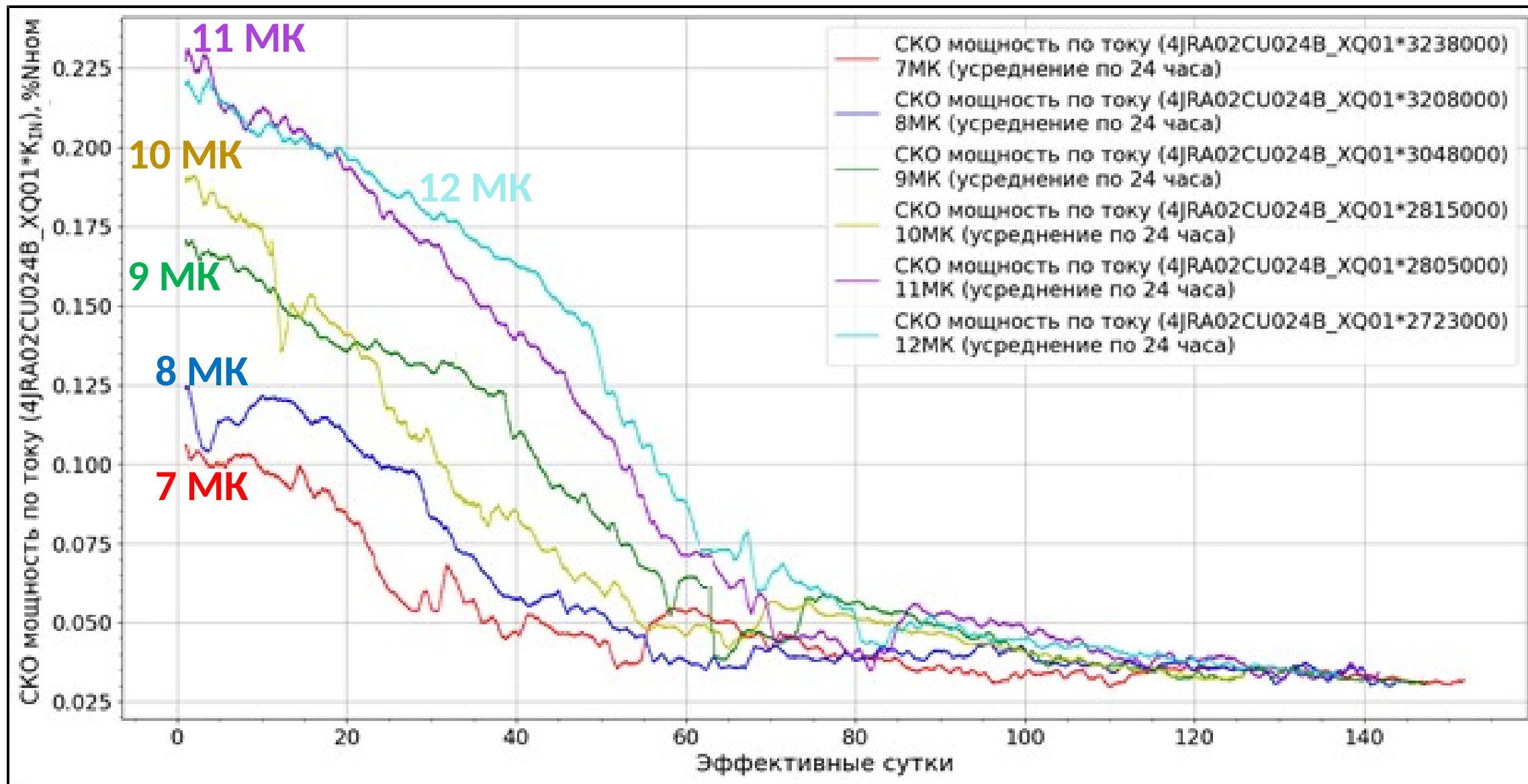
# СКО мощности реактора от эфф. суток в / МК (пример)



