

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР



ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

КИЯИ - 88 - 42

Препринт КИЯИ-88-42

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ
МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕТИКИ ЯДЕРНЫХ
РЕАКТОРОВ

КИЕВ

В.И.Борисенко, А.И.Головач, Ф.А.Гриневич, В.В.Лукьянец,
Н.М.Сидорук

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ
КИНЕТИКИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Важным направлением в обеспечении безопасной работы АЭС является развитие рациональных методов диагностики состояния ядерного реактора. Основным показателем состояния ядерного реактора является реактивность. Определение реактивности является довольно сложной задачей, решаемой обычно с помощью средств аналоговой или цифровой вычислительной техники.

В работе рассмотрены теоретические вопросы, связанные с выбором математической модели, на основе которой строится прибор для определения реактивности - реактиметр. Основное внимание уделено техническим вопросам, связанным с разработкой и созданием аналогового измерителя мгновенной реактивности - АИМР-8-2м. Показана принципиальная возможность использования реактиметра АИМР-8-2М для определения глобальной реактивности ядерного реактора. Получено выражение для переходной функции реактивности в случае одногруппового приближения по запаздывающим нейтронам.

The development of rational methods of nuclear reactor state diagnostics is an important trend in a safety control of NPS operation. The reactivity is the main factor of nuclear reactor state. The reactivity determination is rather a complex problem, solved by analog and digital computer facilities.

In this paper the theoretical questions were discussed, related to mathematic model selection on the basis of which the device for reactivity determination- a reactimeter is made. A basic attention was paid to technical questions, related to the working out and creation of an analog meter of instantaneous reactivity- АИМР -8-2м. The principle possibility of use of this device for determination of nuclear reactor global reactivity is shown. The expression is obtained for reactivity transition function in case of one-group approximation by delayed neutrons.

The theoretical and practical questions on modeling of nuclear reactor kinetics.

АКАДЕМИЯ НАУК УССР

В.И.Борисенко, А.И.Головач, Ф.А.Гриневич,
В.В.Лукьянец, Н.М.Сидорук

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ
КИНЕТИКИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Киев, Институт ядерных исследований, 1988

Ключевые слова:

безопасность реактора, кинетика реактора, реактивность, аппаратура реакторного контроля, усилители, аналоговые вычислительные машины, реакторы типа ВВЭР



В В Е Д Е Н И Е

Ядерный реактор характеризуется разнообразными переходными процессами, постоянно протекающими в его активной зоне. Важное место среди этих процессов занимает круг задач ядерной кинетики реактора. Для изучения переходных режимов, протекающих в ядерном реакторе, в настоящее время широко применяются численные, аналитические и экспериментальные методы. Все большее применение получают численные методы, позволяющие производить исследования с использованием сложных математических моделей, достаточно точно описывающих объект исследования.

При решении обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих модели с сосредоточенными параметрами, удобно пользоваться простыми средствами аналогового моделирования, примером которых являются аналоговые приборы, решающие обращенное уравнение кинетики реактора в реальном масштабе времени — реактиметры. Такие приборы способствуют обеспечению ядерной безопасности при пусках и эксплуатации АЭС, а также при проведении экспериментов, связанных с исследованием динамических характеристик ядерных реакторов, когда необходимо постоянно контролировать основной кинетический параметр реактора — мгновенное значение реактивности.

Однако при экспериментах на современных энергетических реакторах часто возникают вопросы определения погрешностей при вычислении реактивности, обусловленных влиянием пространственных эффектов.

В данной работе рассмотрены математические модели кинетики реактора по пространственной распределенности в следующей классификации:

1. Модель с сосредоточенными параметрами, которые являются функциями только времени.
2. Модель с распределенными параметрами, которые являются функциями времени и пространственных координат.

Также рассмотрены практические вопросы аналогового моделирования и технического конструирования реактиметров.

1. МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ РЕАКТОРА С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Одним из важнейших направлений в обеспечении надежной и безопасной работы современных АЭС является развитие рациональных методов управления и диагностики ядерных реакторов. Важной задачей в этом направлении является оценка физического состояния ядерного реактора. Для оценки нейтронно-физического состояния можно пользоваться либо переменными, либо параметрами состояния, с помощью которых описывается математическая модель кинетики реактора.

К переменным состояниям ядерного реактора можно отнести: плотность нейтронов или плотность потока нейтронов; концентрацию ядер-предшественников запаздывающих нейтронов C .

К параметрам состояния можно отнести: эффективный коэффициент размножения $k_{эф}$; макроскопические сечения деления Σ_f , поглощения Σ_a , рассеяния и некоторые другие; среднее число всех образующихся нейтронов на одно деление ν ; эффективную долю запаздывающих нейтронов β , а также реактивность ρ , определяемую как отклонение эффективного коэффициента размножения нейтронов $k_{эф}$ от единицы, отнесенное к $k_{эф}$

$$\rho = \frac{k_{эф} - 1}{k_{эф}} \quad (I.I.)$$

Без преувеличения можно утверждать, что важнейшим показателем состояния ядерного реактора является реактивность. Именно реактивность входит в уравнения кинетики нейтронов ядерного реактора и определяет скорость изменения интенсивности делений

в зависимости от знака и абсолютной величины значения реактивности. Реактивностью особенно удобно пользоваться для анализа нестационарных процессов, так как при отклонении от критического состояния относительное изменение реактивности ρ значительно больше, чем изменение эффективного коэффициента размножения $k_{эф}$.

