

Разработка и применение специализированного программного обеспечения для обработки комплексных испытаний СВРК

В современной системе внутриреакторного контроля (СВРК) количество получаемых, обрабатываемых и расчетных параметров превысило десять тысяч штук. Все эти параметры должны быть проверены на достоверность на этапе ввода блока в эксплуатацию и периодически во время эксплуатации. Кроме того, должны быть проверены значения расчетных параметров путем независимого расчета.

При этом сроки проведения испытаний и обработки результатов довольно сжаты. Как правило, не велико количество персонала, задействованного в обработке испытаний.

В таких условиях неизбежно применение специализированного программного обеспечения для обработки комплексных испытаний СВРК.

Специалистами НВАТЭ разработан и опробован такой комплекс специализированных программ в 2004-2007 гг. при пуске 3-го блока Калининской АЭС и 1 и 2-го блока Тяньваньской АЭС (Китай).

В состав комплекса входят следующие программы:

- Термоконтроль на ХГО и МКУ;
- Термоконтроль на мощности;
- Достоверность общетехнологических параметров;
- Проверка токов ДПЗ;
- Проверка энерговыделения;
- Проверка параметров защит ПТК-3;
- Проверка расчета мощности РУ;
- Расчет коэффициентов влияния температуры петель на температуру на входе в активную зону (Термополе);
- Проверка правильности отображения координат КНИ (определение «перепуток»);
- Программа «Динамика» для графического анализа параметров.

Данный комплекс позволяет обрабатывать все испытания СВРК на блоке.

Программы, входящие в специализированный комплекс, имеют ряд особенностей, которые дают им преимущество перед другими стандартными программами (например, MS EXCEL, MATHCAD):

- специализированные программы решают узкую конкретную задачу;
- удобный, понятный интерфейс для пользователя;
- исполнение ПО в виде мастера отчетов с возможностью шагов вперед, назад;
- гибкость настроек под различные этапы пуска и блоки АЭС;
- одновременная загрузка нескольких файлов с данными от разных источников с переменным шагом между записями, временем начала и конца выборки;
- выходной информацией является готовые таблицы, копируемые в отчетную документацию по испытаниям;
- сохранение настроек, шаблонов для повторного использования.

Для пояснения вышесказанного рассмотрим программу «Термополе – расчет коэффициентов влияния температуры петель на входную температуру в зоне».

Впервые данная программа использовалась для обработки испытания на первом блоке Тяньваньской АЭС в декабре 2005 г [1]. Познакомимся с программой на примере этих данных.

При запуске программы появляется окно (см. Рис.1), на котором можно определить название, цель и авторов программы.

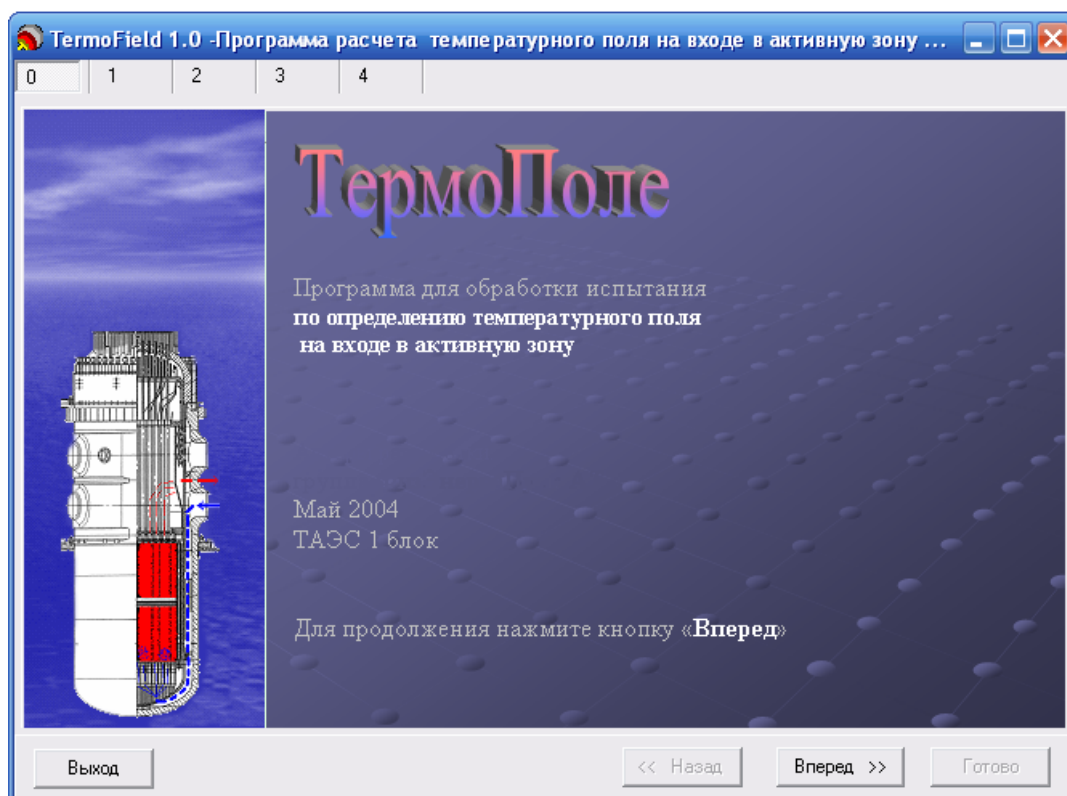


Рис. 1. Окно при запуске программы.

Затем пользователь переходит на следующий шаг – «Загрузку данных» (см. Рис.2). На этом этапе пользователь открывает файл с данными по испытанию. Программа выбирает из файла необходимые параметры для обработки и, при необходимости, указывает недостающие. Список необходимых параметров задается идентификаторами (кодами в формате KKS) в отдельном файле, ссылка на который имеется в настроечном файле. Таким образом, для привязки к конкретному блоку, достаточно сформировать текстовый файл с нужными идентификаторами и указать ссылку на него в настроечном файле.

