

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



13/III-78

Р-83

13 - 11147

1201/2-78

В.Т.Руденко, Б.Н.Соловьев, В.Г.Тишин

ЛОГИКА КОНТРОЛЯ И ЗАЩИТЫ
ИМПУЛЬСНОГО БЫСТРОГО РЕАКТОРА /ИБР-30/
ВО ВРЕМЯ ЕГО ПУСКА

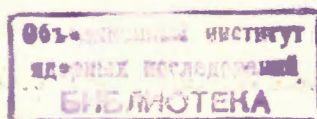
1978

13 - 11147

В.Т.Руденко, Б.Н.Соловьев, В.Г.Тишин

ЛОГИКА КОНТРОЛЯ И ЗАЩИТЫ
ИМПУЛЬСНОГО БЫСТРОГО РЕАКТОРА /ИБР-30/
ВО ВРЕМЯ ЕГО ПУСКА

Направлено в АЭ



Руденко В.Т., Соловьев Б.Н., Тишин В.Г.

13 - 11147

Логика контроля и защиты импульсного быстрого реактора (ИБР-30) во время его пуска

Выполнен расчет параметров импульсного быстрого реактора (ИБР-30) при различных фиксированных значениях пиковой реактивности. Разработаны методика контроля пиковой реактивности и измерительная аппаратура, используемая во время пуска ИБР-30.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

В импульсном быстром реакторе периодического действия (ИБР-30) повышение интенсивности цепной реакции деления для формирования импульса мощности происходит за счет кратковременного перевода реактора в каждом цикле его работы в состояние равновесной надкритичности по мгновенным нейтронам при совмещении двух подкритических масс, из которых одна неподвижна, а вторая – основная подвижная зона (ОПЗ), смонтированная на периферии диска, – перемещается с некоторой постоянной угловой скоростью.

Конструкция ИБР-30 и параметры модуляции реактивности, обеспечивающие формирование импульсов мощности и различные частоты их повторения, приведены в работе^{1/}. Так как уровень равновесной реактивности выше критичности по мгновенным нейтронам, то перед отключением модуляции необходимо снижать коэффициент размножения реактора до безопасного уровня. Соответственно для последующего перевода реактора в равновесный режим после включения модуляции реактивности коэффициент размножения должен быть восстановлен. Задача пуска состоит в разработке методики и аппаратуры контроля реактивности при переводе реактора из состояния глубокой подкритичности в равновесный режим работы. В сферу пусковой задачи входит также защита – составление условий для образования сигнала, воздействующего на систему предупредительного оповещения или систему сброса стержней аварийной защиты в случае неожиданного повышения мощности.

Для выбора контролируемых параметров обратимся к уравнению, описывающему кинетику импульсного ре-

актора^{2/}:

$$\frac{dW(t)}{dt} = \frac{W(t)\epsilon(t)}{r} + \frac{S}{r} \quad (1)$$

Здесь

- $W(t)$ - мгновенное значение мощности,
- $\epsilon(t)$ - зависимость реактивности от времени,
- S - интенсивность источника нейтронов,
- r - время жизни мгновенных нейтронов.

Результаты численных расчетов уравнения (1) для ИБР-30 приведены на рис.1 и 2. На этих же рисунках пунктиром показаны зависимости амплитуды ($W_{и}$) и полуширины (Θ) импульса мощности, вычисленные по формулам для подкритического импульсного реактора^{2/}:

$$W(t) = -\frac{S}{\epsilon(t)} \quad (2)$$

$$W_{и} = -\frac{S}{\epsilon} \quad (3)$$

$$\Theta = \frac{2|\epsilon|^{1/2}}{\alpha^{1/2}v} \quad (4)$$

$$E_{и} \sim W_{и} \Theta \sim \frac{2S}{\alpha^{1/2}v\epsilon^{1/2}} \quad (5)$$

где $E_{и}$ - энергия импульса мощности,
 v - скорость ОПЗ,
 ϵ - отклонение пиковой реактивности от уровня мгновенной критичности, принятого за нулевое значение,