Реактивность зависит от многих физических величин, характеризующих состояние реактора, таких, как его размеры, изотопный состав топлива, нейтронные сечения, температура материалов активной зоны и многие другие, а также связана с предисторией работы реактора. Все это не позволяет просто выделить разные составляющие, дающие вклад в суммарную реактивность. По этой причине в период физического пуска и физэкспериментов проводятся измерения коэффициентов реактивности по температуре теплоносителя, топлива, по давлению теплоносителя, которые при работе реактора на мощности позволяют оценить вклад отдельно каждого из эффектов в суммарную реактивность.

Система уравнений кинетики реактора может быть получена, например, из рассмотрения процессов нестационарной диффузии нейтронов в реакторе [1]; она имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{\ell} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i + S \\ \frac{dC_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{\ell} n - \lambda_i C_i \end{aligned} \right\} \quad (1.2.)$$

где все обозначения общеприняты.

При получении системы уравнений кинетики реактора (1.2.) были приняты некоторые допущения и предположения. В частности, рассматривается одnogрупповая по спектру нейтронов модель; считается, что справедливо точечное приближение, т.е. все макропараметры берутся усредненными по всему объему реактора. Также считается, что функции потока нейтронов и концентрации предшественников запаздывающих нейтронов допускают разделение переменных по пространственным координатам и времени. Причем отношение пространственной функции потока к пространственной функции концентрации предшественников запаздывающих нейтронов есть постоянное число, которое для простоты конечного выражения принято равным единице. Дополнительно требуется выполнение условий независимости от координат отношений для анализа нестационарного пото-

ка (пространственной его составляющей) к самому нейтронному потоку и эффективного внешнего источника нейтронов к пространственной функции нейтронного потока.

Главный недостаток точечного приближения в уравнениях кинетики реактора состоит в том, что оно малопригодно для описания динамических эффектов, появляющихся при изменении пространственно-энергетического распределения нейтронного потока во время нестационарных процессов. Проявление этих эффектов определяется конечной скоростью распространения по объему активной зоны реактора локальных возмущений нейтронного потока. В целом эти эффекты называются пространственными и играют чрезвычайно важную роль в больших энергетических реакторах. К тому же при больших отклонениях от точно критического состояния применение точечной модели становится неоправданной даже для "малых" реакторов.

Физическая природа пространственной неустойчивости для водородных реакторов характеризуется особенностью уран-водной размножающей решетки - малой длиной миграции нейтронов. В сочетании с большим запасом реактивности для активных зон эта особенность определяет "локальные критичности" или "местные котлы" [2]. Каждый такой критический объем топлива в активной зоне пространственно обособлен и требует рассмотрения условий, которые будут обеспечивать устойчивость данного критического объема. В частности, необходимо равномерное размещение органов и средств компенсации реактивности. При этом необходимо также учитывать сильную зависимость распределения нейтронного поля в реакторе от перемещения "крупного" органа компенсации реактивности в зоне с максимальным нейтронно-статистическим весом. По этой причине в больших реакторах ВВЭР произведен переход в системе органов регулирования с "нейтронной ловушки" для реакторов ВВЭР-440 к кластерной системе регулирования для реакторов ВВЭР-1000.

Пространственные изменения в распределении нейтронного потока в активной зоне реактора возникают и при возмущении его структуры, например, перемещение стержней регулирования, изменение средней температуры теплоносителя и т.д. Изучению данного вопроса посвящено большое количество исследований на различных реакторах [3,4,5,6].

Наибольшее влияние пространственные эффекты оказывают на измерение эффективности органов регулирования и эффектов реактив-

ности. Это связано с тем, что значение вычисленной мгновенной реактивности существенно зависит от места расположения детектора нейтронов, подключенного к реактиметру. Поэтому возникает важная задача в определении связи между значением реактивности, вычисленной на основе показаний определенного детектора, с глобальной реактивностью реактора.

Проведенные исследования [5,6] показывают, что при определенных режимах работы ядерной энергетической установки в ее активной зоне могут быть определены места, которые в наименьшей степени подвержены пространственным изменениям. При расположении в этих местах детекторов нейтронов возможна регистрация реактивности с минимальной систематической погрешностью.

В больших энергетических реакторах пространственная устойчивость должна быть отнесена к важным показателям безопасности. Рациональным способом контроля за сохранением этого динамического показателя в допустимых пределах является пространственно-распределенный контроль мгновенной реактивности.