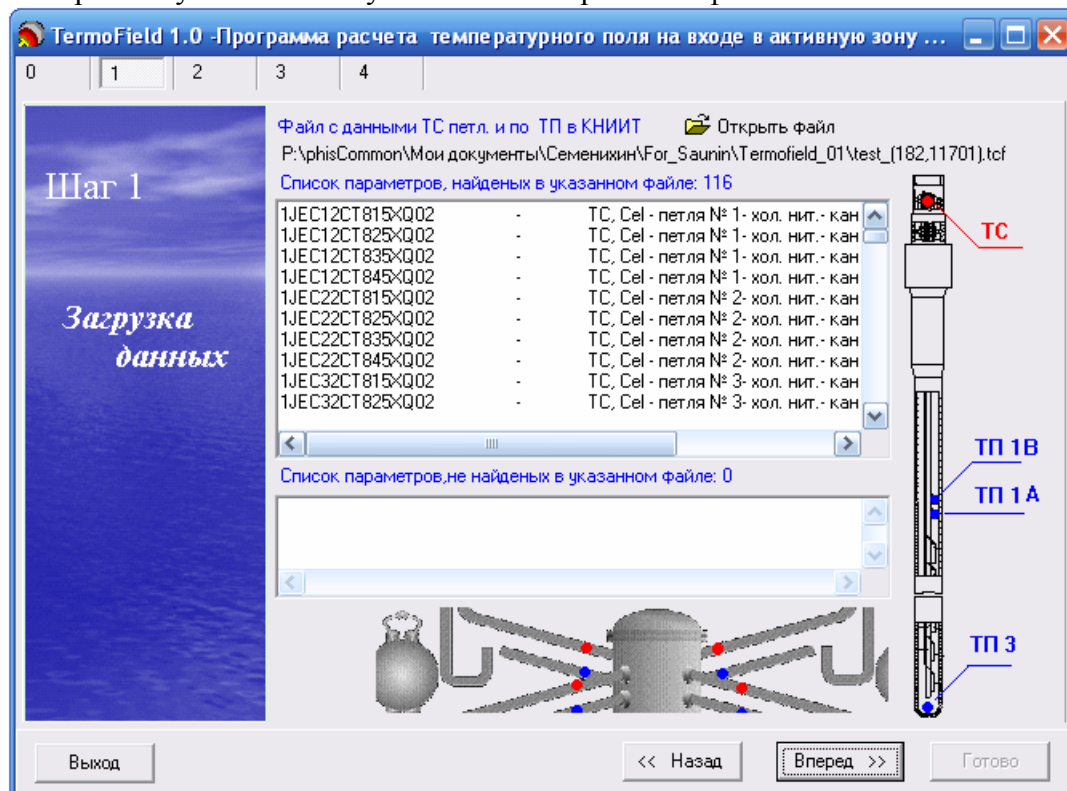


Рис. 2. Загрузка данных.

На следующем шаге программы пользователь указывает режим работы РУ (количество работающих петель и/или номер отключенной петли, если она имеется). Так же требуется указать критерий для проверки результатов.

Кроме того, необходимо указать используемые в расчете датчики (см. Рис. 3).

Шаг 2

Установка режима

Количество работающих ГЦНА

☒ 4 ГЦНА

☐ 3 ГЦНА

Номер отключенного ГЦНА

Критерий успешности

Ср. кв. отклонение восстановленной Т от измеренной Т меньше порога А:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (T_j^{восст} - T_j^{измер})^2}{n(n-1)}} < A$$

A =

Температура при входе в активную зону определяется по

☐ ТП1В

☒ ТП3

Выход << Назад Вперед >> Готово

Рис. 3. Установка режимов работы РУ

На следующем шаге происходит загрузка данных по испытанию, и строится кривая поведения средних температур в нитках (см. Рис. 4).

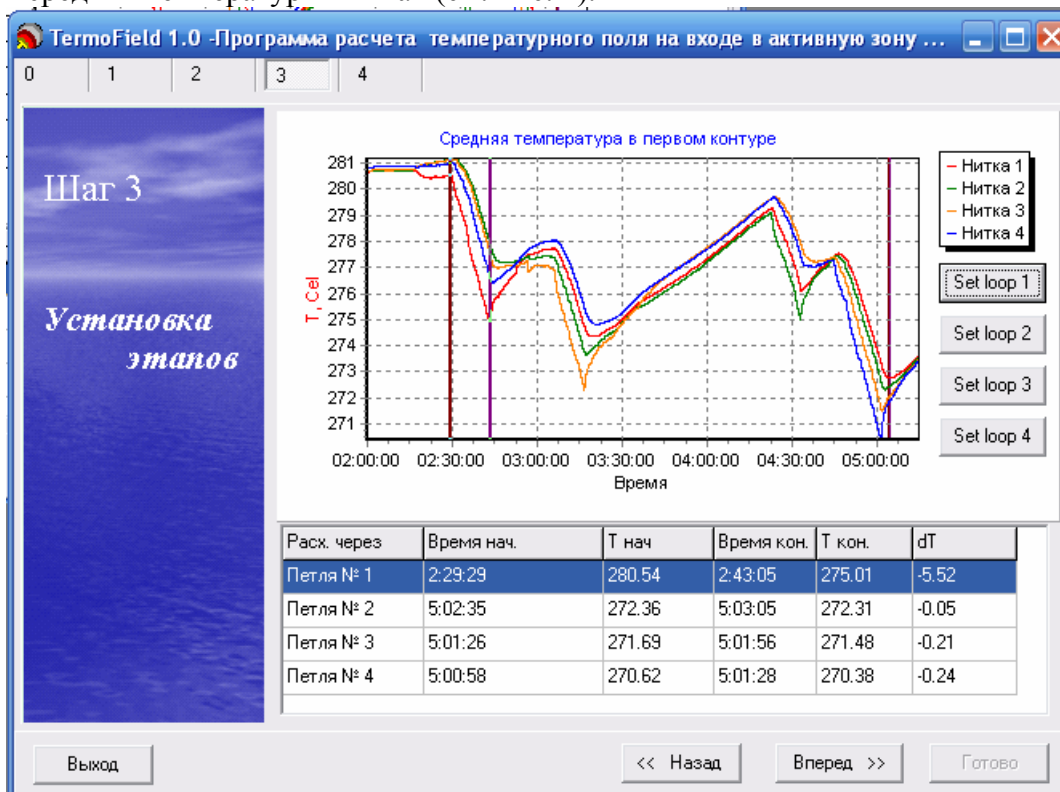


Рис. 4. Установка моментов начала и конца расхолаживания через выбранные петли.

На этом же шаге пользователь выбирает моменты времени, указывающие на начало и конец расхолаживания РУ через выбранную петлю. При этом программа рассчитывает начальные и конечные значения всех переменных, используя линейную аппроксимацию на выделенном интервале времени.

