

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С3486

P-83

3/II-75

13 - 8281

446/2-75

В.Т.Руденко, Б.Н.Соловьев, В.Г.Тишин

ЛОГИКА АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ
ИМПУЛЬСНОГО БЫСТРОГО РЕАКТОРА ИБР-30

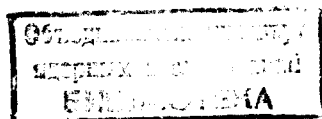
1974

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

13 - 8281

В.Т.Руденко, Б.Н.Соловьев, В.Г.Тишин

ЛОГИКА АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ
ИМПУЛЬСНОГО БЫСТРОГО РЕАКТОРА ИБР-30



Требования к системе аварийной защиты

Для того, чтобы сформулировать требования к аварийной защите, рассмотрим причины бросков мощности. В импульсном реакторе периодического действия характер энергосвечения определяется законом изменения реактивности от времени, ее модуляцией. Модуляция создается механическим перемещением со скоростью v либо части активной зоны, как в ИБР-30, либо части отражателя, как в реакторах ИБР-2 и SORA, но в обоих случаях имеет один и тот же характер. На рис. 1а показано изменение реактивности реактора ИБР-30. Основную часть времени реактор подкритичен, и фоновая мощность (W_{ϕ}) определяется множителем ($1/\epsilon_{\phi}$) в неподвижной зоне запаздывающих нейтронов (S):

$$W_{\phi} = \frac{S}{\epsilon_{\phi}}, \quad /1/$$

а энергия фона за один период $E_{\phi} = \frac{W_{\phi}}{n}$, где n - частота импульсов мощности. Здесь и далее при рассмотрении известных соотношений, связывающих мощность с параметрами, опущены несущественные для нашего рассмотрения постоянные коэффициенты.

По мере возрастания реактивности мощность увеличивается, но основной рост последней происходит во время кратковременного перевода реактора в состояние выше критичности по мгновенным нейтронам /рис. 2/. К моменту t_0 мощность достигает максимального значения, пропорционального величине

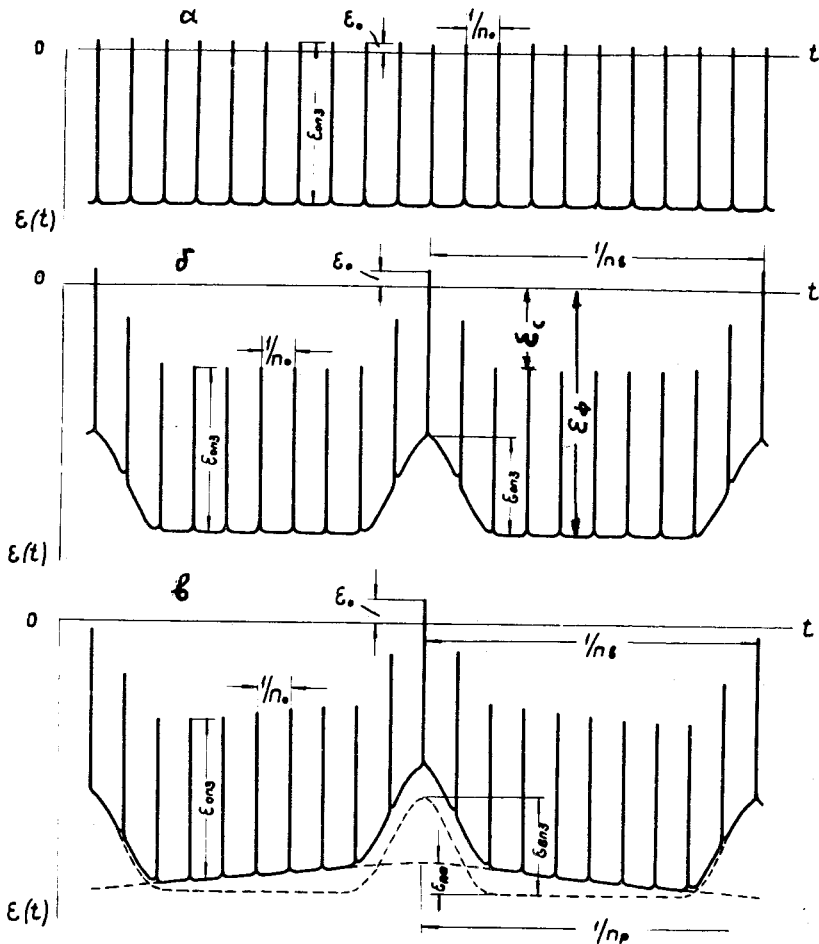


Рис. 1. Схема модуляции реактивности реактора ИБР-30. а - основная $1/n_0$ 1/сек/, б - промежуточная $1/n_b$ 1/сек/, в - низкая $1/n_p$ 1/сек/ частота следования импульсов мощности. ϵ_0 - равновесная надкритичность реактора, $\epsilon_{опз}$, $\epsilon_{впз}$, $\epsilon_{по}$ - реактивности основной и вспомогательной подвижных зон и подвижного отражателя; $\epsilon_{ф}$, ϵ_c - реактивности, соответствующие фоновой мощности и амплитуде сателлита. $\epsilon(t)$ - реактивность, t - время.

$$W_{\max} \sim \frac{S}{vt_0^{1/2}} \exp \int_{-t_0}^{t_0} \frac{\epsilon(t)}{\tau} dt,$$

где

$$\epsilon(t) = \epsilon - \alpha v^2 t^2 -$$

/2/

- квадратичная парабола, которой аппроксимируется зависимость реактивности реактора от времени при движении подвижного элемента; α - коэффициент, численно равный изменению реактивности при смещении подвижного элемента от максимума реактивности на 1 см; ϵ - надкритичность реактора по мгновенным нейтронам; $2t_0$ - время надкритического состояния реактора.