Решая систему уравнений кинетики реактора (1.2) относительно реактивности ρ , получим обращенное (инверсное) уравнение кинетики нейтронов в ядерном реакторе:

$$\rho = \frac{l}{\bar{n}} \left(\frac{dn}{dt} + \sum_{i=1}^6 \frac{dc_i}{dt} - S \right) \quad (1.3)$$

или в долях β

$$\frac{\rho}{\beta} = \frac{\tau}{\bar{n}} \left(\frac{dn}{dt} + \sum_{i=1}^6 \frac{dc_i}{dt} - S \right), \quad (1.4)$$

где $\tau = l/\beta$.

Для реакторов ВВЭР-1000 величина τ изменяется от 4,2 мс в случае свежей загрузки, до 5,3 мс в конце кампании. Обращенное уравнение кинетики нейтронов (1.4) непосредственно решается с помощью цифрового или аналогового моделирования.

II. АНАЛОГОВЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ РЕАКТИВНОСТИ

В ИЯИ АН УССР разработан и изготовлен широкодиапазонный реактиметр, в основе работы которого лежит аналоговое моделирование обращенного уравнения кинетики точечной модели реактора (I.4.), что определяет его простоту и надежность в эксплуатации. Реактиметр имеет импульсный канал измерения нейтронного потока, расширяющий диапазон его работы по входному сигналу до 10 декад, начиная с плотности потока нейтронов в месте установки детектора $0,3 \text{ н/см}^2\text{с}$. Прибор снабжен ячейками контроля превышения уровней мощности и реактивности, что дает возможность использовать его в системах управления и защиты ЯЭУ.

Реактиметры, построенные на основе моделирования уравнения (II.3.) принято называть реактиметрами с работой по "разомкнутому" циклу. Блок-схема такого прибора представлена на рис. II.I.

Ток ионизационной камеры I поступает на входной усилитель 2, преобразовывается в напряжение U_n , пропорциональное плотности нейтронов в месте установки детектора, которое далее подается на вход блока 3, моделирующего запаздывающие и мгновенные нейтроны, а также на делительное устройство 5. Решающий усилитель 4 совместно с блоком моделирования нейтронов 3 формирует сигнал напряжения, пропорциональный сумме

$$l \frac{dn}{dt} + l \sum_{i=1}^6 \frac{dc_i}{dt} - lS,$$

который подается в качестве делимого на делительное устройство 5. С выхода последнего снимается сигнал, пропорциональный реактивности в долях β , выведенный на индикатор 6 [7].

II.I. Широкодиапазонный импульсно-токовый измеритель реактивности АИМР-8-2м

Функциональная схема реактиметра представлена на рис. II.2. На входе используется восьмидекадный преобразователь ток-напряжение Y_1 с двумя независимыми выходными каналами, каждый из которых имеет рабочий динамический диапазон по входному сигналу 4,5 порядка. К выходам усилителя постоянно подключены идентичные