На следующем шаге происходит решение комплекса j систем, состоящих из 4-х (3-х при 1-м отключенном ГЦН) линейных уравнений:

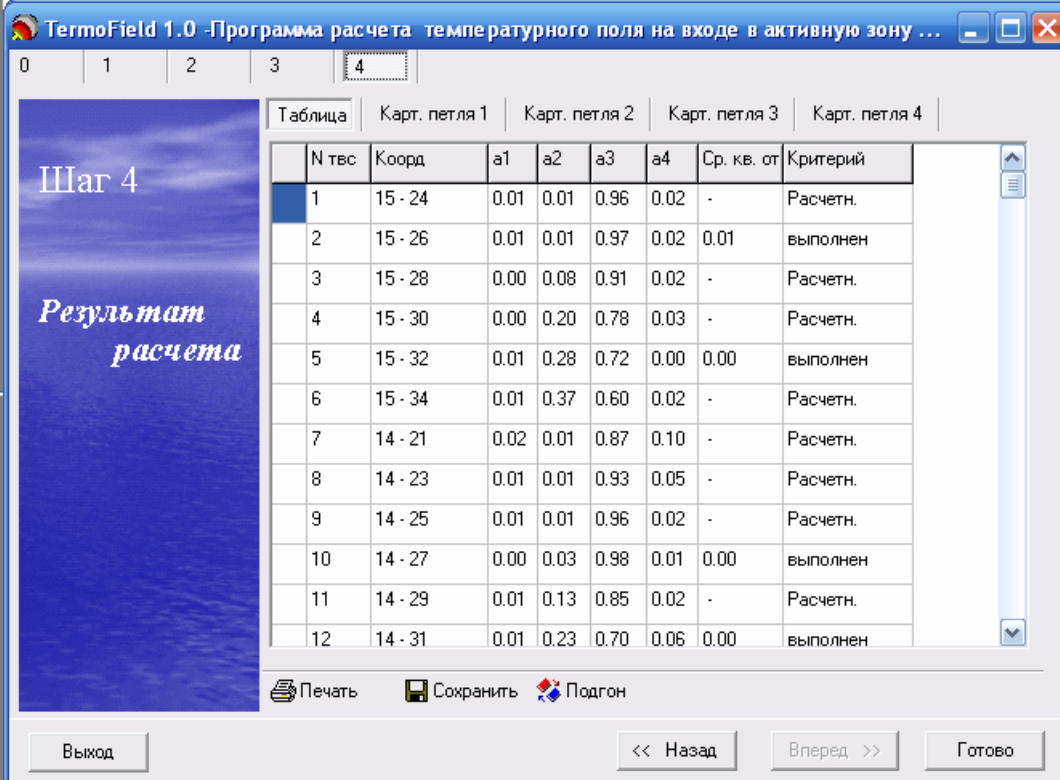
$$\begin{cases} a_1 T_{11} + a_2 T_{12} + a_3 T_{13} + a_4 T_{14} = T_1^j \\ a_1 T_{21} + a_2 T_{22} + a_3 T_{23} + a_4 T_{24} = T_2^j \\ a_1 T_{31} + a_2 T_{32} + a_3 T_{33} + a_4 T_{34} = T_3^j \\ a_1 T_{41} + a_2 T_{42} + a_3 T_{43} + a_4 T_{44} = T_4^j \end{cases}$$

где T_{kl} - температура в k -ой петле при l - расхолаживании

T_k^j - температура в j -ой ТВС при расхолаживании через k -ую петлю.

Пользователь имеет возможность изменять начальные и конечные моменты времени и, тем самым, корректировать решение системы.

На следующем этапе пользователь получает решение уравнение в табличном виде (рис. 5) и в виде цветных картограмм с подписями значений коэффициентов (рис. 6). Графическое представление позволяет оценить достоверность решения системы уравнений, опираясь на гладкость перехода цвета от минимума к максимуму. Это позволяет идентифицировать возможные выбросы при решении, т.к. коэффициенты должны изменяться плавно, без скачков.



N твс	Коорд	a1	a2	a3	a4	Ср. кв. от	Критерий
1	15 - 24	0.01	0.01	0.96	0.02	-	Расчетн.
2	15 - 26	0.01	0.01	0.97	0.02	0.01	выполнен
3	15 - 28	0.00	0.08	0.91	0.02	-	Расчетн.
4	15 - 30	0.00	0.20	0.78	0.03	-	Расчетн.
5	15 - 32	0.01	0.28	0.72	0.00	0.00	выполнен
6	15 - 34	0.01	0.37	0.60	0.02	-	Расчетн.
7	14 - 21	0.02	0.01	0.87	0.10	-	Расчетн.
8	14 - 23	0.01	0.01	0.93	0.05	-	Расчетн.
9	14 - 25	0.01	0.01	0.96	0.02	-	Расчетн.
10	14 - 27	0.00	0.03	0.98	0.01	0.00	выполнен
11	14 - 29	0.01	0.13	0.85	0.02	-	Расчетн.
12	14 - 31	0.01	0.23	0.70	0.06	0.00	выполнен

Рис. 5. Решение систем в табличном виде.

При необходимости пользователь имеет возможность скорректировать решение системы уравнений путем ручного изменения значения измеренной температуры в пределах точности датчика. Такая необходимость может возникать при неверных показаниях датчика в конкретной ТВС в конкретное время.

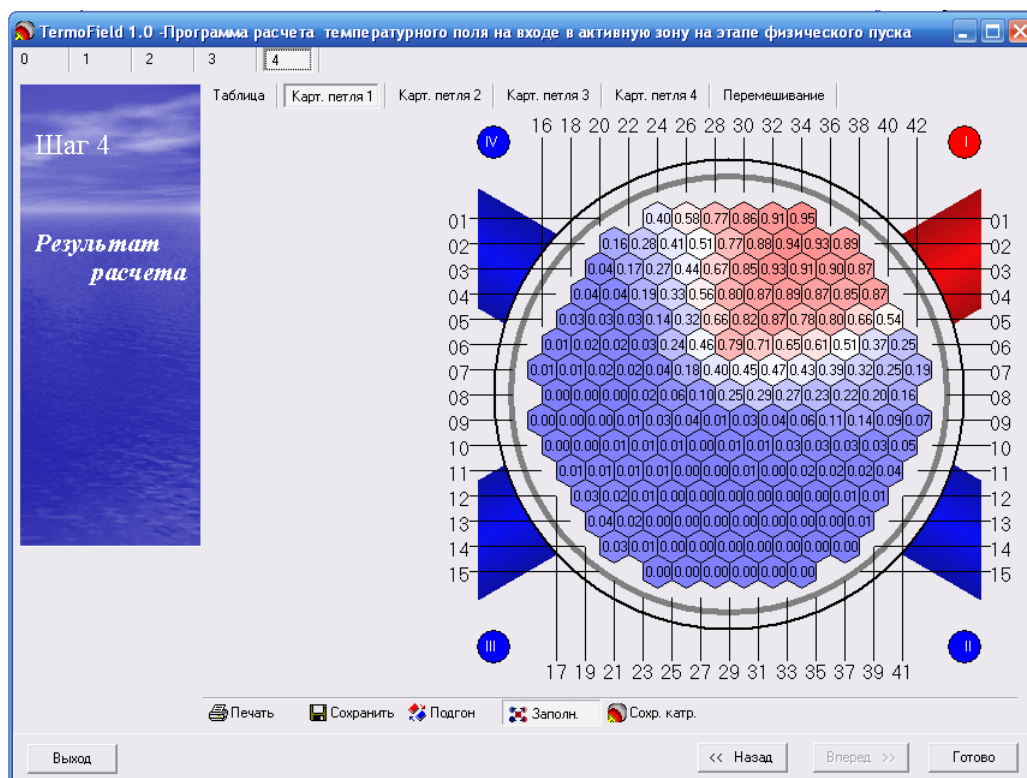


Рис. 6. Представление решения систем в графическом виде.