При последующем снижении реактивности мощность

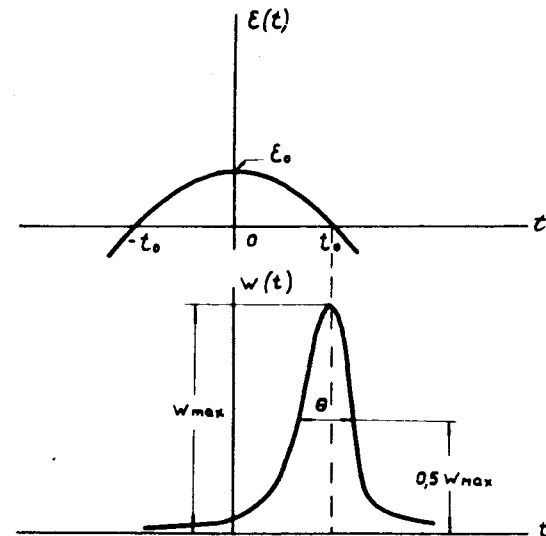


Рис. 2. Схема формирования импульса мощности. $\epsilon(t)$ - зависимость реактивности от времени, $\epsilon=0$ - критичность реактора по мгновенным нейтронам, $W(t)$ - зависимость мощности реактора от времени, t - время, θ - длительность импульса на половине высоты, W_{\max} - амплитудное значение импульса мощности.

снова принимает фоновое значение, и далее циклы повторяются.

Длительность импульса на половине высоты зависит от скорости подвижного элемента

$$\theta \sim \frac{\tau^{1/2}}{a^{1/2} \sqrt{v t_0}},$$

где τ - время жизни мгновенных нейтронов в реакторе, а энергия импульса

$$E_u = W_{\max} \theta.$$

Как было показано И.Бондаренко и Ю.Стависким*, каждому виду изменения реактивности от времени в импульсном реакторе соответствует определенный уровень равновесной надкритичности (ϵ_0), при котором происходит компенсация распада между импульсами предшественников запаздывающих нейтронов их рождением во время очередного импульса. В этом случае энергия импульса и мощность реактора не зависят от времени. Интенсивность источника запаздывающих нейтронов между импульсами определяется предысторией работы реактора и /без учета фоновой мощности/ рассчитывается по формуле

$$S(t) = \sum_{k=0}^{\infty} E_{uk} \sum_{i=1}^6 a_i \lambda_i e^{-\lambda_i(t + \frac{k}{\nu})},$$

где k - номер предшествующего импульса, $k=0$ для ближайшего импульса, a_i и λ_i - параметры i -ой группы предшественников запаздывающих нейтронов, t - время до ближайшего импульса. На рис. 3 показана эта зависимость при работе реактора ИБР-30 на частоте 0,2 Гц. За интервал между импульсами интенсивность источника уменьшается в несколько раз.

Для снижения частоты следования импульсов без увеличения длительности в импульсных реакторах применяют дополнительную медленную модуляцию реактив-

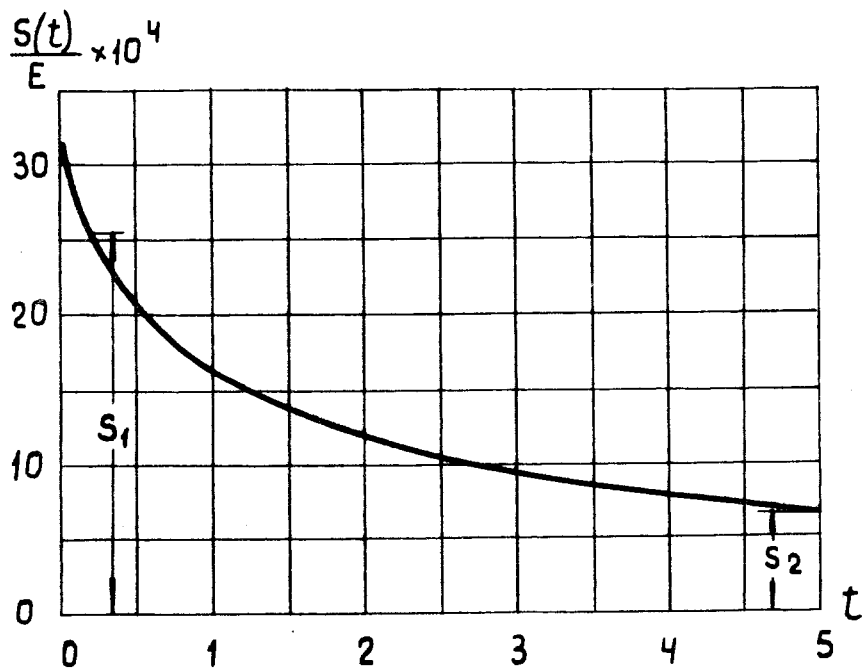


Рис. 3. Интенсивность источника запаздывающих нейтронов между импульсами мощности. $S(t)$ - интенсивность источника, н/сек; t - время, сек; E - энергия импульса, дел.; частота импульсов мощности 0,2 Гц.

ности /б и в на рис. 1/, при этом между импульсами мощности образуются побочные импульсы /спутники/. Так как размножение во время их образования не превышает нескольких сот, амплитуда (W_c), длительность (θ_c) и энергия (E_c) побочных импульсов зависят от параметров реактора следующим образом:

$$W_c \sim \frac{S}{\epsilon_c}, \quad /3/$$

$$\theta_c \sim \frac{\epsilon_c^{1/2}}{\nu}, \quad /4/$$

* АЭ, т. 7, вып. 5, 417 /1959/.

нейтронов перед развитием соответственно рабочего импульса и сателлита.