6

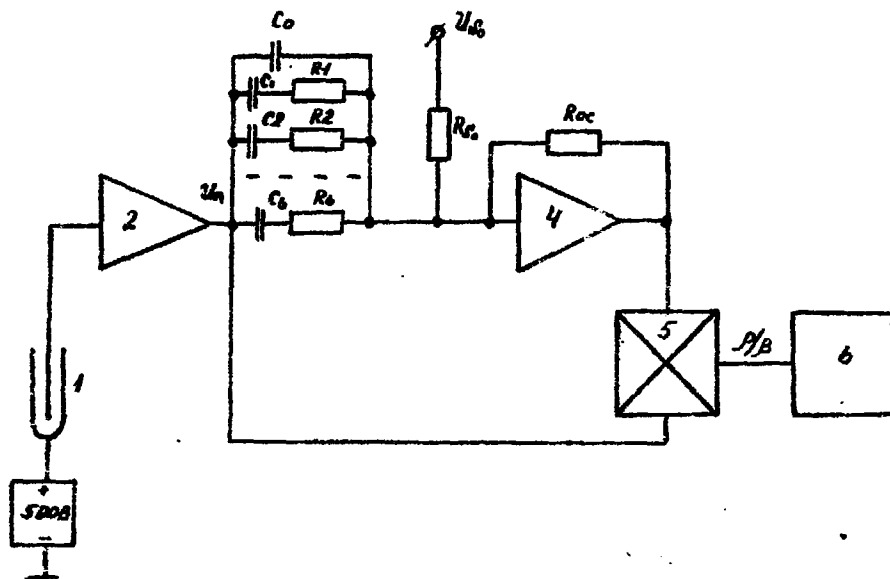


Рис. 2.1. Блок-схема реактиметра, работающего по разомкнутому циклу

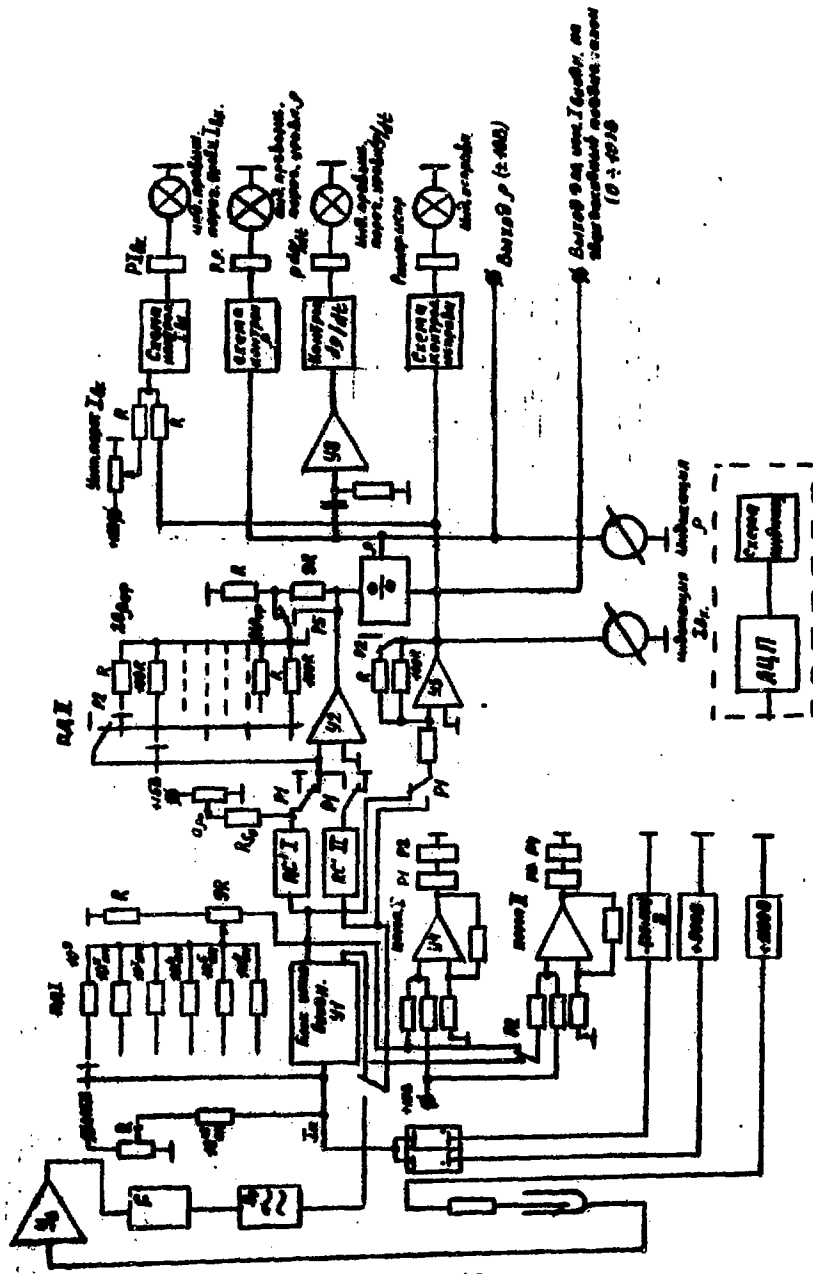


Рис. 2.2. Функциональная схема реактиметра АИМР-8-2м

независимые имитаторы кинетики реактора на пассивных последовательных RC -цепях, работающие непрерывно в указанных диапазонах изменения выходных напряжений усилителя. Выходные сигналы блоков имитации в зависимости от величины входного тока поочередно подключаются ко входу решающего усилителя Y_4 или закорачиваются на "земляную шину". Далее следует делительное устройство, использующее в качестве делителя выходной сигнал решающего усилителя Y_4 , а в качестве делителя - выходной сигнал входного усилителя Y_1 (через масштабный усилитель Y_3).

Непрерывная работа реактиметра в диапазоне 4,5 декад каждого из каналов обеспечивается разбиением его на два поддиапазона величиной в 2,5 и 2 декады и изменением коэффициента усиления Y_2 и Y_3 на два порядка в зависимости от поддиапазона, чтобы обеспечить величины и диапазон входных сигналов делительного устройства в соответствии с его техническими характеристиками.

Переключение каналов входного усилителя и коэффициентов усиления Y_4 и Y_3 осуществляется при помощи компараторов Y_4 и Y_5 , соответственно. В приборе предусмотрена возможность сдвига динамического диапазона входного усилителя при помощи изменения сопротивлений в цепи обратной связи. Это дает возможность при измерении больших отрицательных реактивностей выбрать начальный ток на пределе верхнего значения шкалы усилителя. Для расширения динамического диапазона реактиметра создан импульсный канал измерения мощности реактора со счетчиком тепловых нейтронов СММ-18 в качестве детектора. Начальная плотность потока нейтронов $\leq 0,3$ н/см²с. Использование нейтронного счетчика потребовало создания дополнительных устройств: импульсного предусилителя, нечувствительного к емкости кабеля Y_6 , дискриминатора-формирователя F и усреднителя Y_7 [10].

