

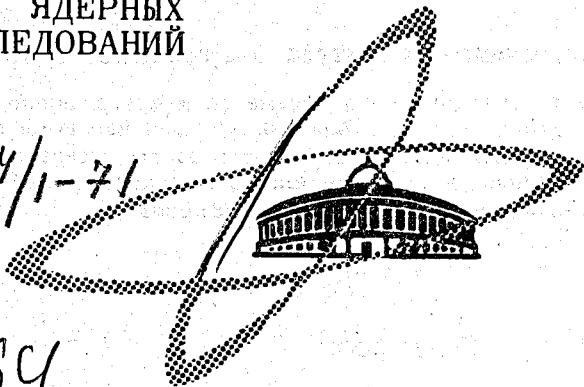
С 3488

P-83

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2564/1-71



13-5764

5764

В.Т. Руденко

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

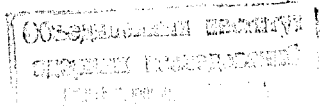
РЕЖИМ РЕДКИХ ИМПУЛЬСОВ
НА РЕАКТОРЕ ИБР

1971

13-5764

В.Т. Руденко

РЕЖИМ РЕДКИХ ИМПУЛЬСОВ
НА РЕАКТОРЕ ИБР



1. Введение

Схема реактора ИБР позволяет получать частоты в диапазоне $5 + 50$ гц/1,3/. При средней мощности 6 квт и частоте следования импульсов 5 гц их энергия $\approx 3 \cdot 10^{13}$ дел. Так как энергия импульса не зависит от интенсивности охлаждения реактора, на ИБРе можно получить импульсы высокой мощности, сохранив интенсивность охлаждения, но соответственно увеличив время между импульсами. Снижение частоты повторения импульсов с пропорциональным увеличением их энергии во многих случаях увеличивает отношение "эффекта" к "фону" при измерениях на нейтронных пучках. Этот режим работы реактора удобен для исследований динамики сред, подвергнутых воздействию "мгновенного" радиационного удара в момент импульса мощности, а также для нейтронно-активационного анализа. Но с увеличением энергии импульса в ТВЭЛах реактора развиваются процессы, обусловленные тепловым ударом, которые усугубляются высокой частотой следования импульсов. Явление теплового удара состоит в том, что при быстром нагреве материал ТВЭЛов не успевает расширяться со скоростью роста температуры, и в ТВЭЛах возникают напряжения сжатия, которые служат источником последующих свободных колебаний напряжений и деформаций^{/2/}. В случае превышения предельного напряжения, которое может быть достигнуто либо во время одиночного импульса, либо сложением напряжений от ряда последовательных импульсов, возможны повреждения ТВЭЛов. В свою очередь, динамика ТВЭЛов оказывает существенное влияние на кинетику реактора. Режим редких импульсов позволяет экспериментально исследовать динамику ТВЭЛов и кинетику импульсного реактора в условиях периодически повторяющихся тепловых ударов. Режим импульсов мощности с частотой следования 0,2 гц

и энергией $8 \cdot 10^{14}$ дел. был впервые осуществлен на реакторе ИБР в 1968 г. Аналогичная схема снижения частоты импульсов мощности использована и для ИБР-30. Однако кинематическая схема привода подвижного отражателя была изменена для обеспечения дистанционного перевода реактора в низкочастотный режим с сохранением синхронной работы подвижных элементов, а также были введены дополнительные частоты, на одной из которых две основные подвижные зоны работают поочередно. По этой же схеме на реакторе ИБР-30 могут быть получены и единичные импульсы мощности.

2. Схема снижения частоты

Форма импульсов мощности, частота их повторения, а также фон между импульсами определяются законом изменения реактивности реактора ИБР от времени. В схеме используются основная (ОПЗ) и вспомогательная (ВПЗ) подвижные зоны и подвижный отражатель (ПО) - вольфрамовый стержень, перемещающийся возвратно-поступательно в периферийном канале активной зоны (рис. 1). При работе только основной подвижной зоны имеется зависимость между длительностью импульсов и частотой их следования. При снижении скорости ОПЗ частота следования вспышек снижается, но увеличивается их длительность, поэтому таким путем обычно изменяют частоту в сравнительно небольшом диапазоне (основная частота реактора). Снижение частоты следования импульсов без увеличения их длительности (промежуточная частота) достигается модуляцией реактивности вспомогательной подвижной зоной. В этом случае реактор достигает импульсной критичности в момент одновременного совмещения ОПЗ и ВПЗ с центром неподвижной зоны реактора. В остальные моменты совмещения ОПЗ с неподвижной зоной состояние реактора остается подкритическим, но повышение реактивности приводит к образованию побочных импульсов (сателлитов), частота которых равна основной частоте реактора. Варьируя скорости подвижных зон, можно значительно расширить диапазон возможных частот.

Нижняя граница промежуточной частоты лежит в области нескольких герц и определяется минимальной скоростью ВПЗ, ниже которой зависимость реактивности от времени расширяется настолько, что становится нежелательным дальнейшее увеличение энергии ближайших к импульсу мощности сателлитов. При частоте ниже этой границы применяется дополнительная пульсация реактивности реактора. Равновесная надкритичность достигается только в моменты одновременного совмещения с неподвижной зоной ОПЗ, ВПЗ и при опущенном в зону стержне редких импульсов. Частота импульсов мощности в этом случае равна частоте дополнительной пульсации реактивности, а для ограничения энергии побочных импульсов промежуточной частоты должны выполняться соотношения:

$$\epsilon_{\text{по}} \geq \epsilon_0 \approx 1 \cdot 10^{-3},$$

$$T_p \leq \frac{1}{n_{\text{ВПЗ}}} = 0,1 + 0,2 \text{ сек.}$$

Здесь T_p - время срабатывания стержня.