Независимо от причины возмущения во время цикла работы реактора последующие изменения энергий им-

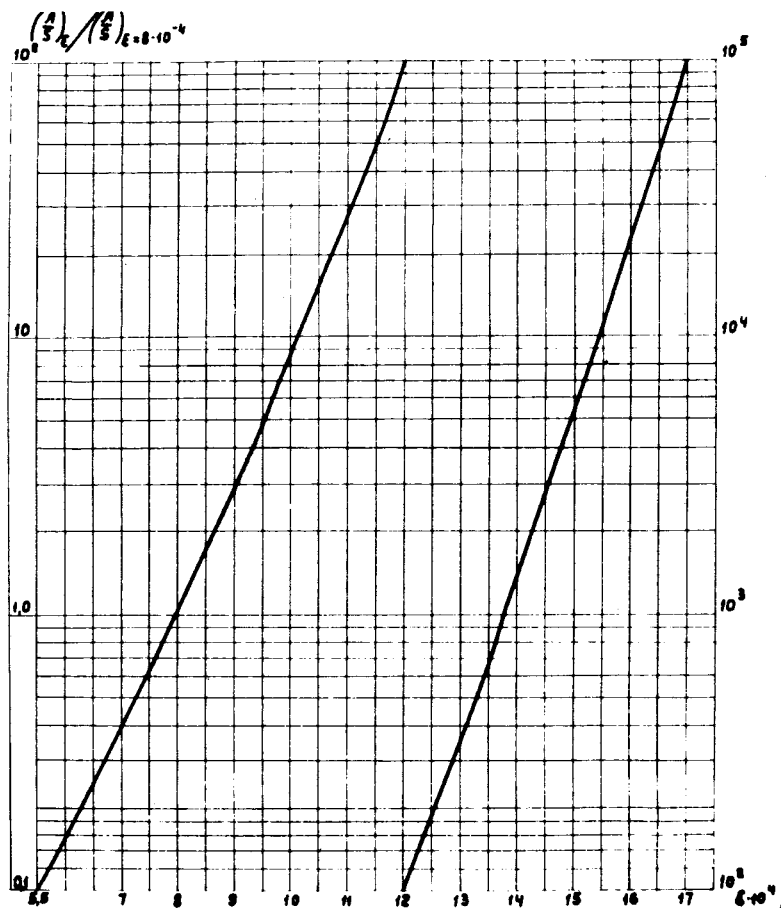


Рис. 5. Зависимость амплитуды импульса мощности ИБРа-30 от величины избыточной реактивности. $(A/S)_\epsilon$ - отношение амплитуды импульса к интенсивности источника при импульсной надкритичности ϵ ; $(A/S)_\epsilon = 8 \cdot 10^{-4}$ - то же при $\epsilon = 8 \cdot 10^{-4}$, которая соответствует равновесной надкритичности при работе ИБРа-30 на частоте 4 Гц при скорости диска основной подвижной зоны 3000 об/мин; $\epsilon = 0$ - критичность реактора по мгновенным нейтронам.

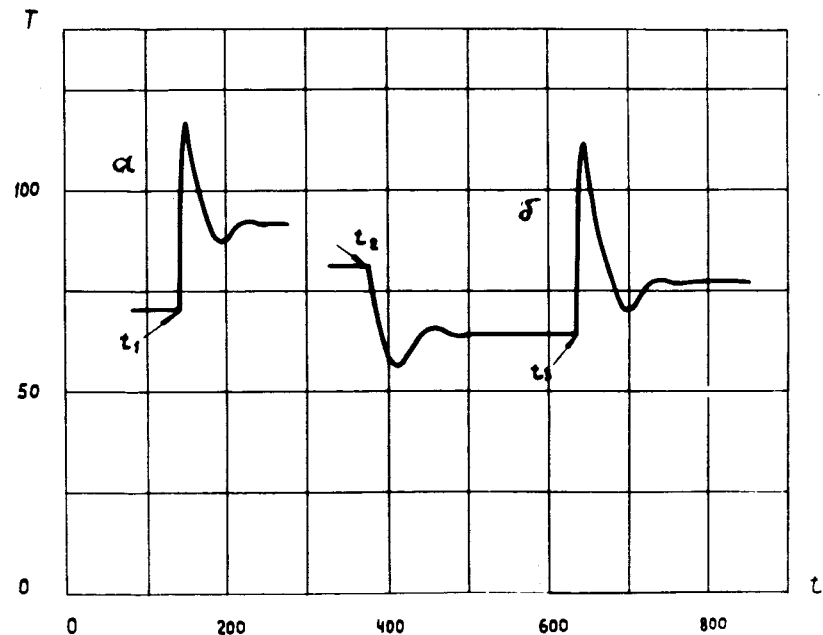


Рис. 6. Зависимость температуры оболочки центрального стержня ИБРа-30 от времени при переходных процессах. T - температура, $^{\circ}\text{C}$; t - время, сек. а - в момент времени t_1 реактор перешел с частоты следования импульсов 0,26 Гц на частоту 10 Гц с одновременным снижением реактивности на $2,1 \cdot 10^{-4}$, начальная средняя мощность реактора 4,2 кВт. б - в момент t_2 за время между очередными импульсами мощности реактивности реактора снижена на $2,3 \cdot 10^{-4}$; в момент t_3 за время между очередными импульсами мощности реактивности реактора увеличена на $1,8 \cdot 10^{-4}$, начальная средняя мощность реактора 5,2 кВт, частота импульсов 0,13 Гц.