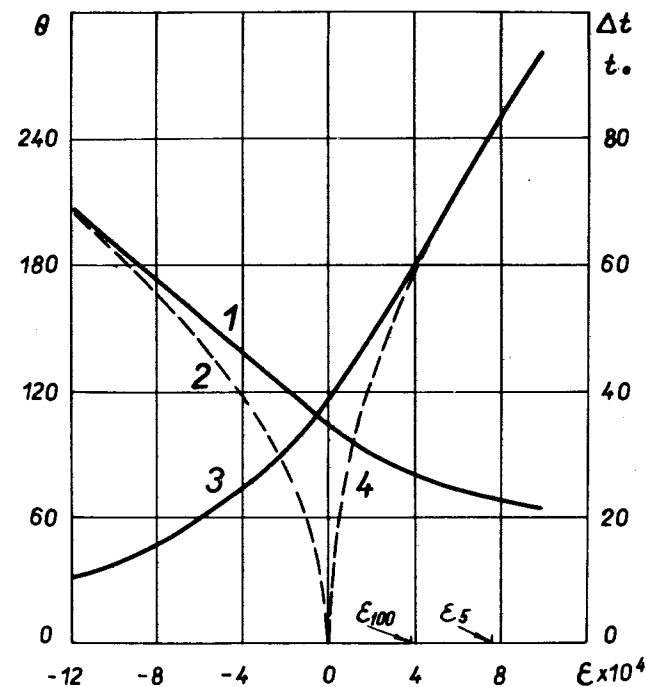


Рис.1. Зависимость временных параметров импульса мощности ИБР-30 от уровня пиковой реактивности (ϵ). 1 - полуширина импульса мощности (Θ), мкс; 2 - то же, расчет выполнен по формуле (4); 3 - сдвиг амплитуды импульса мощности относительно максимума реактивности (Δt), мкс; 4 - время снижения реактивности от пикового значения до мгновенной критичности (t_0), мкс; ϵ_{100} и ϵ_5 - равновесные надкритичности соответственно для частот импульсов 100 и 5 с⁻¹; $\epsilon = 0$ - мгновенная критичность.

α - параметр параболы, которой аппроксимируется реактивность ОПЗ.

Как следует из рис.1 и 2, во время пуска происходят глубокие изменения параметров импульса мощности

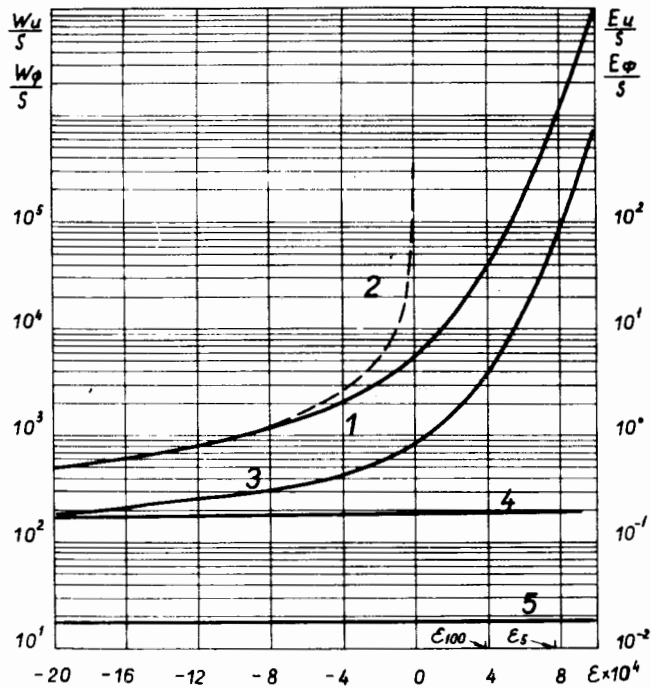


Рис.2. Зависимость параметров мощности ИБР-30, отнесенных к источнику (S), от уровня пиковой реактивности (ϵ). 1 - амплитуда импульса мощности ($W_{и}/S$), 2 - то же, расчет выполнен по формуле (3), 3 - энергия импульса мощности ($E_{и}/S$), с; 4, 5 - энергия ($E_{ф}/S$, с) и мощность фона ($W_{ф}/S$) при частоте импульсов 100 с^{-1} ; ϵ_{100} и ϵ_5 - равновесные надкритичности соответственно для частот 100 и 5 с^{-1} ; $\epsilon = 0$ - мгновенная критичность.