При работе реактора на заметной мощности флюктуация энергий импульсов определяется в основном колебаниями реактивности. Обычно они малы, но если синхронизация основной и вспомогательной подвижных зон выполнена недостаточно точно, флюктуации резко возрастают и стабильная работа реактора становится невозможной. Источником колебаний реактивности, зависящим от синхронизации зон, являются крутильные колебания диска ВПЗ. Влияние синхронности вращения зон на флюктуацию реактивности пояснено рис. 2. Кроме того, при нарушении синхронизации подвижных зон импульс мощности формируется раньше или позднее максимума реактивности вспомогательной подвижной зоны, поэтому в системе появляется скрытая реактивность $\Delta\epsilon$ (рис. 2). В случае ее внезапного высвобождения, которое может быть вызвано, например, поломкой в механической системе привода, произойдет резкое увеличение энергии импульса и последующий разгон реактора.

3. Кинематическая схема ИБРа-30

Элементы, формирующие реактивность реактора, приводятся в движение через кинематическую схему (рис. 3) главным приводом (1) — электромотором постоянного тока с плавной регулировкой скорости. Ступенчатое изменение соотношений скоростей дисков ОПЗ и ВПЗ выполняется дистанционно переключаемым блоком шестерен (2): При переключениях скоростей диски ОПЗ (3) и ВПЗ (4) предварительно устанавливаются на специальные фиксаторы, которые обеспечивают начальное состояние системы, необходимое для последующей синхронной работы подвижных зон. Во время работы реактора при необходимости производится корректировка положения дисков путем их медленного относительного вращения с помощью дифференциального механизма (5) и специального электропривода. С вала диска ВПЗ движение передается кулачковому диску (6), который при своем вращении давит на рычаг (7), и стержень (8) опускается в активную зону реактора (9). Возврат стержня в верхнее положение осуществляется тремя пружинами (10). Собственные колебания рычажного механизма гасятся демпфером (11). Дистанционное отключение и включение в работу стержня при сохранении синхронности его движения с ВПЗ производится электроприводом (12), который для отключения стержня поворачивает рычаг (7), при этом стержень опускается в зону в нижнее положение и его перемещения при вращении кулачкового диска прекращаются. Включение производится восстановлением контакта рычага (7) с кулачковым диском (6).

4. Пуск ИБРа и ИБРа-30 в режиме редких импульсов

4.1. Во время работы реактора амплитуда импульса мощности контролируется системой аварийной защиты. В качестве датчиков используются ионизационные камеры, заполненные метаном. Сигнал на сброс аварийных стержней появится только после образования импульса с повышенной амплитудой. При высокой частоте импульсов мощности это件 опасно, так как за время между импульсами и за время срабатывания

защиты реактивность реактора не может увеличиться на значительную величину и не может образоваться импульс или группа импульсов с опасной для реактора энергией. В режиме редких импульсов это условие не выполняется, и необходима система, которая отключает реактор перед образованием опасного по энергии импульса мощности. Схема режима редких импульсов позволяет использовать в качестве контролируемой величины амплитуду побочных импульсов, которые формируются при одновременном совмещении ОПЗ и ВПЗ с неподвижной зоной ("а" на рис.1). Частота их появления в зависимости от режима передачи равна для промежуточной частоты ИБР-30 $4 + 10$ гц. Амплитуды этих сателлитов пропорциональны мощности источника запаздывающих нейтронов в момент их формирования. Зависимость от времени источника запаздывающих нейтронов между импульсами мощности от всех предыдущих импульсов (k) можно выразить соотношением

$$\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{i=1}^6 a_i \lambda_i e^{-\lambda_i (t + \frac{k}{n})}$$

где n - частота импульсов мощности, a_i и λ_i - параметры i -ой группы предшественников запаздывающих нейтронов.

Рассчитанная для частоты следования импульсов 0,2 гц эта зависимость приведена на рис. 4. Чувствительность амплитуды рабочего импульса и амплитуды сателлита к изменениям реактивности была проверена во время работы ИБР-30 с частотой 0,13 гц. Энергия и пропорциональная ей амплитуда рабочего импульса регистрировались зеркальным гальванометром, подключенным к блоку ионизационных камер типа КНТ-52. Амплитуда сателлита, отстоящего на ≈ 7 сек от рабочего импульса, наблюдалась по осциллографу, датчиком служила ионизационная камера, заполненная метаном. Результаты измерений приведены на рис.5.

Дополнительная система, контролирующая реактивность реактора ИБР-30 в промежутке между рабочими импульсами, выполнена аналогично системе аварийной защиты по превышению амплитуд рабочих импульсов, но в отличие от последней она блокируется на 2 + 3 сек и из контроля исключается рабочий импульс и следующие за ним сателлиты, амплитуды которых сильно зависят от времени. Если реактивность реактора

и соответственно амплитуда сателлита в промежутке между импульсами превысит допустимое значение, срабатывает аварийная защита и развития опасного для реактора импульса мощности не происходит.