пульсов и мощности определяются влиянием двух конкурирующих процессов: изменением интенсивности источника запаздывающих нейтронов /а также параметров ν или ϵ , если возмущение охватывает ряд циклов/ и изменением уровня реактивности, вызываемым отрицательным мощностным коэффициентом (K_w). После переходного процесса мощность изменится на величину $\Delta\epsilon/K_w$, где $\Delta\epsilon$ - избыточная реактивность, или разность равно-

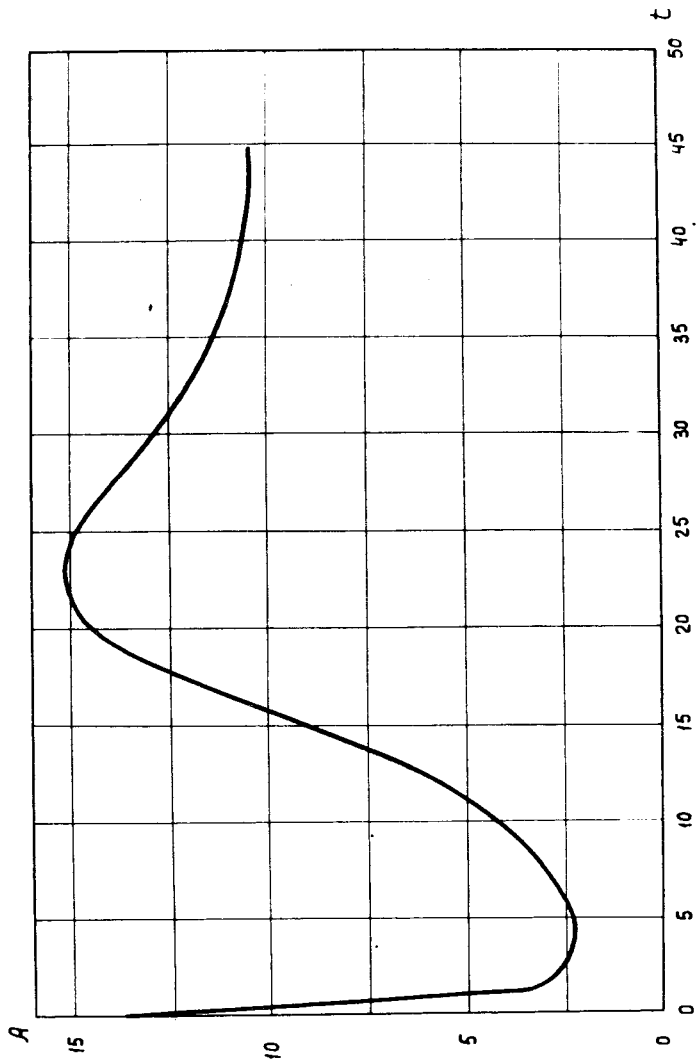


Рис. 7. Переходный процесс в реакторе ИБР-30 при быстром снижении реактивности. А - амплитуда импульса в относительных единицах /на рисунке изображена огибающая амплитуд импульсов/, t - время, сек. В момент $t=0$ за время 2,4 сек реактивность реактора снижена на $2,2 \cdot 10^{-4}$. Режим работы реактора: частота импульсов мощности 10 Гц, начальная средняя мощность 9,2 кВт.

весных импульсных надкритичностей соответственно для исходной и конечной скорости или частоты.

Как показывают расчеты, выполненные для ИБР-30 и подтвержденные экспериментально /рис. 6,7/, вследствие компенсирующего эффекта отрицательного мощностного коэффициента /обратная связь в реакторе/ изменение параметров в широких пределах не приводит к опасному повышению мощности. Например, после частотного перехода $4 \rightarrow 100$ Гц, а также в случае повышения реактивности на $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ мощность возрастает только на $\sim 10\%$, что допустимо. Но во время переходного процесса и вследствие запаздывания эффекта обратной связи в первом случае мощность на несколько секунд увеличивается в десятки раз, а во втором случае, если в пределе реактивность введена за время между импульсами, образуется импульс с энергией в 10^2 раз выше исходной. В обоих случаях выделившаяся энергия не успевает отводиться системой охлаждения и достаточна для повреждения активной зоны. Очевидно также, что чем ниже частота следования импульсов в реакторе, тем вероятнее опасное изменение параметров за время между импульсами.

Во время работы реактора оперативный персонал должен осуществлять плановые изменения мощности. При этом избыточная реактивность ($\Delta \epsilon$), вводимая в реактор, определяется из условия допустимого периода разгона на запаздывающих нейтронах:

$$T = \frac{\tau_3 \alpha^{1/2} \nu \tau}{2 \epsilon_0^{1/2} \Delta \epsilon}$$

где τ_3 - среднее время жизни запаздывающих нейтронов.

Для расчета безопасной реактивности, которая может быть введена за время между импульсами, необходимо использовать уравнение /6/. Действиями оперативного персонала или системами авторегулирования могут быть также скомпенсированы медленные изменения параметров, влияющих на уровень мощности. Последующим анализом причин этих изменений решается вопрос о целесообразности предупредительного отключения реактора. Система автоматического аварийного отключения реак-

тора вступает в действие только в тех случаях, когда в результате неисправности в системе управления, повреждений в реакторе или ошибок персонала создались условия для опасного повышения мощности или оно уже началось, тогда эта система должна предупредить или прервать ее рост и не допустить образования импульса мощности или группы импульсов с энергией, превышающей установленный пороговый уровень.

Для создания схемы защиты необходимо выбрать способ отключения реактора, контролируемый параметр и его допустимый уровень. На основании ранее рассмотренных причин повышения мощности в качестве контролируемого параметра следует выбрать величину энерговыделения за цикл работы реактора. Тогда контролирующая часть схемы наиболее экономна и, если во время цикла энерговыделение в некоторый момент достигло порогового значения независимо от причин его роста, схема вырабатывает сигнал на отключение реактора.