В реактиметре имеются схемы контроля и сигнализации превышения установленных величин входного тока и реактивности для предупреждающей сигнализации и аварийной защиты, схема автоматического переключения шкалы на -20β при превышении шкалы любого меньшего поддиапазона отрицательной реактивности и схема контроля исправности основных узлов реактиметра, а также блоки стабилизированного питания и компенсации γ -фона ионизационной камеры и счетчика нейтронов. На базе дифференцирующего усилителя Y_8 и пороговых схем собран узел контроля и сигнализации превышения допустимой скорости ввода реактивности ($7 \cdot 10^{-2} \beta / c$).

Индикация величины входного тока, реактивности и скорости ввода реактивности осуществляется при помощи цифрового дисплея или стрелочных приборов.

II.2. Входной усилитель

Входной усилитель Y_1 собран на основе серийных операционных усилителей типа К816 УД2В и К140 УД5 с транзисторными расширителями выходного напряжения. Принципиальная схема усилителя представлена на рис. II.3. Микросхема К816 УД2В имеет защиту по входу от пробоя высоким напряжением при помощи ограничительного сопротивления и микросхемы К1 НТ591, включенной по диодной схеме параллельно со входом.

Усилители типа К816 УД2В отбирались по величине температурного дрейфа, которая не должна превышать 10 мкВ/°С.

Входной усилитель реактиметра позволяет измерить ток ионизационной камеры от 10^{-12} А до 10^{-3} А и работать непрерывно при изменении входного сигнала в диапазоне 4,8 декад по каждому входу. При этом напряжение на каждом выходе может изменяться с незначительными погрешностями за счет дрейфов "нуля" от 1 мВ до 60 В. Для повышения точности измерения при малых величинах выходного напряжения принимает рабочий диапазон для каждого выхода равным $\sim 4,5$ декадам с изменением напряжения на выходе усилителя от 2 мВ до 60 В. Такой рабочий диапазон выходных сигналов позволяет охватить 8 декад изменения входного тока с перекрытием каналов входного усилителя на одну декаду.

II.3. Блок имитации кинетики реактора

Для имитации кинетики реактора выбраны пассивные RC-цепи, расчет номиналов которых приводится ниже.

В уравнении (I.3.) сделаем подстановку

$$M_i = \frac{dc_i}{dt}, \quad c_i = \int_0^t \mu_i dt$$

и разделим на

$$\beta, \text{ после чего получим} \\ \rho = \frac{1}{n} \left(\frac{\beta}{\beta} \frac{dn}{dt} + \frac{\beta}{\beta} \sum_{i=1}^n M_i - \frac{\beta}{\beta} S_0 \right) \quad (II.I.)$$

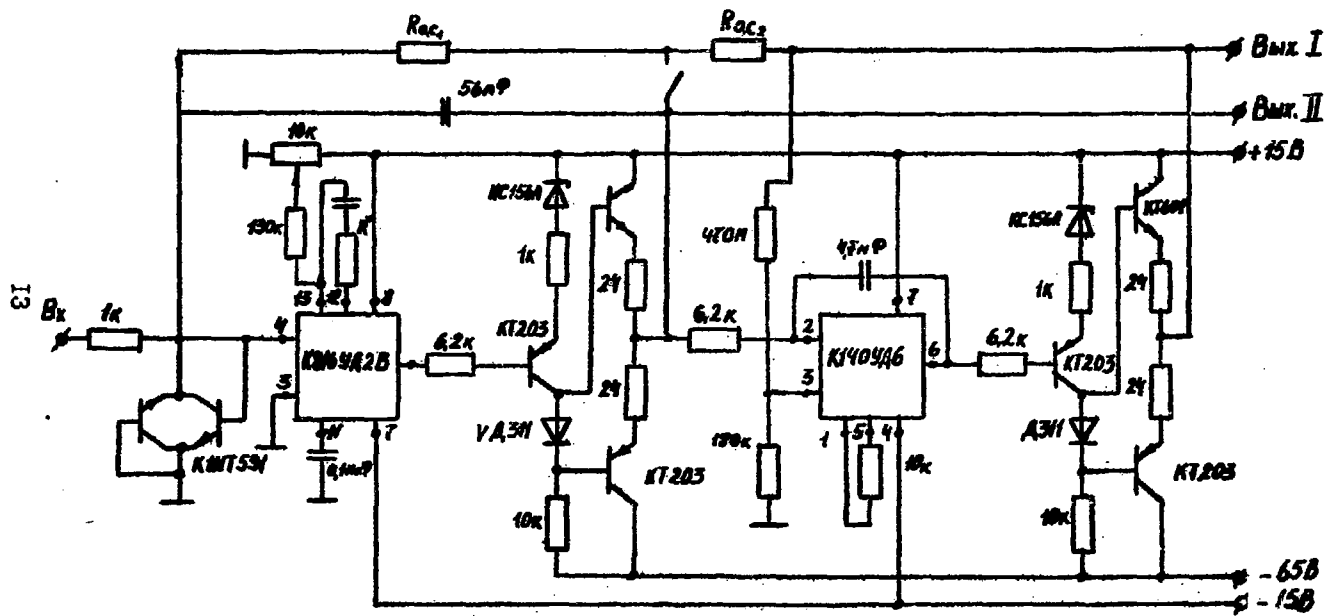


Рис. 2.3. Принципиальная схема входного усилителя

$$n = \frac{\ell}{\beta} \sum \frac{1}{a_i} M_i + \frac{\ell}{\beta} \sum \frac{1}{a_i} \lambda_i \int_0^t M_i dt, \quad (\text{II.2.})$$