4.2. Привод стержня во время работы испытывает сильные динамические нагрузки, поэтому нельзя исключить вероятность его повреждения с остановкой стержня в активной зоне. В этом случае реактор переходит с частоты редких импульсов мощности на промежуточную частоту 4 ± 10 гц, в зависимости от режима передачи, и следующий импульс мощности разовьется через $0,1 \pm 0,2$ сек, а его энергия возрастет в соответствии с увеличением мощности источника запаздывающих нейтронов в 4 раза (рис. 4) и вызовет срабатывание аварийной защиты. Образование одиночного импульса такой энергии для ИБР-30 неопасно.

4.3. При переводе реактора в режим редких импульсов увеличивается доля энергии, выделяющаяся между импульсами, за счет сателлитов, формирующихся в моменты одновременного совмещения ОПЗ и ВПЗ с неподвижной зоной. Так как длительности всех сателлитов этой группы одинаковы, а энергии пропорциональны амплитудам, распределение которых известно, экспериментально определялось отношение энергии первого сателлита к энергии импульса. В качестве детектора использовались литиевые стекла, сигналы с которых поступали на временной анализатор. Результаты измерений приведены на рис. 6. Энергия первого сателлита составила $0,83\%$ от энергии импульса, а доля энергии всех сателлитов этой группы составляет около 8% . Следует отметить, что при этих измерениях формы импульса мощности его задний фронт спадает медленнее по сравнению с формой импульсов быстрых нейтронов. Это различие вызывается γ -излучением, которое рождается при захвате в вольфрамовом отражателе нейтронов, выходящих из замедлителя в сторону активной зоны.

Для снижения этого эффекта на реакторе ИБР между замедлителем и отражателем предусмотрена установка прослойки из B_4C .

4.4. Пульсация реактивности реактора, вызываемая возвратно-поступательным движением стержня, имеет плоскую вершину, так как в момент максимума реактивности скорость стержня меняет знак и требования к точности синхронизации стержня с остальными подвижными элементами реактора невысокие. Зависимость реактивности стержня от его положе-

ния в зоне определялась экспериментально и приведена на рис. 7. Флюктуации импульсов мощности в режиме редких вспышек определялись по показаниям зеркального гальванометра, подключенного к блоку ионизационных камер типа КНТ-52. Результаты измерений при частоте 0,13 гц приведены на рис. 8. Распределения амплитуд импульсов во время работы реактора на частоте 0,21 гц (поочередная работа ОПЗ №1 и №2) в случае точной и нарушенной синхронности вращения ОПЗ и ВПЗ приведены на рис. 9. При нарушении синхронизации подвижных зон колебания мощности резко возрастают, и стабильная работа реактора становится невозможной.

4.5. Во время работы реактора ИБР с частотой следования импульсов мощности 0,2 гц были измерены переменные напряжения, возникающие в защитной оболочке плутониевого стержня, а также форма импульса мощности и изменение амплитуд импульсов при скачкообразном снижении реактивности между импульсами. Полученные осциллограммы напряжений и методика эксперимента опубликованы /3/. В момент развития импульса мощности в стержневых ТВЭЛах реактора возникают явления, характерные для теплового удара. При энергиях импульса менее $6 \cdot 10^{14}$ дел (средняя мощность реактора $\approx 4,5$ квт) в оболочке стержня возбуждаются переменные напряжения с частотой ≈ 8 кгц и амплитудой, нарастающей по мере повышения энергии импульса. Частота колебаний соответствует продольным свободным колебаниям стержня. В интервале энергий импульсов $(6+8) \cdot 10^{14}$ дел. одновременно с продольными колебаниями возбуждаются поперечные колебания с частотой $0,8+1$ кгц. При сравнительно небольшом тепловом ударе (средний нагрев ТВЭЛов зоны 10°C за импульс) зарегистрированные напряжения оказались значительными и оцениваются в 10^8 дин/см². Продолжительность свободных колебаний составляет $8+10$ мсек.

Форма импульса мощности при энергии импульса $6 \cdot 10^{13}$ дел. соответствует расчётной по одноточечной модели и параболической форме изменения реактивности

$$\epsilon_1(t) = \epsilon_0 - a v^2 t^2, \quad (1)$$

где

$$\epsilon_0 = 1,17 \cdot 10^4,$$

$$a v^2 = 18 \cdot 10^4 \text{ 1/сек}^2.$$

Повышение энергии импульса до $8 \cdot 10^{14}$ дел. привело к сокращению его длительности с 52 до 36 мксек и сдвигу максимума мощности на 32 мксек (см. рис. 3 ^{/3/}). Зависимость реактивности реактора от времени, которая соответствует измеренной форме импульса мощности при его энергии $8 \cdot 10^{14}$ дел., ищем в виде суммы двух кривых. Одна из них образуется основной подвижной зоной реактора и имеет вид параболы (1). Вторая, в области основного выделения энергии импульса ($13 \cdot 10^{-6} \leq t \leq 47 \cdot 10^{-6}$), определяется отрицательной обратной связью реактора. Так как выделение энергии импульса приблизительно соответствует параболическому закону, эту зависимость выразим в виде параболы: $-b(t - 13 \cdot 10^{-6})^2$. Тогда можно показать, что измеренной форме импульса мощности при его энергии $8 \cdot 10^{14}$ дел. соответствует следующая форма реактивности реактора:

$$\epsilon_2(t) = 1,42 \cdot 10^{-3} - 18 \cdot 10^4 t^2, \quad t \leq 13 \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

а в интервале $13 \cdot 10^{-6} \leq t \leq 49 \cdot 10^{-6}$

$$\epsilon_3(t) = 1,42 \cdot 10^{-3} - 18 \cdot 10^4 t^2 - 7,6 \cdot 10^5 (t - 13 \cdot 10^{-6})^2. \quad (3)$$

Последний член в формуле (3) учитывает влияние мгновенного отрицательного температурного коэффициента. Изменение амплитуд импульсов мощности при скачкообразном снижении реактивности реактора на $1,4 \cdot 10^{-4}$ наблюдалось по осциллографу во время работы с энергией импульса $8 \cdot 10^{14}$ дел. В качестве датчика использована ионизационная камера, заполненная метаном. Уменьшение амплитуды первого после снижения реактивности импульса составило $\approx 17\%$ и соответствует рассчитанному по формулам (2), (3) при учёте мгновенного отрицательного температурного коэффициента.