При выборе способа отключения можно воздействовать на любой /или несколько/ параметр, от которого зависит мощность. Как показывает детальное рассмотрение, наиболее эффективным является снижение реактивности, которое в быстрых реакторах производится механическим перемещением поглощающих или отражающих нейтроны материалов, либо части горючего зоны. Быстродействие механических систем ограничено десятками миллисекунд. Это время соизмеримо с продолжительностью цикла реактора, но на несколько порядков выше продолжительности импульса мощности. Так как основная доля энергии сосредоточена в импульсе мощности, аварийная защита, основанная на контроле энерговыделения, становится недостаточной при возникновении условий образования одиночного аварийного импульса мощности и должна быть дополнена схемами контроля, которые могут вырабатывать сигналы на отключение реактора, опережая начало развития импульса. Время опережения (t) определяется из условия

$$t \geq t_{cx} + t_{mex} + t_{\epsilon}$$

где t_{cx} - запаздывание схемы, равное времени от дости-

жения контролируемым параметром, влияющим на величину импульса мощности, порогового значения до выработки сигнала на срабатывание механической системы защиты; t_{mex} - запаздывание механической системы защиты, равное времени от поступления управляющего сигнала до начала снижения реактивности; t_{ϵ} - время снижения реактивности на величину, необходимую для предотвращения аварийного импульса. При разработке дополнительных схем защиты для контроля могут быть взяты либо непосредственно влияющие на энергию импульса параметры v, ϵ , либо параметры, от которых они, в свою очередь, зависят.

Защита ИБР-30

Для быстрого снижения реактивности в реакторе ИБР-30 применены две сборки плутониевых стержней /АС-1 и АС-2/.

Во время пуска реактора АС-1 и АС-2 с помощью дистанционных приводов вводятся снизу в активную зону и удерживаются в верхнем положении электромагнитами. В случае появления аварийного сигнала разрывается цепь электропитания магнитов, и сборки стержней под действием пружин и собственного веса выводятся из зоны. Сигналы на сброс стержней формируются каналами контроля параметров реактора.

Мы не будем здесь рассматривать всю контрольно-измерительную систему /она достаточно разветвленная/, а расскажем только об основном и вспомогательном каналах, которые служат для предупредительного отключения реактора в тех случаях, когда возникли условия образования импульса или группы импульсов с энергией выше установленного порога. Общая блок-схема основного и вспомогательного каналов АЗ приведена на рис. 8.

Датчиком уровня нейтронного потока основного канала служит установленная вблизи активной зоны ионизационная камера типа КНТ-56, сигнал с которой поступает на вход электронного блока канала защиты по верхнему и нижнему уровням и периоду. Логика работы блока пояснена на рис. 9. Контролируется каждый цикл работы

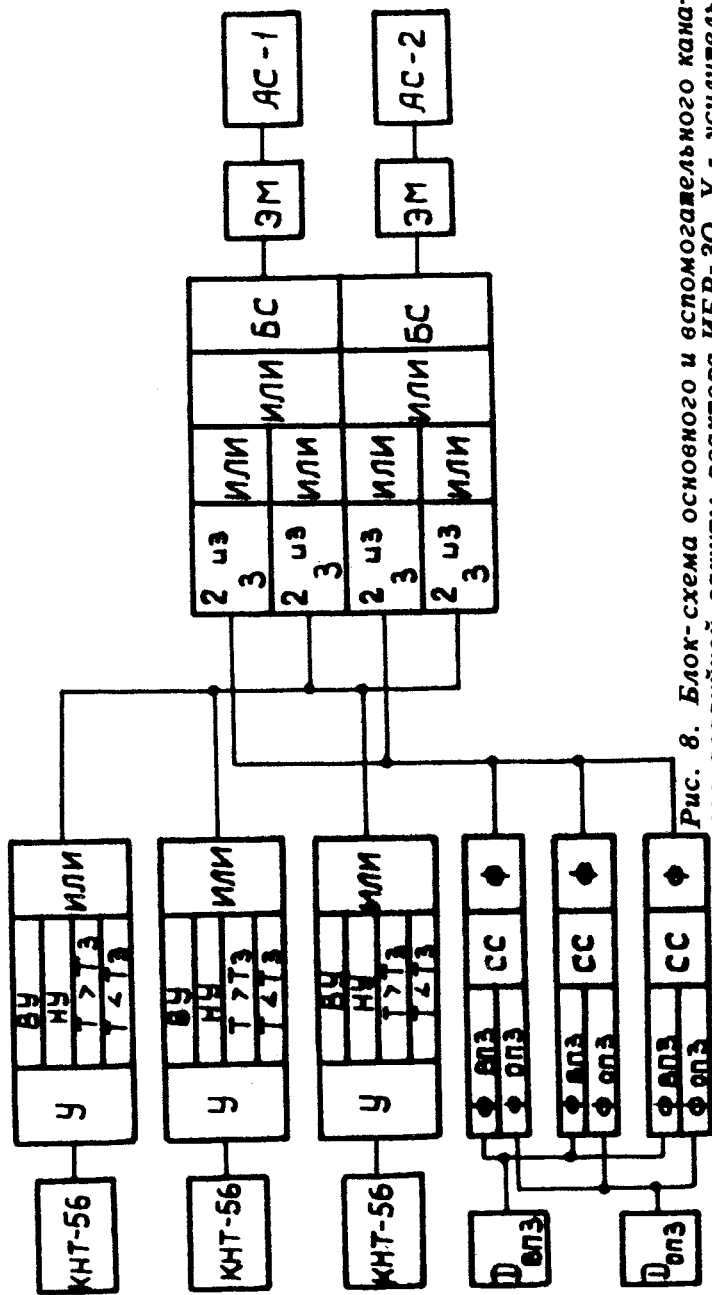


Рис. 8. Блок-схема основного и вспомогательного каналов аварийной защиты реактора ИБР-30. У - усилитель; ВУ, НУ - схемы защиты по верхнему и нижнему уровням; $T > T_3$, $T < T_3$ - схемы защиты по периоду; ДПЗ, ДВТЗ - датчики основной и вспомогательной областей зон; Ф - формирователи; СС - схема совпадения; 2х3 - схема выбора два из трех; БС - бесконтактное реле; ЭМ - электромагнит; АС - аварийный стержень.