где a_i - относительный выход i -ой группы запаздывающих нейтронов.

В соответствии с блок-схемой реактиметра уравнения инверсной модели кинетики реактора в напряжениях и токах запишутся как

$$U_p = \frac{R_{oc} \sum \gamma_i K_0}{U_n} \left(C_0' \frac{dU_n}{dt} + \sum_{i=1}^6 i_i - \frac{U_{so}}{R_{so}} \right) \quad (\text{II.3.})$$

$$U_n = R_i i_i + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t i_i dt \quad (\text{II.4.})$$

Выпишем масштабные множители для соответствующих величин, входящих в уравнения (II.1, II.2, II.3, II.4).

$$M_p = \frac{U_p}{P}, \quad M_n = \frac{U_n}{n}, \quad M_{M_i} = \frac{i_i}{M_i}, \quad M_{S_0} = \frac{U_{S_0}}{S_0}.$$

Произведем подстановку масштабов в уравнения (II.1) и (II.2):

$$U_p = M_p \frac{M_n}{U_n} \left(\frac{\ell}{\beta} \frac{1}{M_n} \frac{dU_n}{dt} + \frac{\ell}{\beta} \frac{1}{M_{M_i}} \sum_{i=1}^6 i_i - \frac{\ell}{\beta} \frac{U_{S_0}}{M_{S_0}} \right) \quad (\text{II.5.})$$

$$U_n = \frac{i_i}{\beta} \frac{\ell}{M_{M_i}} \frac{M_n}{a_i} + \frac{\ell}{\beta} \frac{M_n}{a_i} \frac{1}{M_{M_i}} \int_0^t i_i dt. \quad (\text{II.6.})$$

Приравняв соответствующие члены уравнений (II.3, II.4, II.5, II.6), и произведя преобразования, получим:

$$\frac{R_{oc} \sum \gamma_i K_0}{R_i} = M_p a_i \quad (\text{II.7.})$$

$$R_i C_i' = \lambda_i^{-1} \quad (\text{II.8.})$$

$$\frac{\ell}{\beta} = C_0' R_i a_i = C_0' \sum_{i=1}^6 \frac{1}{\beta_i}. \quad (\text{II.9.})$$

Для расчета номиналов пассивных элементов задаемся условиями: - максимальным выходным напряжением используемых усилителей и делительного устройства;

- коэффициентом передачи делительного устройства $K_d = 10$;

- масштабным коэффициентом для шкалы измеряемой реактивности

$10\beta - M_p = 1,0$, для шкалы $1\beta - M_p = 10$ и т.д.;

- величиной ёмкости или сопротивления для любой из групп запаздывающих нейтронов, например, $C_2' = 7,8$ мкФ.

Тогда по известным кинетическим параметрам реактора a_i и λ_i для ^{235}U при делении тепловыми нейтронами [8] определим R_i из уравнения (II.8) как $R_i = (\lambda_i C_i')^{-1}$, а из уравнения (II.7) получим $R_{oc} \Sigma_{yc} = \frac{Mpa_2}{K_0}$

для выбранных шкал измеряемой реактивности, после чего можно определить все значения R_i и C_i' .

Каждая шкала измеряемой реактивности будет иметь своё значение $R_{oc} \Sigma_{yc}$ с индексом $(0,01\beta + 20\beta)$, обозначающим величину шкалы реактивности в долях β .

Величины сопротивлений и ёмкостей для моделирования запаздывающих нейтронов в соответствии с заданными уровнями представлены ниже:

$C_1' = 2,89$ мкФ	$R_1 = 27,9$ МОм
$C_2' = 7,80$ мкФ	$R_2 = 4,2$ МОм
$C_3' = 1,94$ мкФ	$R_3 = 4,7$ МОм
$C_4' = 1,42$ мкФ	$R_4 = 2,33$ МОм
$C_5' = 0,11$ мкФ	$R_5 = 8,0$ МОм
$C_6' = 0,015$ мкФ	$R_6 = 21,9$ МОм

Величины сопротивлений обратной связи решающего усилителя Y_2 для соответствующих шкал реактивности будут иметь следующие значения:

$R_{oc}(20\beta) = 6,713$ кОм	$R_{oc}(0,2\beta) = 671,3$ кОм
$R_{oc}(10\beta) = 13,426$ кОм	$R_{oc}(0,1\beta) = 1,3426$ МОм
$R_{oc}(5\beta) = 26,852$ кОм	$R_{oc}(0,05\beta) = 2,6852$ МОм
$R_{oc}(2\beta) = 67,13$ кОм	$R_{oc}(0,02\beta) = 6,7130$ МОм
$R_{oc}(1\beta) = 134,52$ кОм	$R_{oc}(0,01\beta) = 13,426$ МОм
$R_{oc}(0,5\beta) = 268,52$ кОм	

В блоке используются резисторы МРХ-0,25 и плёночные конденсаторы К71-4.