Кроме того данное программное обеспечение позволяет произвести расчет коэффициентов перемешивания по петлям по данным эксперимента. Результат представлен на рис. 7. Тем самым данная программа может использоваться для обработки испытания по определению коэффициентов перемешивания петель.

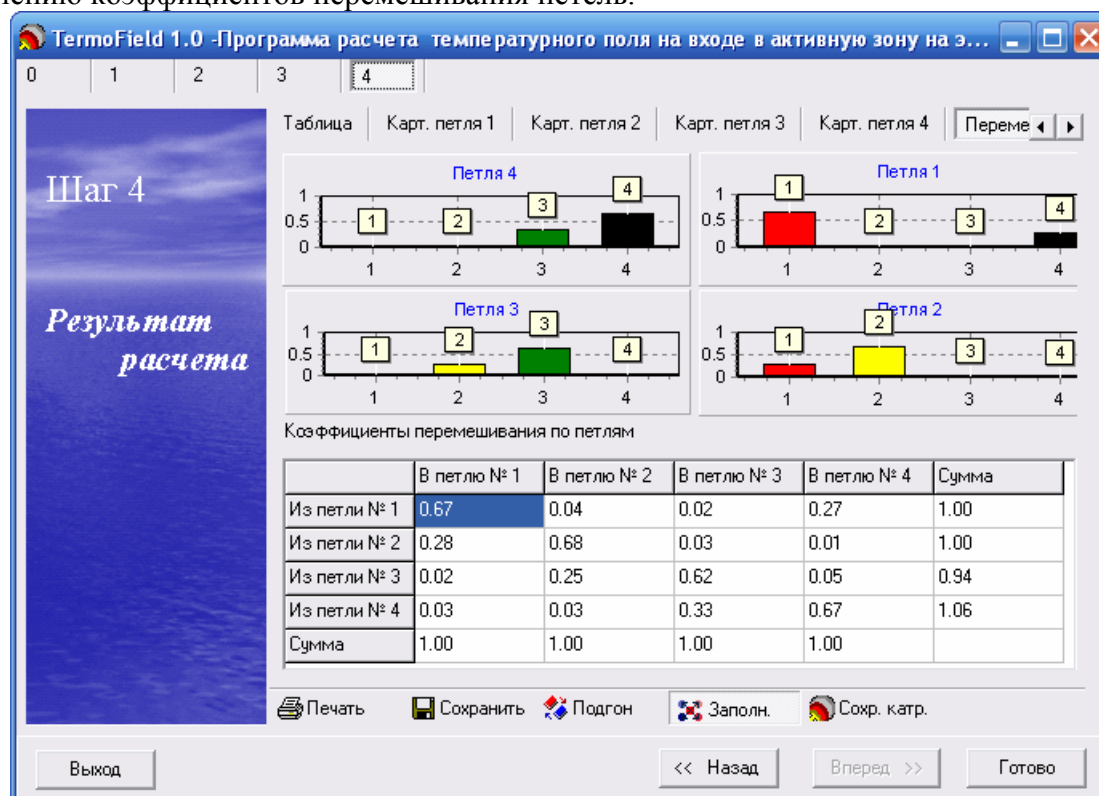


Рис.7 Результат расчета перемешивания по петлям.

Рассматриваемое программное обеспечение «Термополе» позволяет выполнить расчет коэффициентов и произвести их контроль за несколько минут. В тоже время без использования

СПО произвести обработку испытания в ручную возможно только за довольно длительный срок (около 3-х недель).

Другие программные продукты из специализированного комплекса обладают аналогичными свойствами, что позволяет пользователю быстро и эффективно работать с ними.

Кратко рассмотрим остальные программы из комплекса.

Термоконтроль на ХГО и МКУ

Данная программа используется для проверки датчиков термоконтроля и расчета аддитивных поправок к показаниям датчиков на нулевой мощности используется на этапе ХГО и МКУ.

Сложность ручной обработки связана с:

- большим количеством датчиков термоконтроля,
- статистической обработкой показаний каждого датчика на длительном временном интервале,
- использованием данных, зарегистрированных на разных температурных интервалах и вывод обобщающей зависимости.

Пользователь имеет возможность установить по каким датчикам будет производиться расчет опорной температуры в квазистационарном состоянии, причем ПО предварительно проверяет работоспособность датчиков по признаку не превышения максимально допустимого СКО и сравнения значения измеренной температуры с границами разумно допустимых значений. Согласно процедуре проведения испытания расчет поправок производится на нескольких значениях температуры теплоносителя, программа выдает обобщенную аддитивную поправку.

Время, затрачиваемое на ручную обработку испытания, составляет около 5 человеко-дней, с помощью программы 3 часа.