28.06.2024

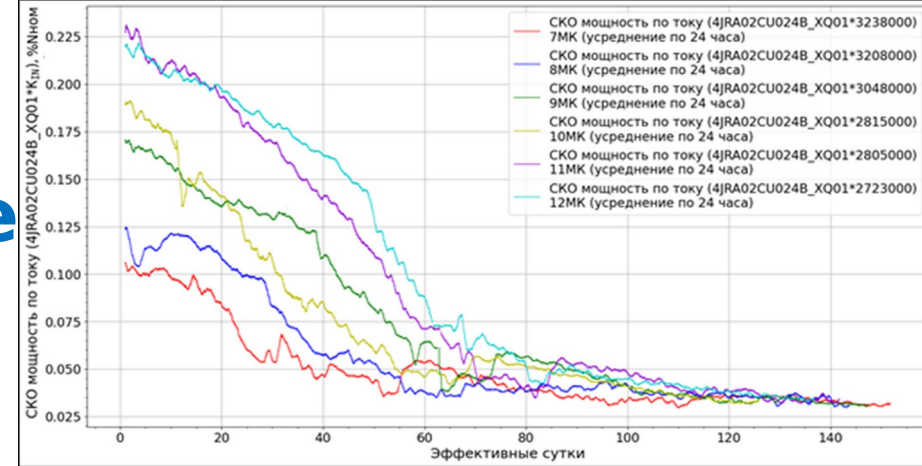
Нейтроника - 2024

# СКО мощности реактора от эфф. суток в 7-12 МК





# Результаты анализа флуктуации мощности ре



- В начале МК 7-12 наблюдается **повышенная величина флуктуации** мощности реактора. Причем уровень флуктуации мощности значительно возрастает при переходе на МОКС топливо, начиная с 9 МК.

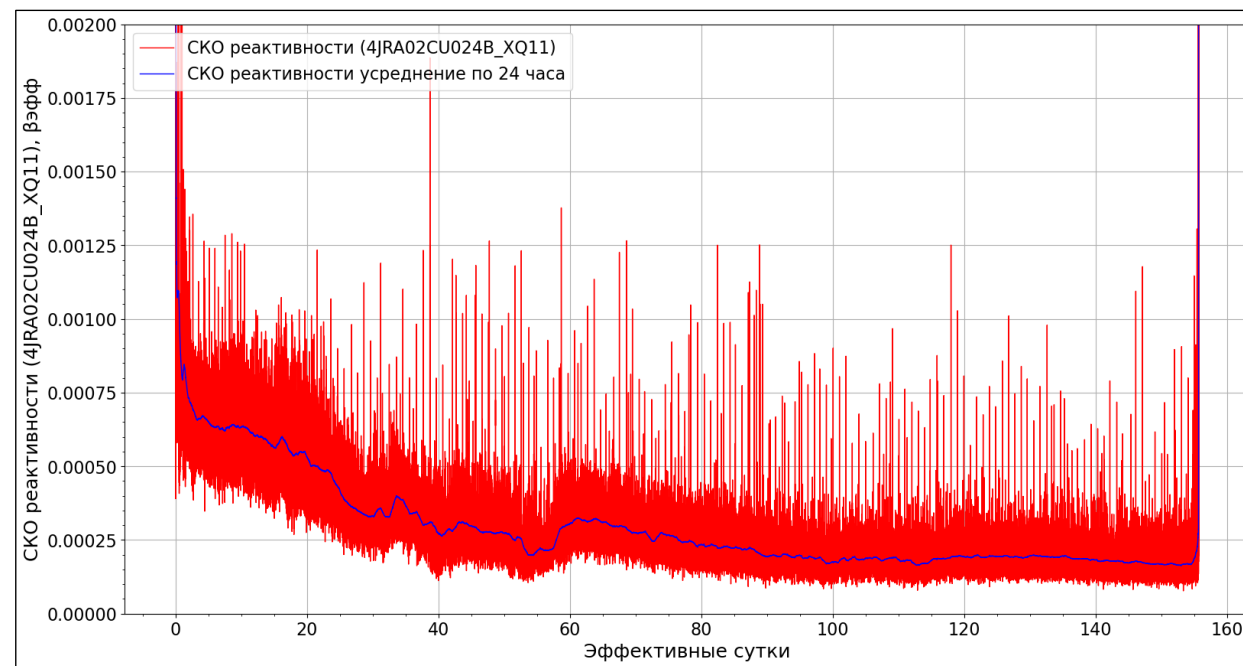
- Затем в течении 60 - 80 эфф. суток (около 1/2 МК) уровень флуктуации мощности в 7-12 МК **снижается**.
- Вторую половину МК флуктуации мощности **относительно стабильны**, величина СКО мощности во всех МК близка ( $0,05 \% N_{НОМ}$ )