II.4. Решающий усилитель

В качестве решающего усилителя в соответствии с указанными выше величинами $R_{oc} \Sigma_{yc}$ используется схема на основе ИМС К544 УД1А и К140 УД6. Принципиальная схема решающего усилителя представлена на рис. II.4. Особенностью решающего усилителя является то, что он составлен из двух каскадов, первый из которых обеспечивает измерения на фиксированной шкале $0,5 \beta$, что необходимо для организации защиты по реактивности в цепях СУЗ, второй позволяет проводить измерения в каком-либо из имеющихся диапазонов реактивности ($0,01 \beta + 10 \beta$).

II.5. Делительное устройство

Делительное устройство должно обеспечивать работу в области ~ 4 декад изменения входного сигнала по Y , а по X не менее ~ 6 декад. Для перекрытия такого диапазона изменения входных сигналов можно создать делительное устройство, основанное на измерении отношения токов путем их логарифмирования. Но, к сожалению, логарифмические устройства обладают довольно сильной чувствительностью к изменениям температуры окружающей среды. Эту чувствительность можно компенсировать, но это требует значительного усложнения схемы. Однако при этом трудно добиться общей погрешности на уровне 1 % даже в ограниченном интервале температур [9].

Делительные устройства, основанные на широтно-импульсной и амплитудной модуляции входных сигналов при изменении Y в области $\sim 2,8$ декад от 0,02 В до 12,5 В обеспечивают точность не хуже 0,5 %, просты по устройству и обладают высокой надежностью [10].

Принципиальная схема делительного устройства представлена на рис. II.5.

Деление осуществляется на операционном усилителе К153 УД2, в цепи обратной связи которого включен множител. В состав множителя входят: широтно-импульсный модулятор, масштабный и инвертирующий усилители, транзисторный переключатель и двухзвенный фильтр. Основным элементом множительно-делительного устройства является ИИМ. В схеме множителя используется автоколебательный ИИМ с минимальной величиной гистерезиса, построенный на микросхеме К153 УД2. Устранение гистерезиса в ИИМ данного типа исключает существенную нели-