4.6. Для реактора ИБР-30 при средней мощности 30 квт и частоте следования импульсов 0,1 гц энергия импульса составит 10^{15} - 10^{16} дел/имп. В связи с незначительным увеличением загрузки зоны по сравнению с ИБРом удельная тепловая нагрузка на ТВЭЛы ИБРа-30 во время импульса возрастает почти пропорционально. В случае пропорционального увеличения переменных напряжений длительная безаварийная работа ТВЭЛов не очевидна. Кроме того, медленное затухание свободных колебаний в десятки раз увеличивает цикличность напряжений по сравнению с частотой импульсов мощности.

Рассмотрим возможность снижения механических нагрузок, возникающих в ТВЭЛах импульсного реактора при тепловых ударах. Конструктивно ТВЭЛы ИБРа выполнены в виде плутониевых стержней, свободно помещенных в защитные оболочки с верхней заделкой их в решетке активной зоны. Значительные механические напряжения в оболочке ТВЭЛа ИБРа возникают при передаче ей механического импульса в месте опоры сердечника. Поэтому конструкция ТВЭЛов ИБРа-30 была изменена. При их изготовлении применена плотная посадка сердечника в двойную оболочку без контакта сердечника с оболочкой по торцу. Такая конструкция сохраняет отрицательным температурный коэффициент реактора, улучшает теплоотвод от сердечника и позволяет разгрузить оболочку во время теплового удара. Уменьшение вдвое диаметра стержня снижает температурный перепад по его сечению и отодвигает возбуждение поперечных колебаний в сторону больших энергий импульсов.

Имеются и другие пути снижения механических нагрузок. При рассмотрении процессов, сопровождающих тепловой удар, нетрудно заметить, что, во-первых, величина механических напряжений в ТВЭЛах пропорциональна коэффициенту линейного расширения его материала, во-вторых, у свободных стержневых ТВЭЛов имеется средняя плоскость, свободная от напряжений и деформаций. Использование в качестве материала ТВЭЛов сплавов с близким к нулю коэффициентом линейного расширения в рабочей области температур исключает механические деформации во время теплового удара, но одновременно приводит к снижению (или к появлению положительного) мгновенного и медленного температурных коэффициентов

реактора. Для разгрузки оболочки можно применить подвеску сердечника в оболочке по его средней, свободной от напряжений плоскости. Но такое конструктивное решение увеличивает время рассеяния сердечником запасенной во время удара упругой энергии.

4.7. Форма импульса мощности ИБРа-30 по быстрым нейтронам была измерена с помощью ториевой камеры деления во время работы реактора с частотой 0,13 гц. Результаты измерений при энергии импульса $1 \cdot 10^{14}$ дел. и $2 \cdot 10^{15}$ дел. приведены на рис. 10. Увеличение энергии импульса ИБРа-30 в 2,5 раза по сравнению с энергией импульса ИБРа вызвало сокращение вспышки только на 18%. Изменение амплитуд импульсов мощности ИБРа-30 при скачкообразном возмущении реактивности между импульсами регистрировалось по показаниям зеркального гальванометра, подключенного к блоку камер КНТ-52. Результаты измерений показаны на рис. 5. Энергия первого после возмущения реактивности импульса уменьшилась в 2 раза, что также указывает на меньшее значение мгновенного температурного коэффициента по сравнению с мгновенным температурным коэффициентом ИБРа. По предварительным измерениям переменные напряжения в оболочке ТВЭЛа ИБРа-30 не превышают $0,5 \cdot 10^8$ дин/см² при энергии импульса $2 \cdot 10^{15}$ дел. (средний подогрев ТВЭЛов зоны 20°C за импульс).

4.8. Схема режима редких импульсов позволяет возбуждать в реакторе и одиночные импульсы высокой мощности путем увеличения реактивности реактора за время между импульсами при его работе на низкой средней мощности. Дополнительная защита по амплитуде сателлитов используется в этом случае для отключения реактора, если введена реактивность выше допустимой величины. Во время экспериментального пуска ИБРа-30 в этом режиме была получена энергия одиночной вспышки (5-6) $\cdot 10^{15}$ дел. Зарегистрированный самописцем подогрев оболочки стержня за импульс составил около 50°C. Для одиночных импульсов величина механических напряжений в сердечнике и оболочке не должна превышать предела прочности материала, поэтому безопасный уровень энергии импульса выше, чем в случае периодически повторяющихся импульсов.

В заключение автор считает своим приятным долгом поблагодарить И.М. Франка, Ф.Л. Шапиро, С.К. Николаева за интерес к работе и полезные обсуждения, Б.Н. Бунина, Л.К. Кулькина, Э.И. Шарипова за помощь в проведении измерений.

Литература

1. Г.Е. Блохин, Д.И. Блохинцев и др. АЭ, 10, 437 (1961).
2. D. Burgreen. Nucl. Sci., Eng., 12, 2 (1962).
3. В.Д. Ананьев и др. Препринт ОИЯИ, 13-4395, Дубна, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел

19 мая 1971 года.