(амплитуды, длительности, энергии), наблюдается запаздывание амплитуды импульса относительно максимума реактивности, происходит также перераспределение энергии между импульсом мощности и фоном. По достижении

реактором равновесной критичности все эти аномалии прекращаются.

Рассмотрим способы применения полученных результатов для определения реактивности во время пуска. Параметры мощности отражают динамику пульсации реактивности, поэтому для решения задачи достаточно выполнить измерения при одном фиксированном положении органов регулирования, эффективности которых известны. Тогда, используя расчетную зависимость измеренного параметра от реактивности (например, Θ или Δt на рис.1), определяют значение ϵ , соответствующее фиксированному положению регулятора, и далее рассчитывают величину его перемещения для перевода реактора на уровень равновесной критичности или любого желаемого состояния. Эти же зависимости можно использовать и для решения обратной задачи - градуировки органов регулирования в единицах реактивности.

На начальном этапе пуска для экстраполяции на мгновенную критичность можно использовать соотношения (3), (4) и (5), из которых

$$\Theta^2 \sim \epsilon, \quad \Theta \rightarrow 0, \quad \epsilon \rightarrow 0, \quad (6)$$

$$\frac{1}{W_{и}/S} \sim \epsilon, \quad (7)$$

$$\frac{1}{(E_{и}/S)^2} \sim \epsilon. \quad (8)$$

Зависимость (8), рассчитанная для параметров реактора ИБР-30, показана на рис.3 под номером 3. При использовании соотношений 7 и 8 пропорциональные $W_{и}$ и $E_{и}$ результаты аппаратных измерений зависят от интенсивности источника нейтронов, величина которой изменяется в процессе пуска вследствие роста числа

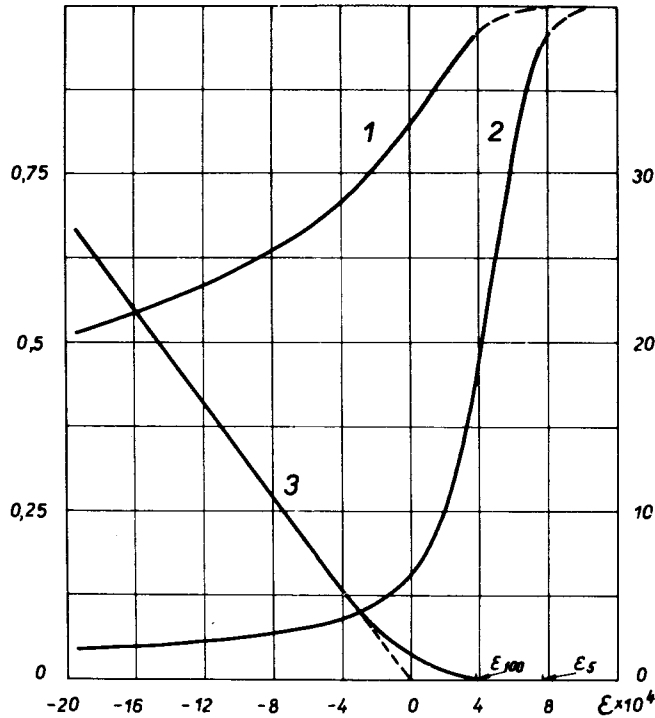


Рис. 3. Зависимость от пиковой реактивности (ϵ) некоторых функций от энергии импульса мощности и фона ИБР-30. 1, 2 - доля энергии импульса ($\frac{E_{и}}{E_{и} + E_{ф}}$) для частоты 100 с^{-1} и 5 с^{-1} соответственно; 3 - $(E_{и}/S)^{-2} \text{ с}^{-2}$; ϵ_{100} и ϵ_5 - равновесные надкритичности соответственно для частот 100 и 5 с^{-1} ; $\epsilon = 0$ - мгновенная критичность.