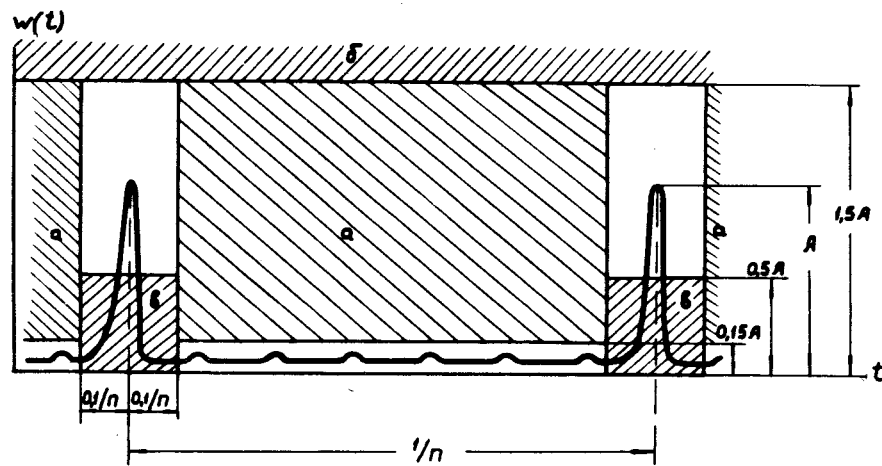


Рис. 9. Схема аварийной защиты реактора ИБР-30. $W(t)$ - зависимость мощности реактора от времени; t - время; n - частота импульсов; а, б, в - запрещенные зоны; А - амплитуда импульса мощности.

реактора. Предупредительный сигнал вырабатывается схемой в случаях:

- повышения или понижения амплитуды рабочего импульса,
- повышения амплитуды сателлитов,
- увеличения или уменьшения интервала между импульсами мощности.

Сигнал на сброс аварийных стержней формируется, если любые параметры двух каналов достигли уровня порога. На рис. 10а приведена блочно-функциональная схема основного канала и временная диаграмма, поясняющая логику работы схемы при защите по периоду. Защита по верхнему или нижнему уровням амплитуды импульса мощности осуществляется при срабатывании триггерной схемы верхнего уровня ($TR_{ВУ}$) или при отсутствии срабатывания триггерной схемы нижнего уровня ($TR_{НУ}$). В последнем случае на сброс АС проходит сигнал с триггерной схемы TR_0 , осуществляющий временную привязку к импульсу мощности ниже нижнего уровня. Сигнал TR_0 используется также для запуска схемы

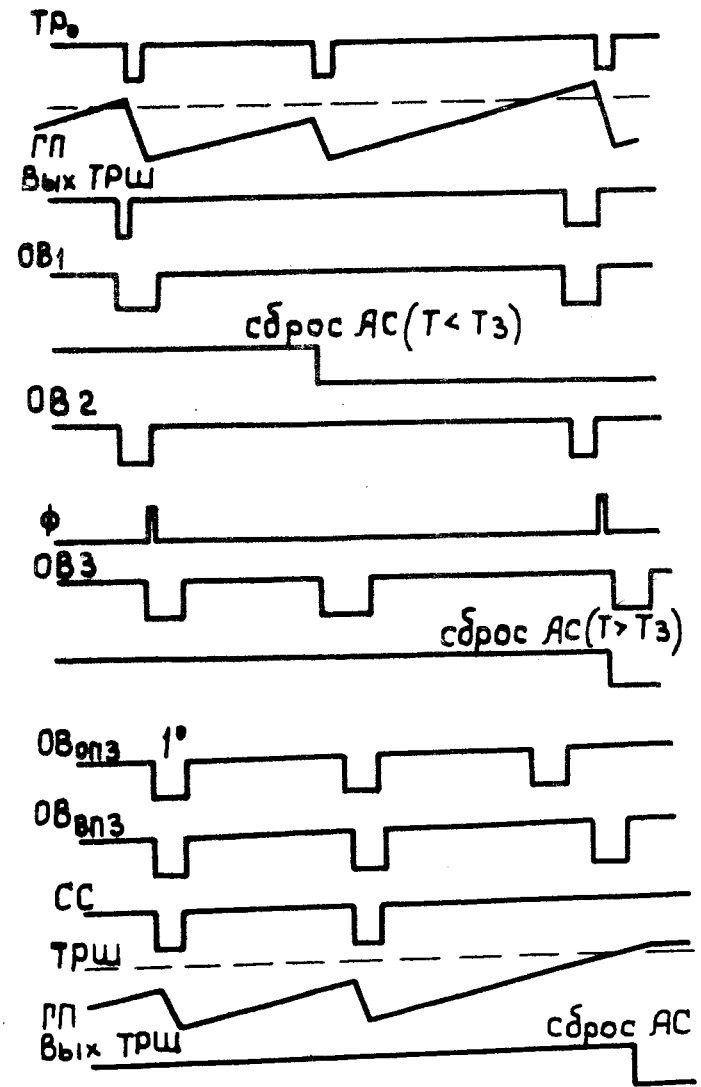
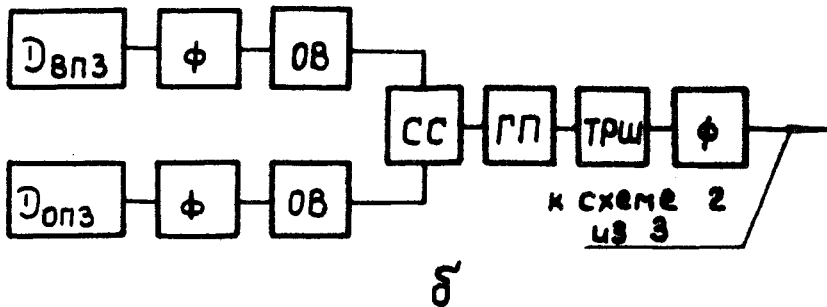
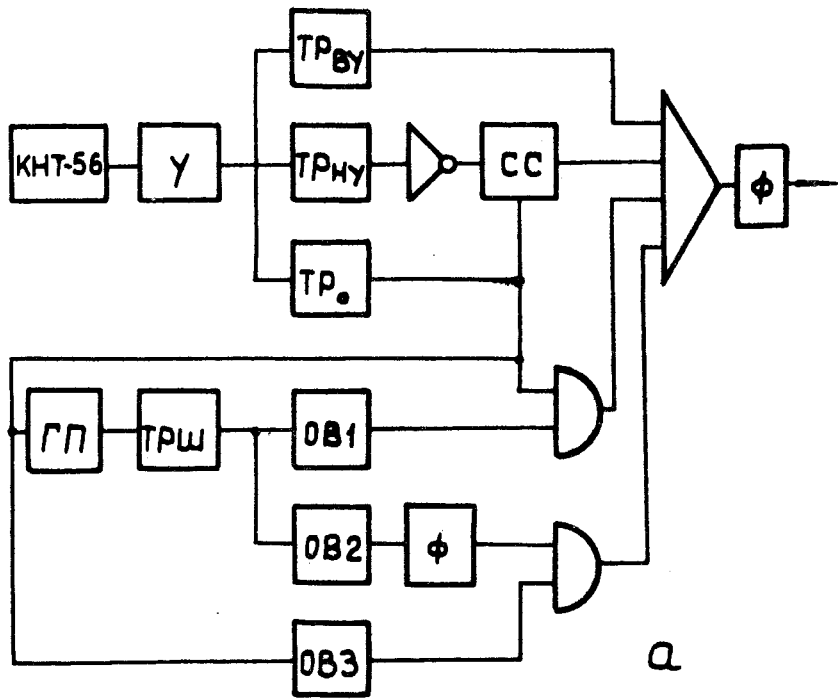