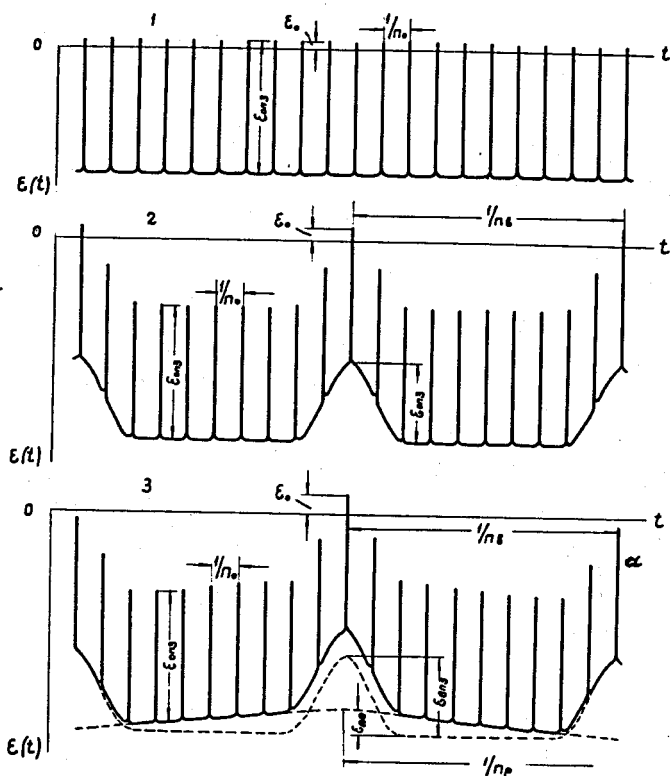


Рис. 1. Схема модуляции реактивности реактора ИБР-30. 1 - основная (n_0 1/сек), 2 - промежуточная (n_a 1/сек), 3 - низкая (n_p 1/сек) частота следования импульсов мощности. ϵ_0 - равновесная надкритичность реактора, $\epsilon_{опз}$, $\epsilon_{впз}$, $\epsilon_{по}$ - реактивности основной и вспомогательной подвижных зон и подвижного отражателя, $\epsilon(t)$ - реактивность, t - время.

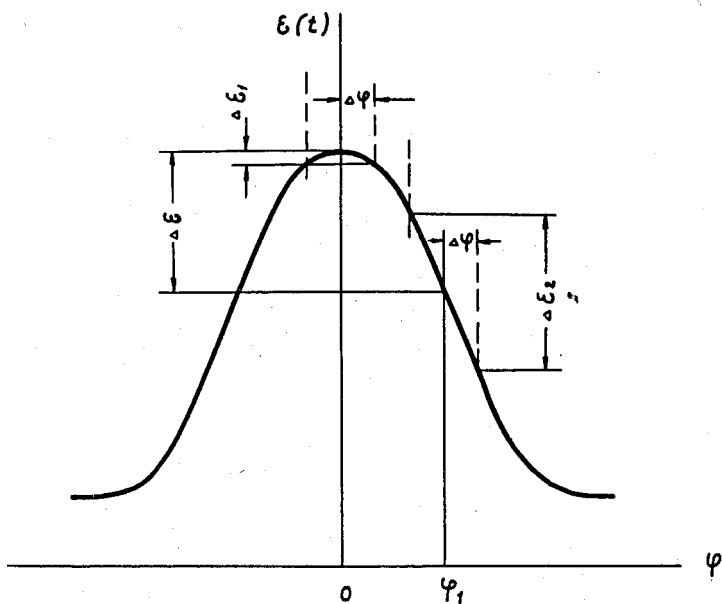


Рис. 2. Влияние крутильных колебаний ВПЗ на флюктуацию реактивности. $\epsilon(t)$ - реактивность ВПЗ, ϕ - угол поворота ВПЗ (в градусах); $\Delta\phi$ - амплитуда крутильных колебаний; $\phi=0$ - момент совмещения центра ОПЗ с неподвижной зоной при точной синхронизации ОПЗ и ВПЗ; $\phi=\phi_1$ - то же в случае нарушения синхронизации; $\Delta\epsilon_1$ и $\Delta\epsilon_2$ - максимальные изменения реактивности реактора при синхронной работе ВПЗ и ОПЗ и в случае ее нарушения; $\Delta\epsilon_0$ - скрытая реактивность, появляющаяся в системе при нарушении синхронной работы подвижных зон.

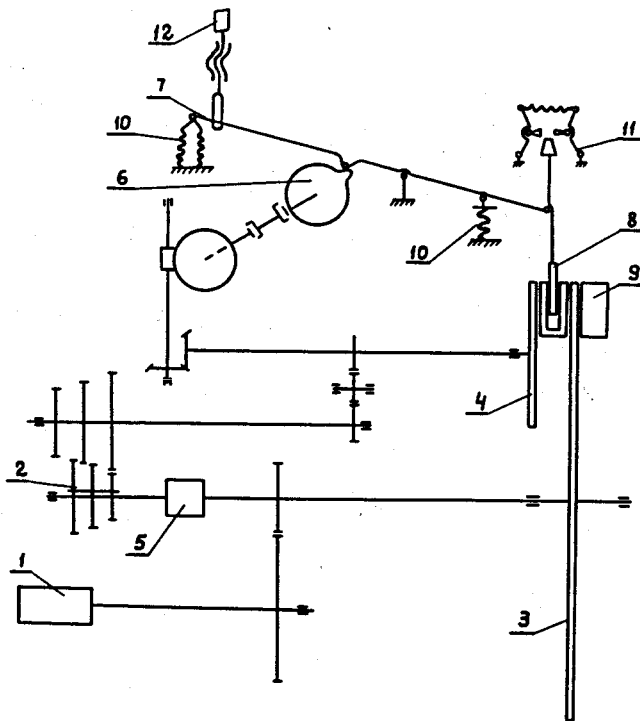


Рис. 3. Кинематическая схема ИБР-30. Пояснения в тексте.