запаздывающих нейтронов. Влияние источника переменной интенсивности на результаты экстраполяции можно исключить, используя уравнение (2): $S = W_{ф} |\epsilon_{ф}|$, где $W_{ф}$ и $\epsilon_{ф}$ - мощность и подкритичность реактора между импульсами. Тогда, например, для соотношения (8)

$$\left(\frac{E_{и}}{S}\right)_{\epsilon_i} = (E_{и}^*)_{\epsilon_i} \frac{(E_{ф}^*)_{\epsilon_1}}{(E_{ф}^*)_{\epsilon_i}} \frac{(E_{ф}/S)_{\epsilon_i}}{(E_{ф}/S)_{\epsilon_1}} \cdot \frac{1}{S_1}.$$

Здесь $E_{ф}$ - энергия фона, звездочками отмечены пропорциональные параметрам результаты аппаратурных измерений, третий множитель близок единице, но может быть рассчитан для каждого режима работы реактора (4 на рис. 2), четвертый - постоянная величина, не влияющая на результаты экстраполяции, $i = 1$ соответствует первому измерению.

Непосредственно использовать зависимость от реактивности энергии и мощности (1 и 3 на рис. 2) для определения ϵ нельзя, так как не известны S и коэффициенты пропорциональности между энергией или амплитудой импульса мощности и результатами аппаратурных измерений. Поэтому рассчитываем вспомогательные соотношения:

$$\frac{(E_{и}/S)_{\epsilon}}{(E_{и}/S)_{\epsilon \ll 0}} = \frac{(E_{и}^*)_{\epsilon}}{(E_{и}^*)_{\epsilon \ll 0}} \frac{(E_{ф}^*)_{\epsilon \ll 0}}{(E_{ф}^*)_{\epsilon}} \frac{(E_{ф}/S)_{\epsilon}}{(E_{ф}/S)_{\epsilon \ll 0}}, \quad (9)$$

$$\frac{(W_{и}/S)_{\epsilon}}{(W_{и}/S)_{\epsilon \ll 0}} = \frac{(W_{и}^*)_{\epsilon}}{(W_{и}^*)_{\epsilon \ll 0}} \frac{(E_{ф}^*)_{\epsilon \ll 0}}{(E_{ф}^*)_{\epsilon}} \frac{(E_{ф}/S)_{\epsilon}}{(E_{ф}/S)_{\epsilon \ll 0}}, \quad (10)$$

$$\frac{E_{и}/S}{E_{ф}/S} = \frac{E_{и}^*}{E_{ф}^*}, \quad (11)$$

$$\frac{E_{и} / S}{E_{и} / S + E_{ф} / S} = \frac{E_{и}^*}{E_{и}^* + E_{ф}^*} \quad (12)$$

$$\frac{W_{и} / S}{W_{ф} / S} = \frac{W_{и}^*}{W_{ф}^*} \quad (13)$$

Здесь (9) и (10) определяют относительный рост (умножение) энергии и амплитуды импульса. Определение реактивности методами умножения или экстраполяции требует выполнения измерений не менее чем при двух значениях ϵ . Если же использовать выражения (11), (12) и (13), которые характеризуют динамику реактора, то абсолютное значение реактивности можно определить по результатам измерений, соответствующим каждому фиксированному положению регулятора.

Приведем полезные соотношения для экспериментального определения эффективной доли запаздывающих нейтронов (β), а также градуировки интенсивности нейтронного источника (S_{ϵ}) и средней мощности (W_{ϵ}) в подкритическом реакторе.

Интенсивность источника запаздывающих нейтронов (S_p) при работе реактора в равновесном режиме рассчитывается по известной формуле

$$S_p = (E_{и} + E_{ф}) p \cdot \beta \quad (14)$$

где сумма в скобках, умноженная на частоту импульсов p , есть средняя мощность реактора. Тогда, используя (2), (12) и (14), получим зависимость

$\frac{E_{и}^*}{E_{и}^* + E_{ф}^*} = \frac{|\epsilon_{ф}| - \beta}{\beta}$, которая связывает экспериментально измеряемые параметры с эффективной долей запаздывающих нейтронов и подкритичностью реактора между импульсами.