Рисунок 8 Термоконтроль

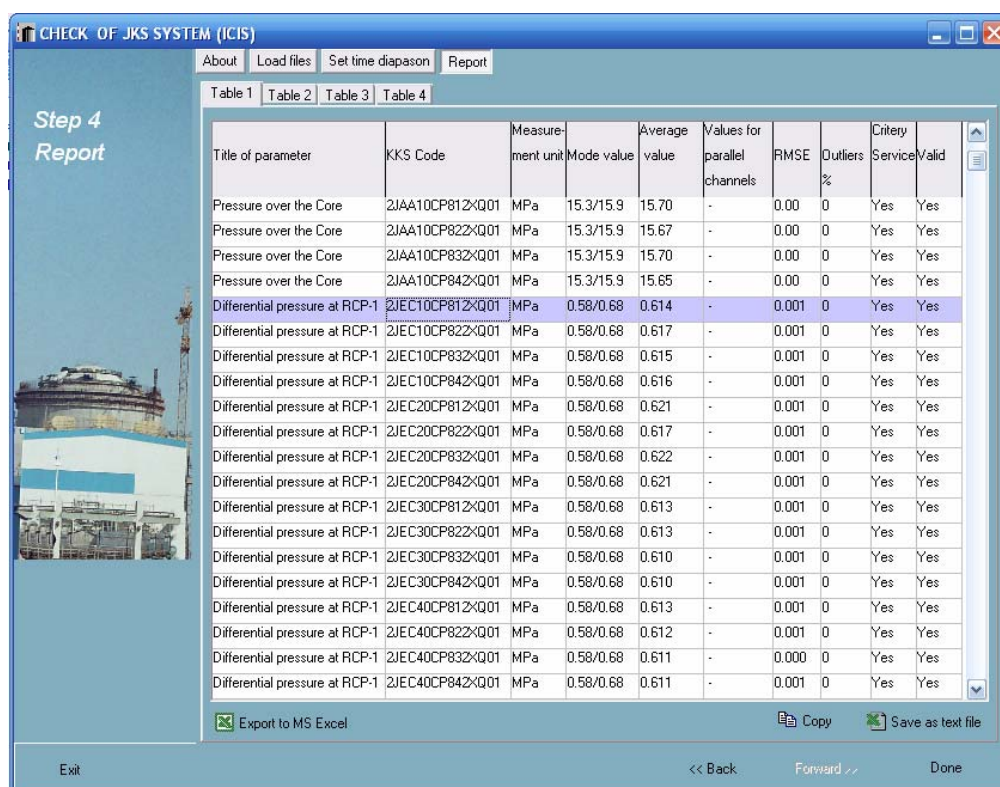
Программа проверки общетехнологических параметров производит анализ работоспособности каналов основных теплотехнических параметров 1 и 2 контуров и достоверности их показаний основываясь на следующих критериях соответственно:

- среднеквадратическое отклонение не превышает максимально допустимого значения и доля резковыделяющихся значений не превышает 30%;
- среднее значение параметра лежит в определенном проектом интервале и соответствует значению этого же параметра в параллельных каналах измерения с учетом их погрешностей.

Сложность ручной обработки определяется:

- большим количеством каналов (около 500 шт.),
- статистической обработки на длительном временном интервале,
- необходимостью сравнения однотипных датчиков между собой с учетом погрешности.

Время, затрачиваемое на ручную обработку испытания, составляет около 20 человеко-дней, с помощью программы 1 человеко-день.



Step 4 Report

Title of parameter	KKS Code	Measurement unit	Mode value	Average value	Values for parallel channels	RMSE	Outliers %	Criteria	Service	Valid
Pressure over the Core	2JAA10CP812XQ01	MPa	15.3/15.9	15.70	-	0.00	0	Yes	Yes	Yes
Pressure over the Core	2JAA10CP822XQ01	MPa	15.3/15.9	15.67	-	0.00	0	Yes	Yes	Yes
Pressure over the Core	2JAA10CP832XQ01	MPa	15.3/15.9	15.70	-	0.00	0	Yes	Yes	Yes
Pressure over the Core	2JAA10CP842XQ01	MPa	15.3/15.9	15.65	-	0.00	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC10CP812XQ01	MPa	0.58/0.68	0.614	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC10CP822XQ01	MPa	0.58/0.68	0.617	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC10CP832XQ01	MPa	0.58/0.68	0.615	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC10CP842XQ01	MPa	0.58/0.68	0.616	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC20CP812XQ01	MPa	0.58/0.68	0.621	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC20CP822XQ01	MPa	0.58/0.68	0.617	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC20CP832XQ01	MPa	0.58/0.68	0.622	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC20CP842XQ01	MPa	0.58/0.68	0.621	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC30CP812XQ01	MPa	0.58/0.68	0.613	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC30CP822XQ01	MPa	0.58/0.68	0.613	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC30CP832XQ01	MPa	0.58/0.68	0.610	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC30CP842XQ01	MPa	0.58/0.68	0.610	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC40CP812XQ01	MPa	0.58/0.68	0.613	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC40CP822XQ01	MPa	0.58/0.68	0.612	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC40CP832XQ01	MPa	0.58/0.68	0.611	-	0.000	0	Yes	Yes	Yes
Differential pressure at RCP-1	2JEC40CP842XQ01	MPa	0.58/0.68	0.611	-	0.001	0	Yes	Yes	Yes

Export to MS Excel Copy Save as text file

Exit << Back Forward >> Done

Рисунок 9 Проверка общетехнологических параметров

Программа проверки токов ДПЗ проводит анализ работоспособности и достоверности каналов контроля тока ДПЗ и правильности перевода их в линейное энерговыделение. Принцип обработки испытаний аналогичен программе проверки общетехнологических параметров с дополнением учета симметрии загрузки.

Сложность ручной обработки определяется:

- большим количеством обрабатываемых параметров (около 500 шт.),
- статистической обработки на длительном временном интервале,
- сравнением каналов по орбитам симметрии с учетом асимметрии размещения датчиков ДПЗ.

Время, затрачиваемое на ручную обработку испытания, составляет около 5 человеко-дней, с помощью программы 3 часа.

SPND - Check Self-Power Neutron Detector

Step 4 Report

Coord	Orbit	Aver								MSRE / Q								
KKS		symm	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7		
22	09-28	2	1.3	2.54	2.96	2.75	2.94	2.44	1.28	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
Aver ir			1.3	2.54	2.95	2.75	2.93	2.43	1.28									
5	07-32	3	1.19	2.26	2.68	2.42	2.58	2.08	1.04	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
33	07-26	3	1.2	2.25	2.64	2.41	2.56	2.08	1.06	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
46	06-29	3	1.12	2.26	2.66	2.44	2.59	2.12	1.13	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
47	09-32	3	1.1	2.23	2.64	2.41	2.57	2.07	1.07	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
Aver ir			1.15	2.25	2.65	2.41	2.57	2.08	1.07									
8	10-27	4	1.19	2.31	2.69	2.45	2.62	2.16	1.1	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
Aver ir			1.18	2.31	2.68	2.45	2.62	2.16	1.1									
4	07-24	5	1.21	2.4	2.88	2.62	2.77	2.28	1.18	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
23	09-34	5	1.2	2.38	2.81	2.59	2.79	2.28	1.09	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
Aver ir			1.2	2.38	2.84	2.6	2.78	2.27	1.13									
31	05-32	6	1.14	2.3	2.79	2.48	2.65	2.17	1.13	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
37	11-32	6	1.18	2.29	2.69	2.49	2.64	2.12	1.09	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
54	08-23	6	1.14	2.3	2.75	2.49	2.69	2.18	1.15	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
Aver ir			1.15	2.29	2.74	2.48	2.66	2.15	1.12									
3	04-29	7	1.16	2.24	2.61	2.36	2.48	2.05	0.51	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
18	06-23	7	1.1	2.19	2.57	2.35	2.51	2.07	0.53	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
19	06-35	7	1.09	2.18	2.57	2.35	2.46	2.02	0.52	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
36	10-23	7	1.1	2.15	2.54	2.32	2.43	2	0.53	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
49	12-29	7	1.19	2.19	2.53	2.28	2.39	1.95	0.46	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	0.00/0	Yr
Aver ir			1.12	2.18	2.56	2.33	2.45	2.01	0.51									

Export to MS Excel Copy Save as text file

Exit << Back Forward >> Done

Рисунок 9 Проверка токов ДПЗ

Проверка функций контроля энерговыделения проводит анализ расчета K_v , Q_I для центральных, периферийных твэл и твэлов, содержащих гадолиниевый поглотитель (твэг), на основе сравнения с расчетным значением, получаемого с помощью программы «Имитатор реактора» (предназначена для помощи оператору при управлении реактором, ее расчеты соответствуют расчетам программы БИПР-7А), а также на основе учета симметрии загрузки.