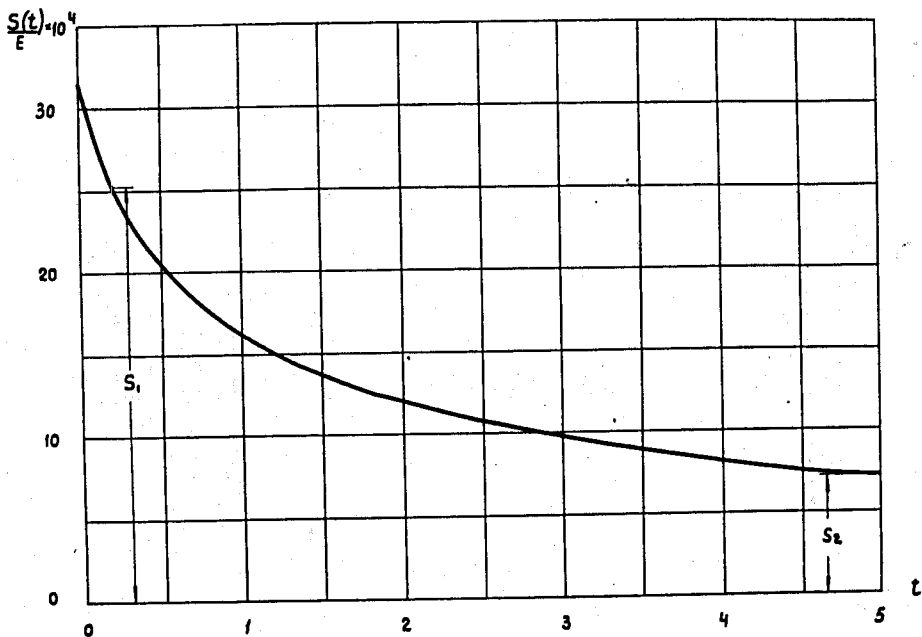


Рис. 4. Зависимость мощности источника запаздывающих нейтронов от времени между импульсами. t - время, сек; $S(t)$ - источник, н/сек; E - энергия импульса, дел; частота следования импульсов - 0,2 гц.

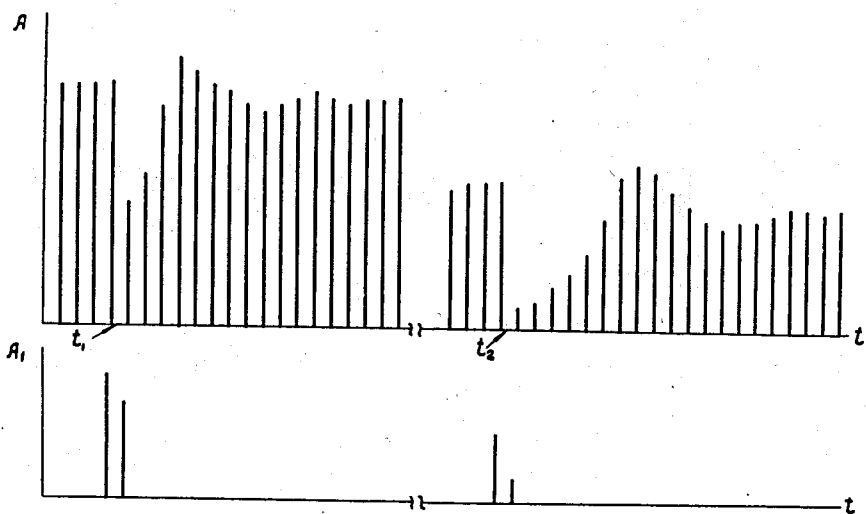


Рис. 5. Изменения амплитуд импульсов мощности ИБРа-30 при снижении реактивности за время между импульсами. A - амплитуда импульса; t - время; t_1 и t_2 - снижение реактивности на $0,73 \cdot 10^{-4}$ и $2,1 \cdot 10^{-4}$; A_1 - амплитуда сателлита, отстающего от импульса на 7 сек. Начальная средняя мощность реактора - 10 квт, частота импульсов - 0,13 гц.