$$S_{\epsilon} = S_p \frac{(E_{ф}^*)_{\epsilon}}{(E_{ф}^*)_{\epsilon_p}} \frac{(E_{ф} / S)_{\epsilon_p}}{(E_{ф} / S)_{\epsilon}} \quad (15)$$

Здесь ϵ_p - равновесная надкритичность, S_p рассчитывается при работе реактора на высокой средней мощности по формуле (14), второй сомножитель - результат аппаратных измерений, третий близок к единице (см. 4 на рис.2). Тогда

$$W_{\epsilon} = S_{\epsilon} \left(\frac{E_{и}}{S} + \frac{E_{ф}}{S} \right) p \quad (16)$$

зависимость от ϵ слагаемых, заключенных в скобки, приведена на рис.2.

Пусковая аппаратура, разработанная для ИБР-30 в соответствии с изложенной методикой, обеспечивает:

- измерение при стационарных уровнях пиковой реактивности интегральных нейтронных потоков, пропорциональных энергиям импульса, фона и их сумме ($E_{и}^*$, $E_{ф}^*$, $E_{и}^* + E_{ф}^*$ соответственно) за один цикл работы реактора или усредненных за различное число циклов;
- формирование сигнала на сброс стержней аварийной защиты в случае превышения пороговых уровней либо средней интенсивностью нейтронного потока, либо интегральным потоком во время импульса мощности, а также в случае перегрузки датчика нейтронного излучения;
- измерение интенсивности нейтронного излучения и защиту реактора во время критической сборки активной зоны.

Пусковая аппаратура имеет связь с измерительным центром Лаборатории нейтронной физики для подключения в линию с реактором многоканальных амплитудно-временных анализаторов и ЭВМ, с помощью которых при фиксированных значениях пиковой реактивности измеряются: флуктуации интегральных интенсивностей

нейтронных потоков, пропорциональных энергиям импульса и фона, зависимость от времени средней интенсивности нейтронного излучения в течение цикла работы реактора (измерение $\Theta, \Delta t, W_{И}^*, W_{Ф}^*$), а также энергии импульсов мощности и фона при переходных процессах. Блок-схема пусковой аппаратуры показана на рис.4.

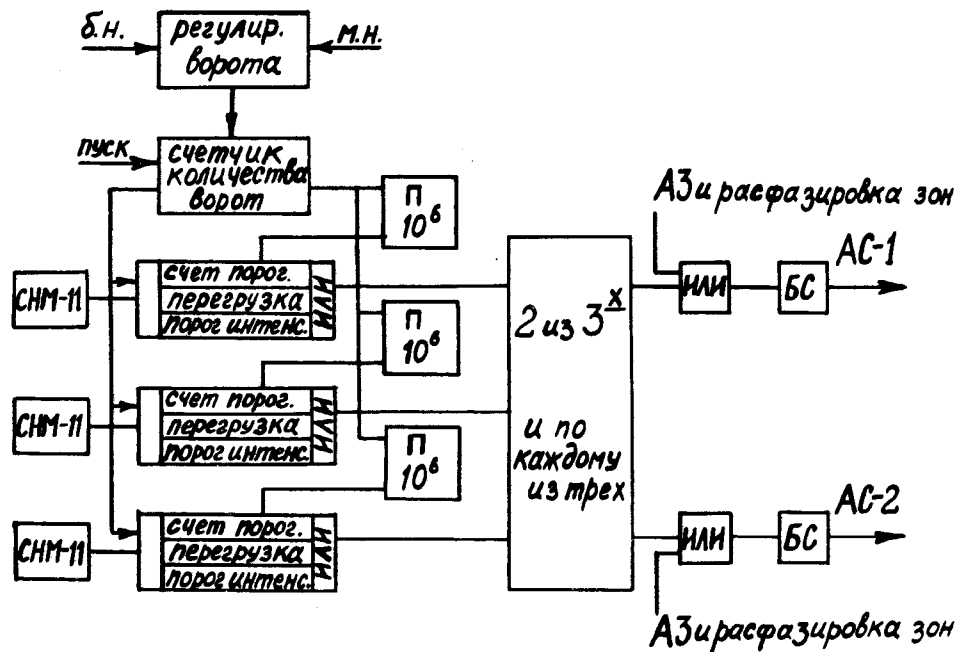


Рис.4. Блок-схема пусковой аппаратуры ИБР-30. Пояснения в тексте.