Сложность ручной обработки определяется:

- большим количеством обрабатываемых параметров (несколько тысяч шт.),
- статистической обработкой на длительном временном интервале,
- сравнением каналов по орбитам симметрии,
- поиском наиболее близких значений к граничным уставкам.

Время, затрачиваемое на ручную обработку испытания, составляет около 20 человеко-дней, с помощью программы 3 часа.

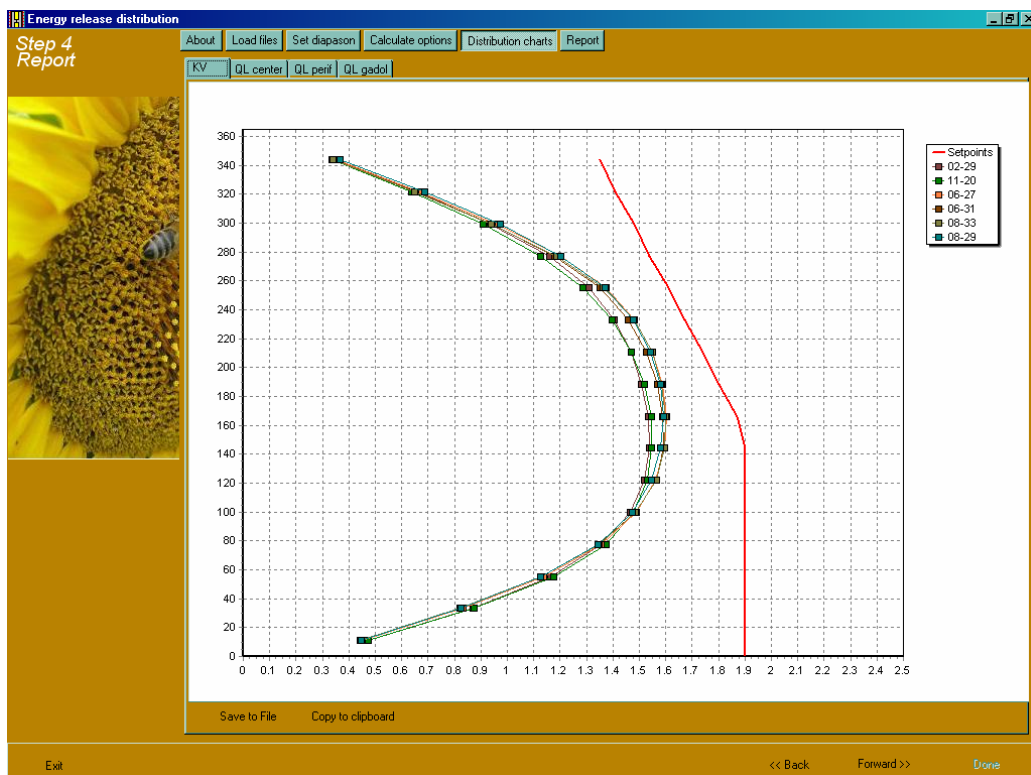


Рисунок 10 Проверка функций контроля энерговыделения

Проверка правильности функционирования защит по внутриреакторным параметрам определяет положение минимального запаса по линейному энерговыделению и кризису теплообмена, рассчитанные на нижнем уровне СВРК и сравнивает их с верхним уровнем СВРК. Сложность ручной обработки определяется:

- автоматическим определением параметров с наиболее близкими значениями к уставкам,
- поиск соответствующих параметров на нижнем уровне СВРК и сравнение значений с учетом разрешенной погрешности.

Время, затрачиваемое на ручную обработку испытания, составляет около 2 человеко-дней, с помощью программы 3 часа.

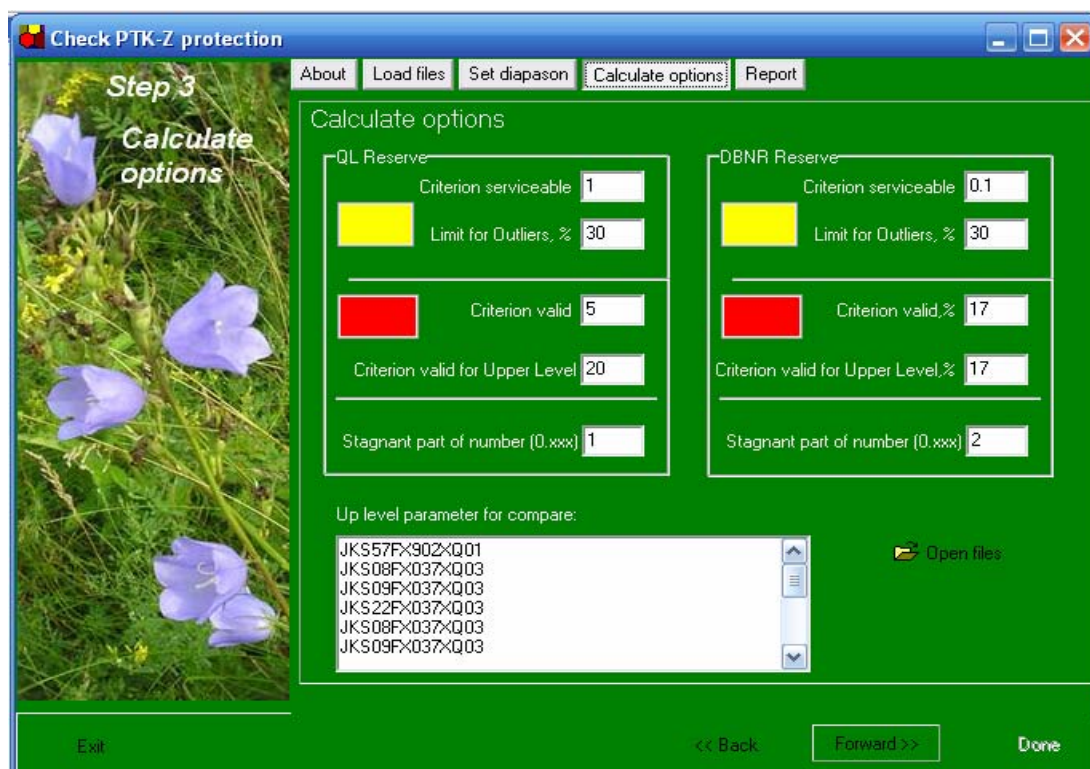


Рисунок 11 Проверка правильности функционирования защит по внутриреакторным параметрам

Проверка функций контроля тепловой мощности реактора производит расчет мощности по параметрам первого контура, по параметрам 2-го контура и ПВД, по показаниям ДПЗ и АКНП, производит сравнение с расчетом, выполненным в СВРК, производит расчет случайной погрешности измерения и определяет весовые коэффициенты согласно принятой методике.