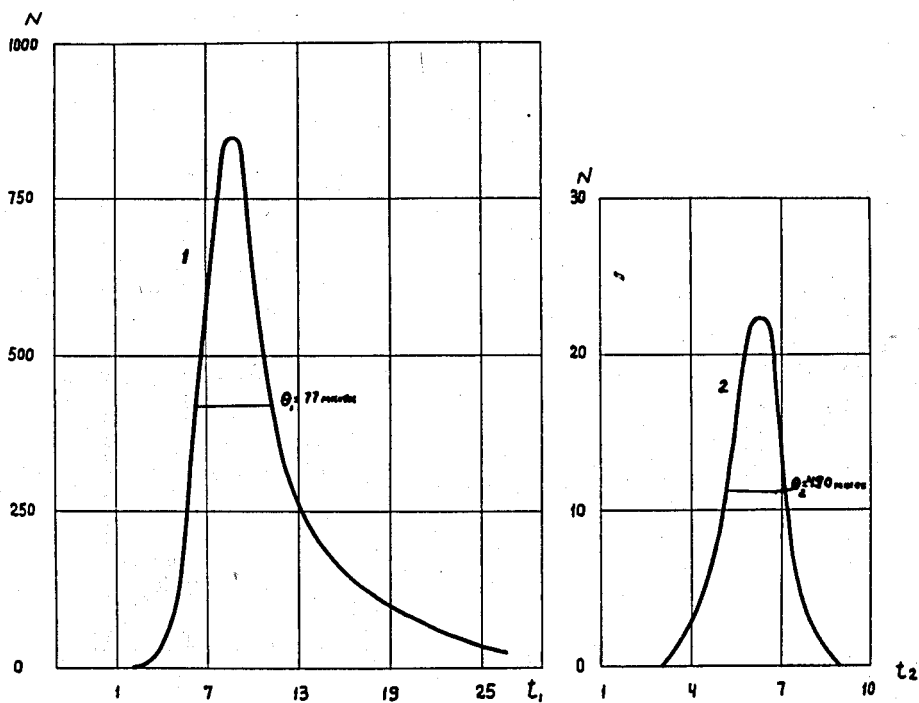


Рис. 6. Импульс мощности (1) и первый спутник промежуточной частоты (2) реактора ИБР. N - счёт в канале анализатора; t_1 и t_2 - номера каналов, ширина - 18 мксек и 256 мксек соответственно. Средняя мощность реактора - 3 квт, частота следования импульсов - 0,2 гц. θ_1 и θ_2 - длительности импульса мощности и спутника на половине высоты.

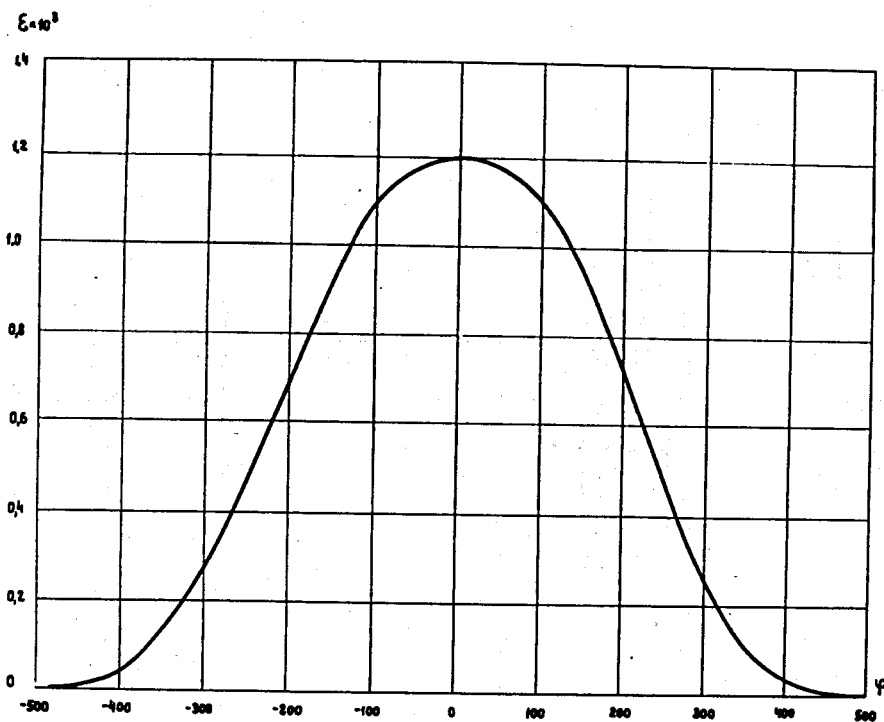


Рис. 7. Зависимость реактивности вольфрамового стержня (подвижного отражателя) от его положения в зоне. Положения стержня пересчитаны в величинах угла поворота диска ВПЗ в соответствии с кинематической схемой. ϵ — реактивность стержня, ϕ — угол поворота диска ВПЗ, град.

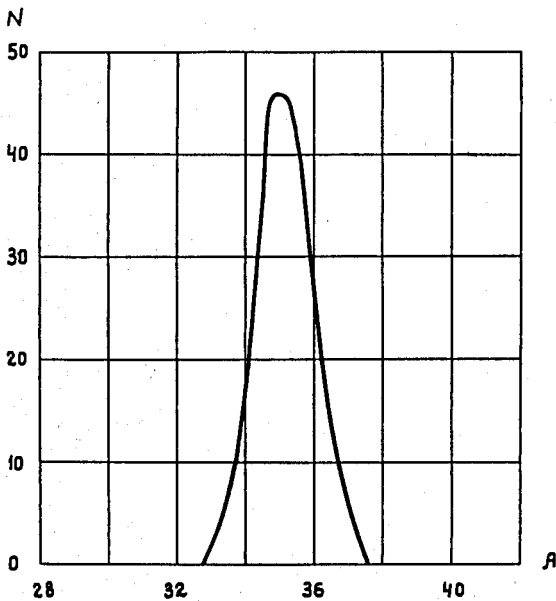


Рис. 8. Флюктуация амплитуд импульсов мощности ИБРа-30. A - амплитуда импульса, N - число импульсов. Средняя мощность реактора - 10 квт, частота следования импульсов - 0,13 гц, работает одна основная подвижная зона.