Так же как и в аппаратуре аварийной защиты ^{3/}, которая на этапе пуска переводится на максимальную чувствительность, контроль и защита реактора осуществляются тремя независимыми идентичными каналами. Сигнал на сброс аварийных стержней формируется, если достигли уровня порога параметры двух каналов из трех. Возможна также защита по каждому из трех каналов.

Устройство формирования импульса "ворот", задержка и длительность которого регулируются, запускается опорными импульсами, поступающими с датчиков углового положения дисков ОПЗ и ВПЗ (б.н. и м.н. на схеме). Импульс "ворот" через схему счетчика числа "ворот" поступает к каждому из трех каналов аппаратуры. Выходные импульсы с трех устройств защиты в каждом канале через схему "ИЛИ" передаются в схему выбора двух каналов из трех, используемую в аппаратуре АЗ ^{3/}. Дополнительные устройства: блок формирования "ворот", счетчик числа "ворот", логарифмический интенсивметр, схема звуковой сигнализации ("шелкун") - являются общими для трех каналов.

Функциональная схема канала пусковой аппаратуры представлена на рис.5. В качестве нейтронного датчика используется блок из четырех счетчиков типа СНМ-11, имеющих собственный замедлитель. Для снижения загрузки счетчиков имеется дистанционно управляемый экран. Предусмотрена возможность подключения к каналу счетчика быстрых нейтронов. Импульсы с нейтронного датчика поступают параллельно на вход усилителя счетного тракта и на вход схемы перегрузки датчика. Сигналы с выхода усилителя формируются пороговым формирователем и поступают на логическую схему "И". В зависимости от установленного режима счета и защиты схема "И" пропускает импульсы на схему сравнения только в заданные устройством формирования "ворот" промежутки времени. Контроль и защита осуществляются в каждом цикле работы реактора. Схема сравнения перед началом счета импульсов в каждом цикле устанавливается в нулевое состояние сформированным импульсом датчика "ворот", затем идет счет и сравнение числа накопленных в одном цикле импульсов с установленным числом. Задатчик числа импульсов (от 1 до 999) установлен на передней панели блока. Если количество сосчитанных импульсов меньше заданного числа, измерения циклически повторяются. Если количество импульсов больше заданного числа, появляется световой предупредительный сигнал. Если количество импуль-