№ МК	СКО МОЩНОСТИ, % $N_{НОМ}$
7	0,11
8	0,13
9	0,17
10	0,19
11	0,23
12	0,22

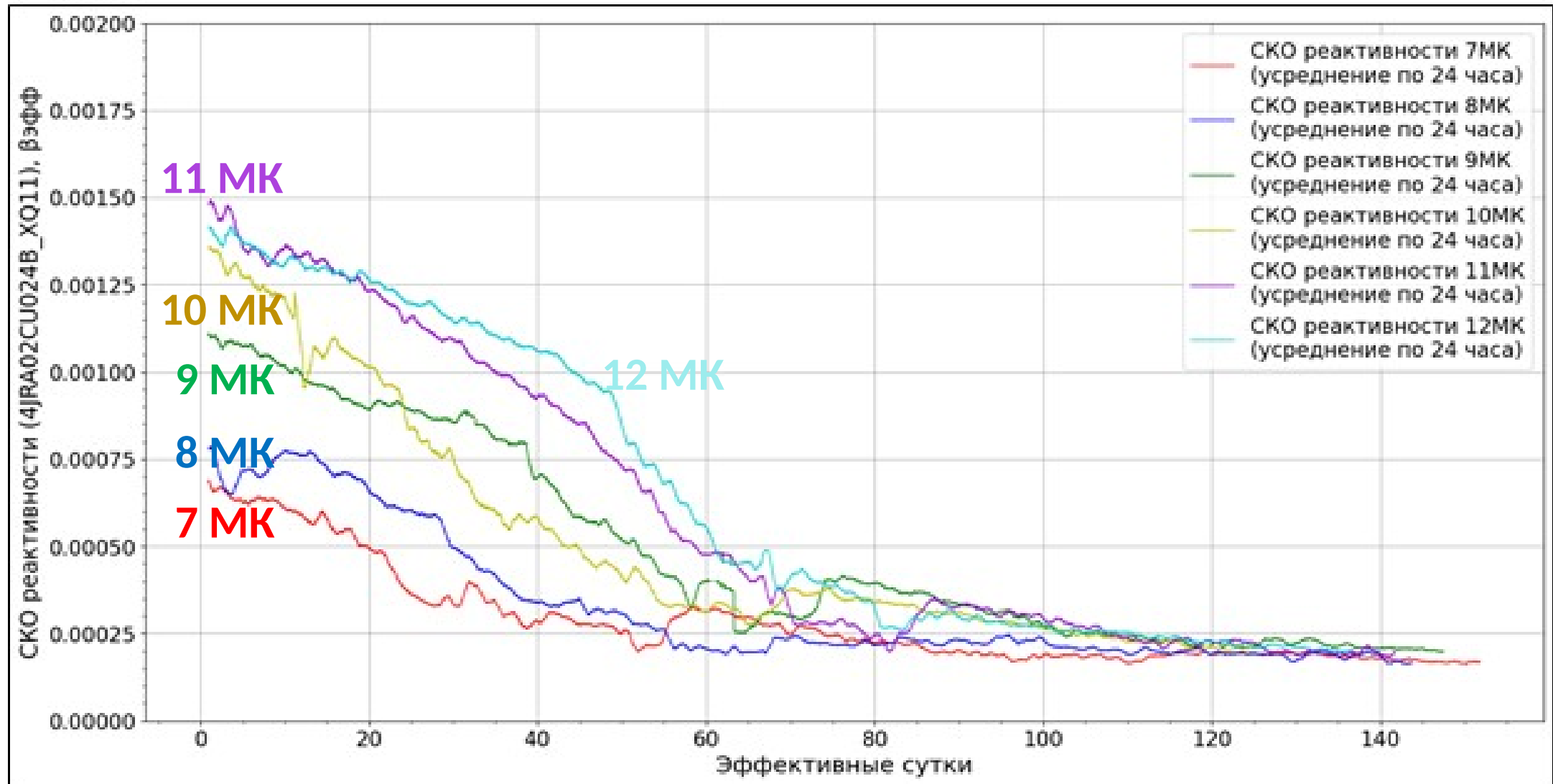
# Анализ флуктуации реактивности

- Реактивность по показаниям реактиметров ЦВР-10 в составе СДРУ,  $\beta_{\text{эфф}}$ .
- Аналогично мощности, расчет СКО проводился по скользящему окну 60 с, затем полученная выборка поминутных значений СКО сглаживалась методом скользящего среднего по окну 1 сутки