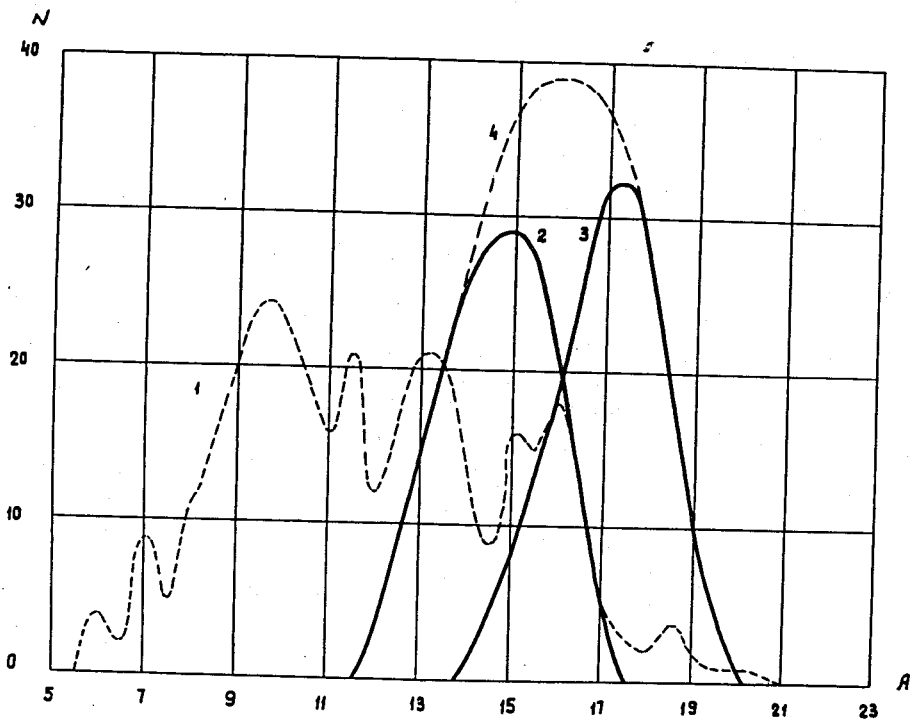


Рис. 9. Распределения амплитуд импульсов мощности ИБРа-30. A - амплитуда импульса, N - число импульсов, 2,3 - распределения амплитуд импульсов мощности, формируемых ОПЗ №1 и №2 соответственно; 4 - суммарное распределение. Средняя мощность реактора - 12 квт, частота следования импульсов - 0,21 гц, ОПЗ №1 и №2 работают поочередно. 1 - распределение амплитуд при нарушении синхронности ОПЗ и ВПЗ; неустойчивая работа реактора.

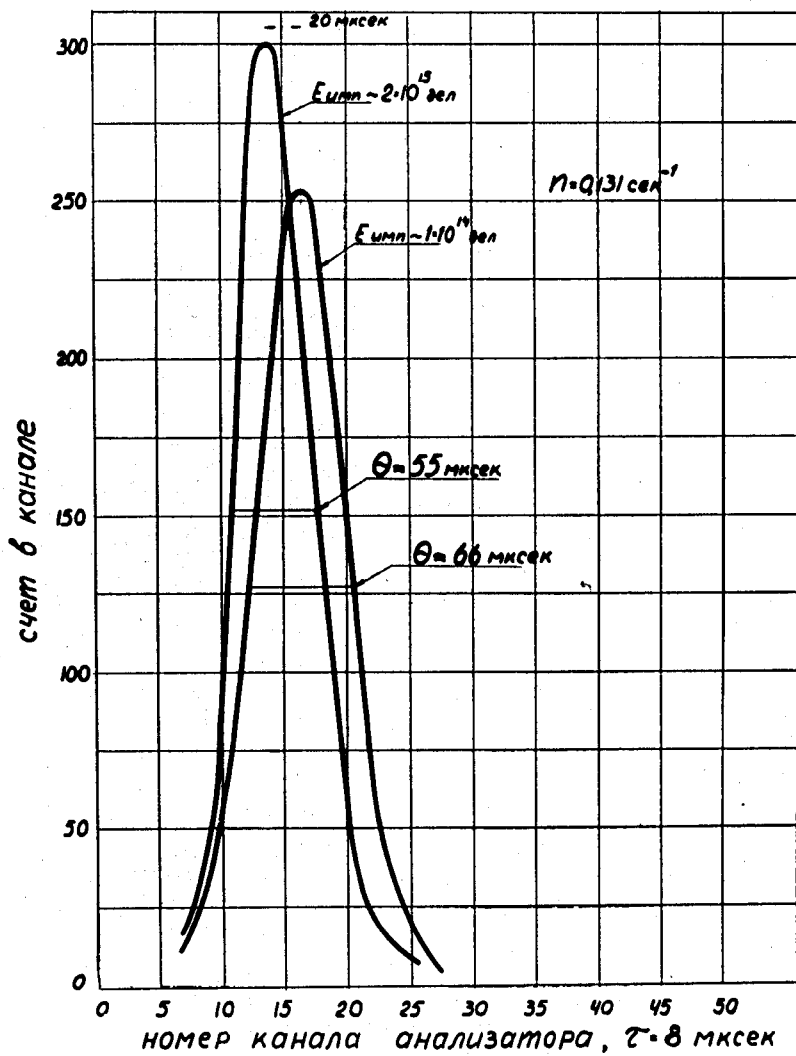


Рис. 10. Формы импульсов мощности ИБРа-30. ν - частота следования импульсов, E - энергия импульса, θ - длительность импульса на половине высоты.