Рис. 10. а. Блочнo-функциональная схема основного канала. ТРВУ, ТРHy, ТР₀, ТРШ - триггерные схемы; ГП - генератор пилы; ОБ - одновибратор; Φ - формирователь; СС - схема совпадений. б. Блочнo-функциональная схема вспомогательного канала.

защиты по периоду. Этот импульс сбрасывает в исходное состояние генератор "пилы" /ГП/. Уровень срабатывания схемы триггера Шмитта /ТРШ/ от сигнала "пилы" устанавливается таким, чтобы получить опережение сигнала ТРШ по отношению к TR_0 на величину ΔT_3 /в нашем случае 10% от T_3 /, T_3 - заданный период работы ИБРа-30. По фронту сигнала от ТРШ срабатывает одновибратор ОВ1, длительность сигнала которого 30% от T_3 . Этот импульс блокирует прохождение сигнала от TR_0 на сброс АЗ. При $T < T_3$ на величину большую, чем ΔT_3 , ТРШ не срабатывает, и сигнал TR_0 проходит на сброс АС, осуществляя таким образом защиту по периоду $T < T_3$. Одновибраторы ОВ2 и ОВ3 работают на защиту по периоду при $T > T_3$. ОВ2 запускается на фронте сигнала ТРШ, ОВ3 - сигналом TR_0 , ОВ2 осуществляет задержку сигнала на 20% от T_3 , длительность сигнала ОВ3 - 30% от T_3 . При $T > T_3$ на величину, большую чем ΔT_3 /в нашем случае 10% от T_3 /, устраняется блокирующее действие сигнала ОВ3, и сформированный по спаду сигнала ОВ2 импульс проходит на сброс АС, осуществляя таким образом защиту по периоду при $T > T_3$. Основные данные по каналу аварийной защиты приведены в таблице. Анализ достаточности основного канала аварийной защиты показывает, что не обеспечивается своевременное отключение реактора в том случае, если за время между импульсами введена реактивность, способная по величине вызвать образование

Таблица

1. Реактивность сбросов АС-1 и АС-2	%	2,2
2. Ход АС-1 /АС-2/	мм	140
3. Время подъема АС-1 /АС-2/ в зону	мин	4
4. Запоздывание схемы контроля ($t_{сх}$)	мсек	$\leq 0,1$
5. Запоздывание механической системы ($t_{мех}$)	"	≤ 10
6. Время вывода АС-1 /АС-2/ из зоны	"	≤ 180