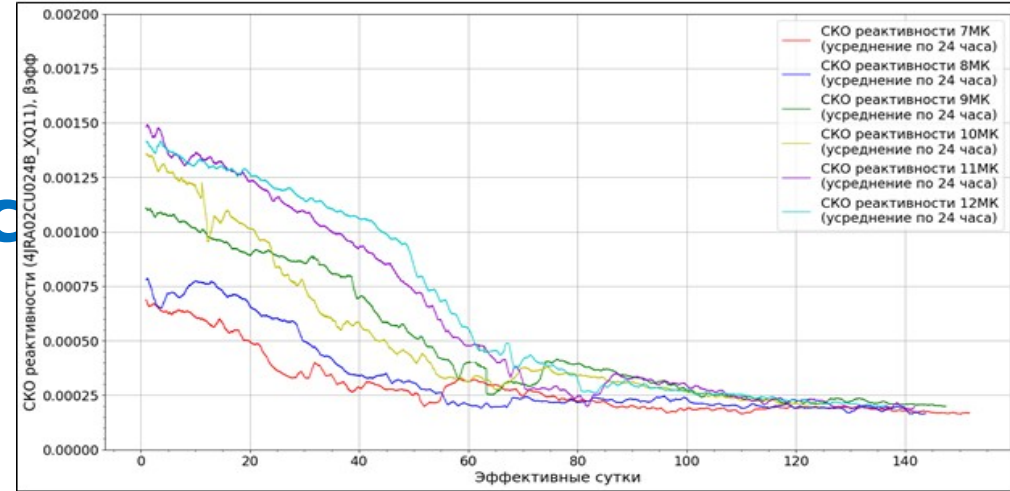
СКО реактивности от эфф. суток  
в 7 МК



# СКО реактивности от эфф. суток в 7-12 МК



# Результаты анализа флуктуации реактивности



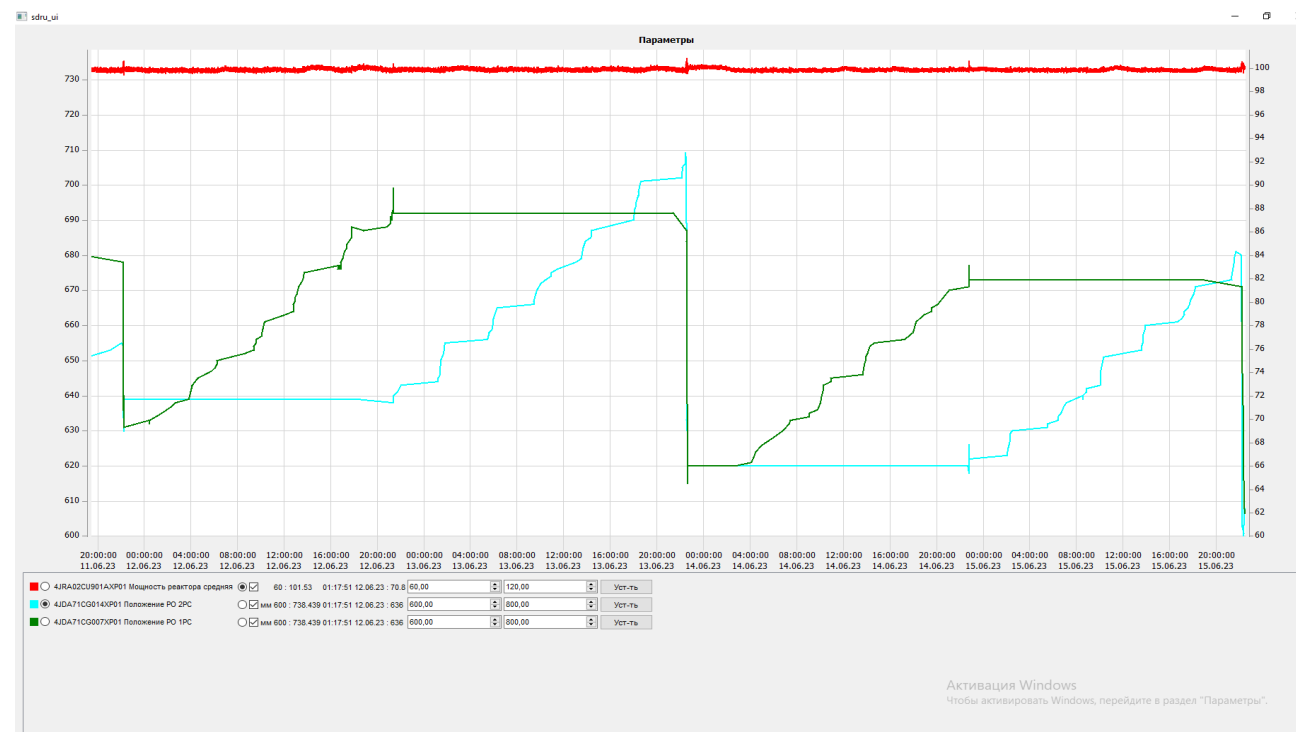
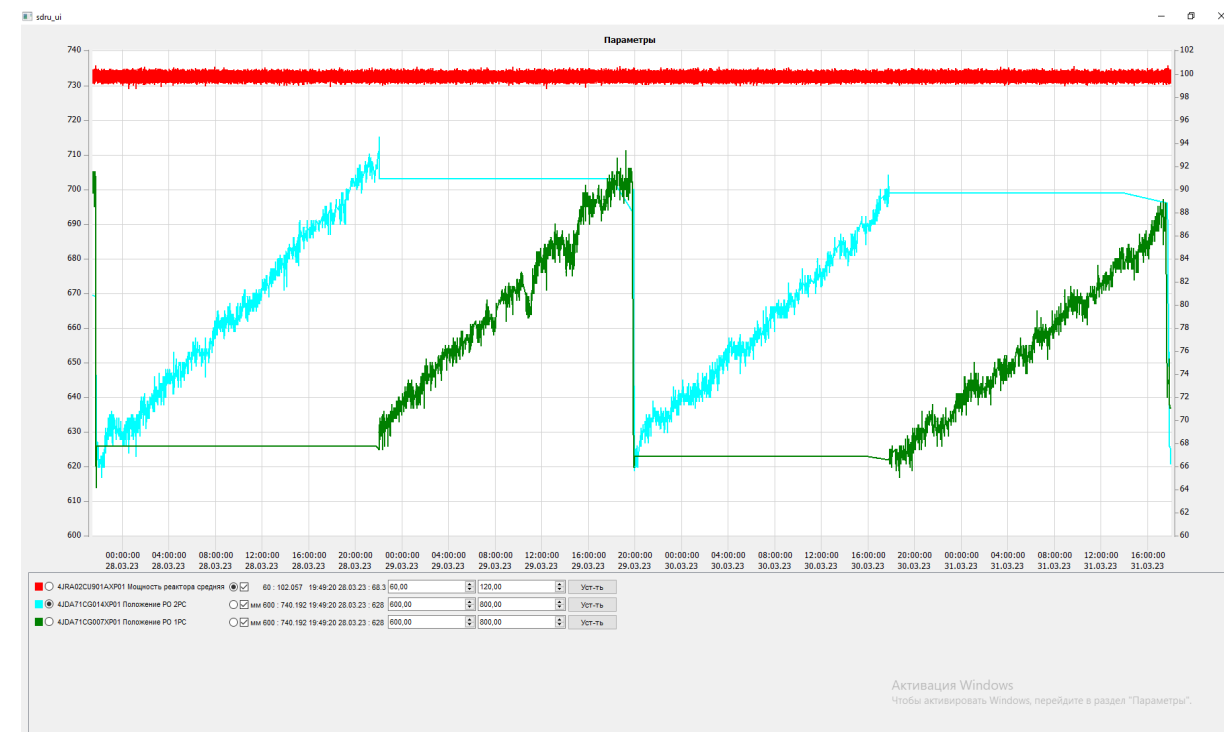
- В начале МК 7-12 наблюдается **повышенная величина флуктуации** реактивности РУ. Причем уровень флуктуации мощности значительно возрастает при переходе на МОКС топливо, начиная с 9 МК.
- Затем в течении 60 - 80 эфф. суток (около 1/2 МК) уровень реактивности в 7-12 МК **снижается**.
- Вторую половину МК флуктуации реактивности **относительно стабильны**, величина СКО реактивности во всех МК близка (0,02 % β<sub>эфф</sub>)