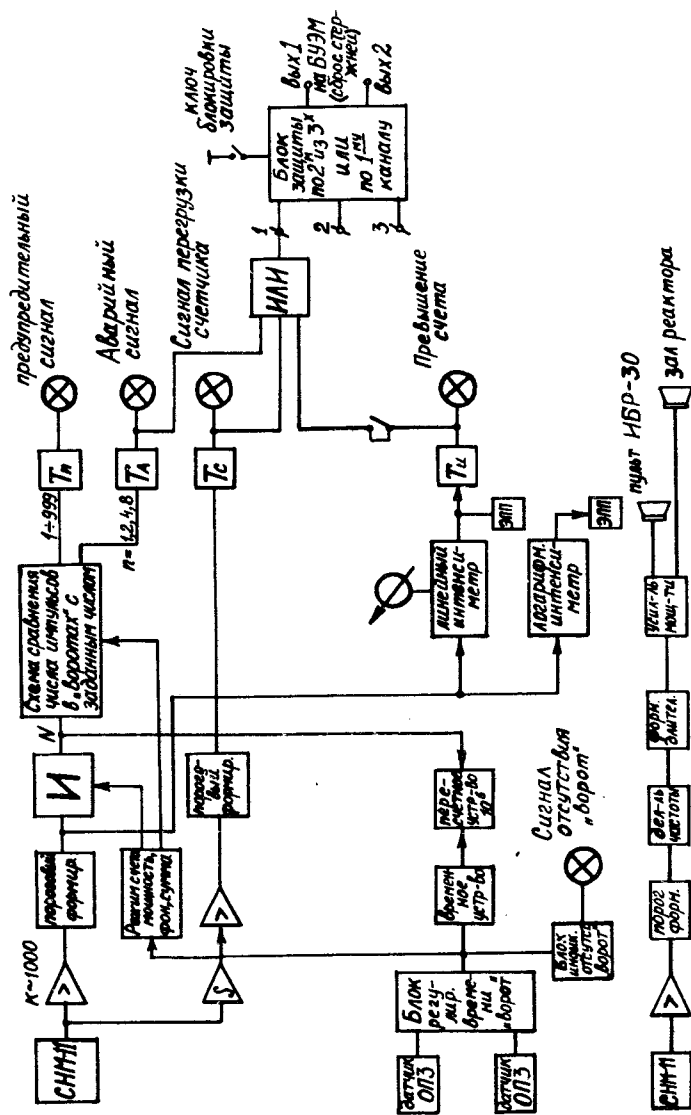


Рис. 5. Функциональная схема пусковой аппаратуры ИБР-30. Пояснения в тексте.

сов больше установленного в (2, 4, 8) раз, то кроме предупредительного сигнала схема сравнения вырабатывает сигнал на сброс аварийных стержней. Временная привязка к циклам работы реактора осуществляется с помощью блока регулируемых "ворот", который управляет работой счетного тракта. Запуск блока осуществляется сформированным импульсом с датчика углового положения ОПЗ, а при работе реактора на частотах 4, 5, 10 1/с этот импульс строится импульсом с датчика углового положения ВПЗ. Имеется блок индикации "ворот". Длительность "ворот" и их положение относительно импульса мощности можно контролировать на пультовом осциллографе. В качестве таймирующего устройства в аппаратуре используется счетчик числа "ворот". Число циклов работы реактора, в течение которых необходимо измерение, задается переключателем, установленным на передней панели блока. По истечении заданного числа циклов счет прекращается. Сброс счетчика числа "ворот" и пересчетного устройства производится автоматически кнопкой "Пуск" при очередном измерении. Во время перехода нейтронных счетчиков из линейного режима работы в режим интегральной камеры (перегрузка датчика) на выходе датчика сигнал появляется в виде огибающей импульса мощности реактора, затем через усилитель подается на вход порогового устройства. В случае превышения сигналом уровня порога вырабатывается сигнал перегрузки, поступающий далее в канал аварийной защиты. Импульс, поступающий с датчика во время его перегрузки, выведен для наблюдения на пультовый осциллограф.

Визуальное наблюдение за ходом пуска реактора осуществляется с помощью линейного интегратора со стрелочным прибором. Он имеет 5 поддиапазонов: 10, 10², 10³, 10⁴, 10⁵ имп/с. По достижении интенсивности 90% от диапазона на любом из поддиапазонов генерируется сигнал, поступающий на сброс аварийных стержней.

С помощью логарифмического интегратора, перекрывающего измеряемый диапазон счета от 10 до 10⁵ имп/с

и имеющего выход на самопишущий прибор, процесс пуска реактора регистрируется на ленте самопишущего прибора.

В состав пусковой аппаратуры входит канал звуковой сигнализации уровня нейтронного излучения ("шелкун"), который используется как при критических сборках активной зоны реактора, так и при пусках ИБР-30 в импульсном режиме.

Пусковая аппаратура, разработанная в отделе радиоэлектроники Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, выполнена с широким использованием интегральных схем и, как показала длительная эксплуатация, отвечает требованиям надежности и стабильности, которые необходимы для аппаратуры аварийной защиты импульсного быстрого реактора.

В заключение авторы считают своим долгом выразить благодарность Г.П.Жукову, В.А.Бельковцу, Н.И.Харьюзовой за помощь при разработке пусковой аппаратуры; И.М.Франку, Е.Д.Воробьеву - за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руденко В.Т. ОИЯИ, 13-5918, Дубна, 1971.
2. Бондаренко И.И., Стависский Ю.Я., АЭ, 1959, т.7, вып. 5, с. 417.
3. Руденко В.Т., Соловьев Б.Н., Тишин В.Г. ОИЯИ, 13-8281, Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 декабря 1977 года.