аварийного импульса мощности. В этом случае произойдет срабатывание защиты по превышению амплитуды импульса, но уже после того, как выделилась его энергия. Пока не удастся создать надежно работающего канала контроля уровня реактивности между импульсами в связи с тем, что зависимость нейтронного потока от реактивности в подкритическом реакторе слабая, как это видно из уравнений /1/, /3/, /4/, /5/, и трудно с необходимой точностью выделить полезный сигнал на фоне флюктуаций v и S . Анализ работы реактора показывает, что аварийная по величине реактивность за короткое время может быть введена в случае нарушения регулярности движения основной и вспомогательной подвижных зон в результате повреждений кинематической цепи привода. Скрытая реактивность /рис. 11/ образуется в системе либо при пуске реактора с уже нарушенной синхронностью вращения зон, либо в процессе работы. В последнем случае, очевидно, рассинхронизация сопровождается снижением мощности реактора. Для точной синхронизации в кинематической цепи привода подвижных зон ИБРа-30 установлен дифференциал с дистанционным приводом, которым выполняется точная взаимная фазировка вращающихся зон перед повышением мощности реактора. При вращающихся зонах контроль за взаимным положением ОПЗ и ВПЗ выполняется с помощью специальной электронной схемы. Сигналы с датчиков контроля взаимного положения зон в случае их расфазировки на угол больше 2° поступают на три идентичных электронных блока /рис. 8/, выходы которых подключены к цепочке сброса аварийных стержней по схеме 2 из 3-х, вызывая в этом случае сброс АС. На рис. 10 б приведена блочно-функциональная схема вспомогательного канала и временная диаграмма, поясняющая его работу. Сформированные сигналы с датчиков ОПЗ и ВПЗ запускают два одновибратора, выходы которых подключены к входам схемы совпадений /СС/. Длительность сигналов обоих ОВ устанавливается равной заданной величине расфазировки вращающихся зон /время пересчитывается с учетом угла расфазировки/. При расфазировке зон, не превышающей заданную, на выходе СС постоянно присут-

стствует сигнал, сбрасывающий напряжение генератора "пилой" /ГП/. Как только расфазировка зон превысит

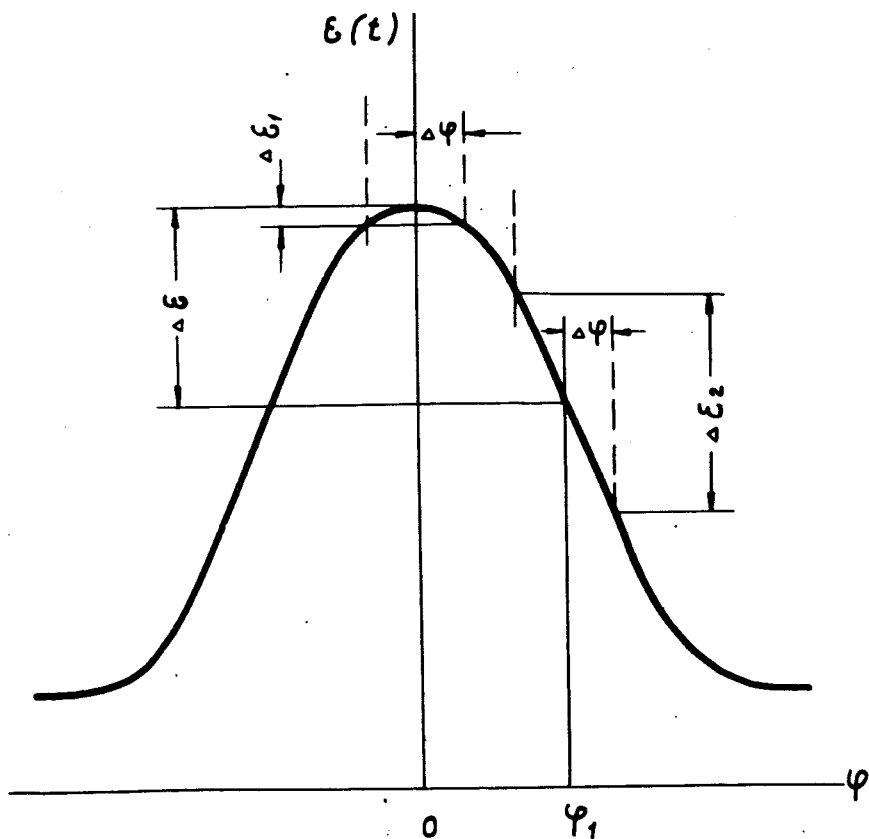


Рис. 11. Влияние крутильных колебаний диска вспомогательной подвижной зоны /ВПЗ/ на флюктуацию. $\epsilon(t)$ - реактивность ВПЗ, ϕ - угол поворота ВПЗ в градусах, $\Delta\phi$ - амплитуда крутильных колебаний, $\phi=0$ - момент совмещения центра основной подвижной зоны с неподвижной при точной синхронизации зон. $\phi=\phi_1$ - то же в случае нарушения синхронизации. $\Delta\epsilon_1$ и $\Delta\epsilon_2$ - максимальные изменения реактивности реактора при синхронной работе подвижных зон и в случае ее нарушения. $\Delta\epsilon$ - скрытая реактивность, появляющаяся в системе при нарушении синхронной работы подвижных зон.

заданную величину, напряжение генератора не сбросится, вызывая тем самым срабатывание триггерной схемы /ТРШ/. Сигнал с ТРШ вызывает сброс аварийных стержней. Обратимое изменение реактивности реактора, которое в момент снижения сопровождается соответствующим уменьшением мощности, контролируется и основным каналом защиты /сигнал на снижение амплитуды импульса/. Имеется также контрольный канал, сигнал с которого поступает на сброс аварийных стержней при снижении температуры оболочки рабочего стержня активной зоны на 20°C от номинальной.

Таким образом, проведенные расчеты и сформулированные на основании их требования к защите импульсного быстрого реактора позволили разработать систему, обеспечивающую предупредительное отключение реактора при возникновении аварийной ситуации. Длительный опыт эксплуатации ИБРа-30 подтверждает правильность выбранного подхода и высокую надежность аппаратуры. Электронная аппаратура системы защиты ИБРа-30 была разработана и изготовлена в отделе радиоэлектроники Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ. Составление монтажных схем выполнено на автомате ADMAP ВНР с использованием машинного проектирования.

В заключение авторы считают приятным долгом выразить благодарность Г.П.Жукову, В.А.Бельковцу, Н.И.Харьюзовой за помощь при разработке системы защиты; А.Б.Мельничуку за помощь при изготовлении электронной аппаратуры системы; И.М.Франку, Е.Д.Воробьеву за полезные обсуждения.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 сентября 1974 года.