№ МК	СКО реактивности, % βэфф
7	0,07
8	0,08
9	0,11
10	0,13
11	0,15
12	0,14

# Мощность реактора средняя и положение стержней РС1, РС2 в 12 МК (по данным АСУТП)

## начало микрокампании (1)

## окончание микрокампании (2)



## Сравнительная оценка частоты перемещения РС1, РС2 по данным АСУТП

- Запись параметров положения РО РС1, РС2 в базу данных СДРУ производится при изменении положения стержней («запись по апертуре»). Соответственно, каждое значение указанных параметров в архиве показаний фиксируется в момент перемещения стержня.
- Для проведения сравнительного анализа на каждом из выбранных интервалов в начале и в конце МК были отобраны по 35 последовательных значений положений стержня РС1 при нахождении в режиме активного регулирования.
- При **повышенном уровне флуктуации** мощности и реактивности (начало МК) 35 последовательных перемещений РС1 фиксируются за время **менее 30 мин.**
- При **снижении уровня флуктуации** мощности и реактивности до стационарного уровня (окончание МК) 35 последовательных перемещений РС1 фиксируются за время **около 22 часов.**
- Для РО РС2 динамика аналогичная.

# Результаты анализа

- Значение коэффициента пересчета тока нейтронной камеры в мощность реактора в МК 7-12 значительно снижалось при проведении загрузок ТВС с МОКС топливом в реактор БН-800. В 12 МК коэффициент пересчета тока камеры в мощность реактора снизился на  $\sim 20\%$  по сравнению со значением данного коэффициента в 7 МК. Это означает, что **от 7 к 12 МК ток ионизационных камер в составе ПИК, пропорциональный плотности потока нейтронов, возрастал.**
- В анализируемых 7-12 МК **наблюдается повышенная величина флуктуации мощности реактора и реактивности в начале микрокампании.** Уровень флуктуации мощности и реактивности в начале микрокампании от 7 к 11 МК **вырос в  $\sim 2$  раза.** В 12 МК уровень флуктуации мощности реактора близок показателям 11 МК, что объясняется завершением перехода реактора БН-800 на МОКС топливо.
- Возможной причиной повышенного уровня флуктуации мощности и реактивности на МОКС топливе является повышенная интенсивность растрескивания таблеток в свежих ТВС в первой половине микрокампании (частное мнение специалиста БАЭС).

# Результаты анализа (продолжение)

- В течении первой половины микрокампании (60- 80 эфф.сут.) уровень флуктуации мощности реактора и реактивности в анализируемых МК 7-12 снижался. Вторую половину микрокампании наблюдаемые уровни флуктуации мощности и реактивности **относительно стабильны и близки** для всех анализируемых МК.
- После перехода на МОКС топливо при повышенном уровне флуктуации мощности и реактивности в начале 12 микрокампании **регулирующие стержни СУЗ перемещались в  $\sim 40$  раз чаще**, чем в конце МК. Интенсивный режим работы регуляторов может повлиять на ресурсные характеристики электромеханического оборудования СУЗ.
- ....

Лукиянов Дмитрий Александрович, [dluk@diaprom.ru](mailto:dluk@diaprom.ru)