Сложность ручной обработки определяется:

- статистической обработкой большого количества параметров (около 50 шт.) на длительном временном интервале,
- нахождением коэффициентов аппроксимации по МНК по напорно-расходным характеристикам ГЦН,
- расчет теплофизических величин (энтальпии, температуры насыщения, плотности) для измеренных величин,
- расчет погрешности измерений на основе СКО и приведенных погрешностей датчиков,
- расчет значений мощности петель и сравнение полученных значений со значениями, рассчитанными в СВРК
- расчет весовых коэффициентов для расчета средневзвешенной мощности РУ.

Время, затрачиваемое на ручную обработку испытания, составляет около 10 человеко-дней, с помощью программы 3 часа.

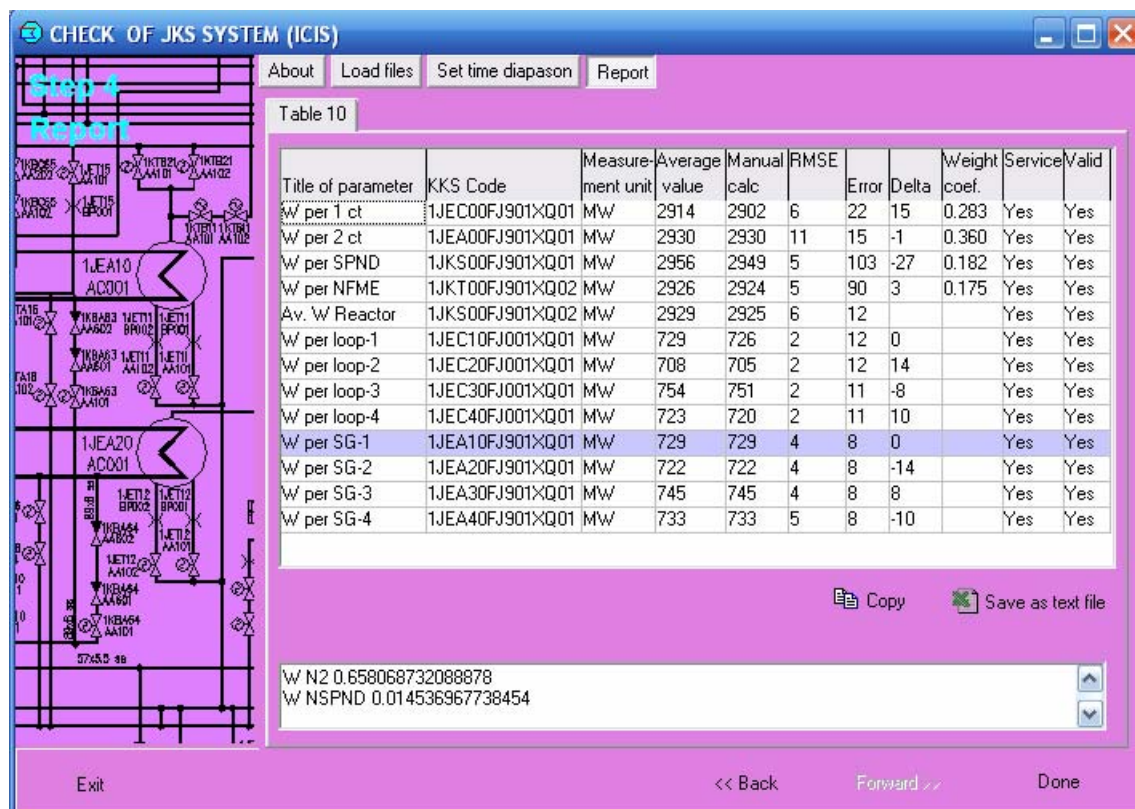


Рисунок 12 Проверка функций контроля тепловой мощности РУ.

Проверка правильности подключения шлейфов КНИТ используется для проверки правильности монтажа КНИ (соответствие реальноустановленного места КНИ в активной зоне проектному) на основе опускания отдельных ОР СУЗ и отклика КНИ на эти опускания.

Сложность ручной обработки определяется:

- большим количеством анализируемых параметров,
- автоматическим поиском координат опускаемого ОР СУЗ,
- сравнением изменения показаний при опускании отдельных ОР СУЗ по симметрии 60 градусов.

Приблизительное время ручной обработки: 20 человеко-дней.

С помощью программы: 2 часа.

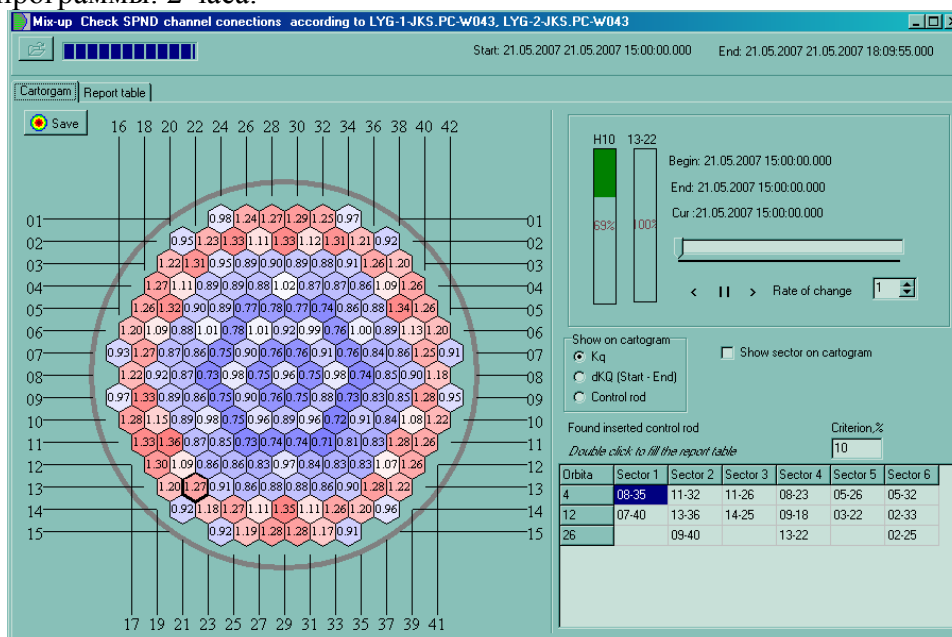


Рисунок 13 Проверка правильности подключения КНИТ

Dynamics 4.0. Программа для быстрого построения и анализа сложных многошкальных графиков **Dynamics 4.0** позволяет в сжатые сроки проанализировать и построить большое количество зависимостей, необходимых для выпуска отчетов по испытаниям. Использование программы **Dynamics 4.0** многократно облегчает труд инженера и позволяет сосредоточиться на анализе полученных зависимостей, благодаря продуманному интерфейсу и заложенным функциональным возможностям, таким как:

- построение графика с помощью лишь одного нажатия клавиши мыши,
- масштабирование графиков путем растягивания мышью,
- всплывающая подсказка о значении параметра в точке,
- возможность переходить от астрономической к относительной оси времени путем нажатия одной кнопки,
- построение до 4-х шкал для аналоговых параметров и до 4-х шкал дискретных параметров,
- использование шаблонов графиков,
- автоматическое масштабирование шкалы и поиск оптимального шага по шкале,
- другие возможности для построения и анализа зависимостей (создание графиков, являющимися функционалами к загруженным параметрам, распознавание параметров по единицам измерения и т.п.).

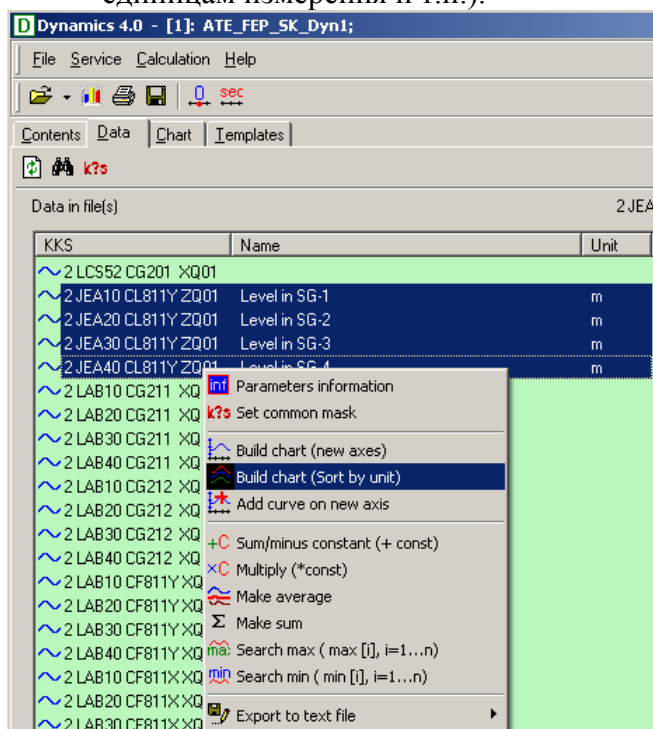


Рисунок 14 Программа по быстрому построению графиков

Сложность ручной обработки по графикам определяется:

- необходимостью конвертации выходных файлов с блока в понятный формат для Excel (Mathcad),
- монотонностью труда при работе с большим количеством параметров,
- трудностью при увеличении масштаба и сложностью считывания значений с графика,
- сложностью совмещения на одном графике разнотипных параметров (не более 2 –х шкал),
- невозможностью сохранения шаблонов для эффективной работы с однотипными графиками (для использования в однотипных испытаниях, но разделенных по времени).

Время, затрачиваемое на ручную обработку испытания, составляет около 10 человеко-дней, с помощью программы 3 часа.

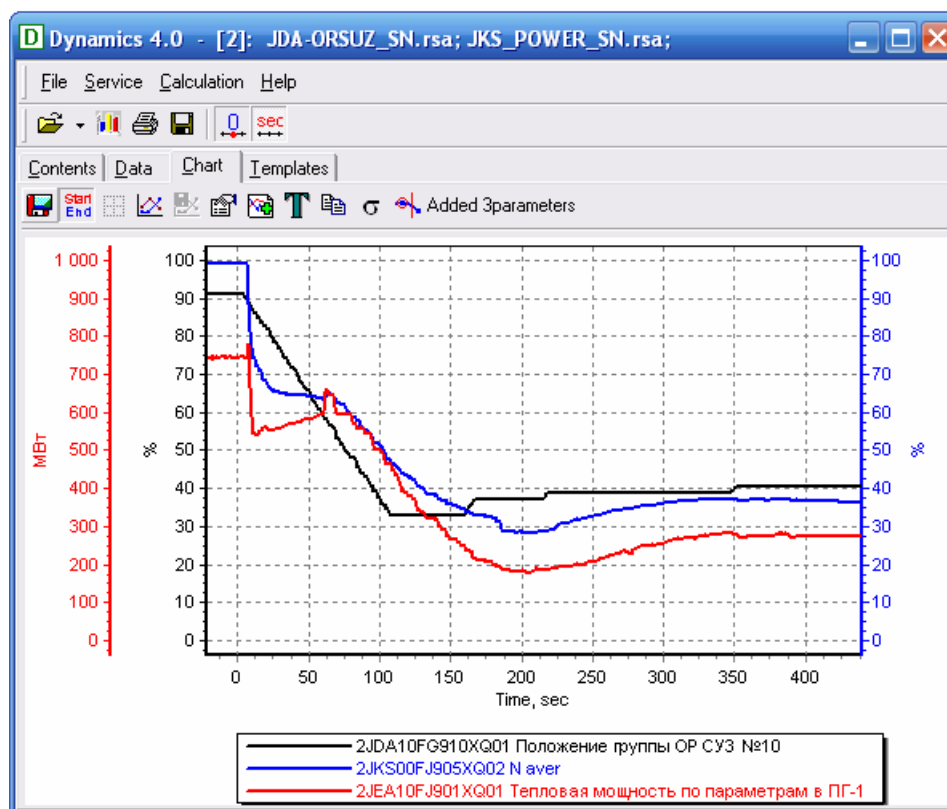


Рисунок 15 Программа по быстрому построению графиков

Использование специализированного программного комплекса позволяет повысить качество выпускаемых отчетов, наглядность, точность, и при этом сократить срок выпуска отчетов и сократить количество необходимого персонала.

Данный комплекс программ может быть предложен в качестве структурной единицы для штатной СВРК на блоке как средство независимой проверки и использоваться при периодических испытаниях СВРК как системы важной для эксплуатации, совмещающей функции системы безопасности.