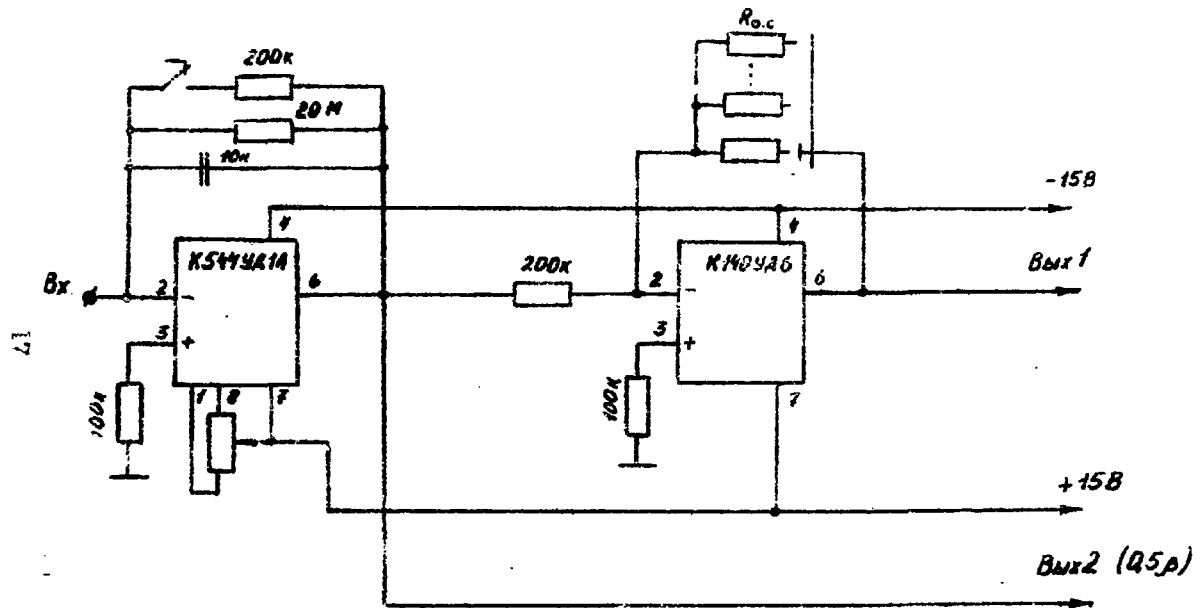


Рис. 2.4. Принципиальная схема решающего усилителя

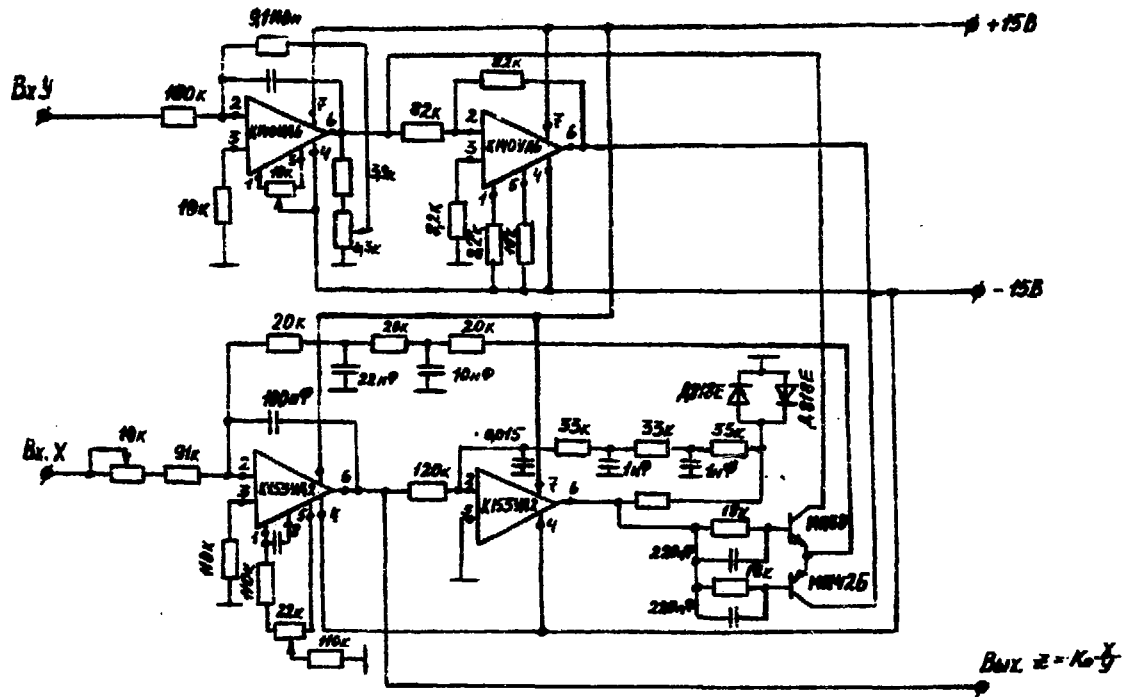


Рис. 2.5. Принципиальная схема делительного устройства

нейность и уменьшает диапазон изменения рабочей частоты в зависимости от величины входного сигнала. Реализация безгистерезисного ШИМа невозможна. Однако в этом нет необходимости, поскольку малая величина гистерезиса на рабочие характеристики влияет незначительно, но наличие гистерезиса способствует уменьшению длительности фронтов выходных импульсов модулятора [10]. В реальной схеме, представленной на рис. II.5, для повышения линейности одна из трех емкостей фильтра в цепи обратной связи выбрана значительно больше других. Для уменьшения влияния этой емкости на временные характеристики модулятора она включена на входе усилителя. Температурный и временной дрейф модулятора осуществляется соответствующими характеристиками усилителя и ограничительных стабилитронов и зависит от величины входного сопротивления и суммарного сопротивления обратной связи. При входном сопротивлении 120 кОм и трех сопротивлениях обратной связи по 33 кОм и $C_1 = C_2 = 1000$ пФ, $C_3 = 0,015$ мкФ погрешность преобразования не превышает 0,1%. Минимальное и максимальное отношение ширины импульсов $K = 0,002 + 0,998$. Максимальная рабочая частота равна 8 МГц, длительность фронтов выходного напряжения не превышает 0,1 мкс. Перекидной ключ выполнен на двух германиевых транзисторах разной проводимости типа МП 42Б и МП 38. Малая длительность фронтов управляющего напряжения обеспечивает пренебрежимую ошибку за счет переходных процессов ключа и не требует применения для ключа МОП транзисторов.

II.6. Компаратор

Компаратор построен по одноходовой регенеративной схеме на операционном усилителе типа К553 УД1А. Принципиальная схема компаратора представлена на рис. II.6.

В связи с тем, что предусматривается производить сравнение сигналов, величина каждого из которых превышает допустимую величину дифференциального входного напряжения, на входе усилителя включены встречно-параллельно два стабилизирующих диода ДВ11. В схеме для обеспечения стабильной работы при шумах входных сигналов предусмотрен гистерезис, величина которого определяется как

$$U_{н.г.} = \frac{(U_{\text{дв}1}^+ - U_{\text{дв}2}^-)(R_1 + R_2)}{R_1}$$

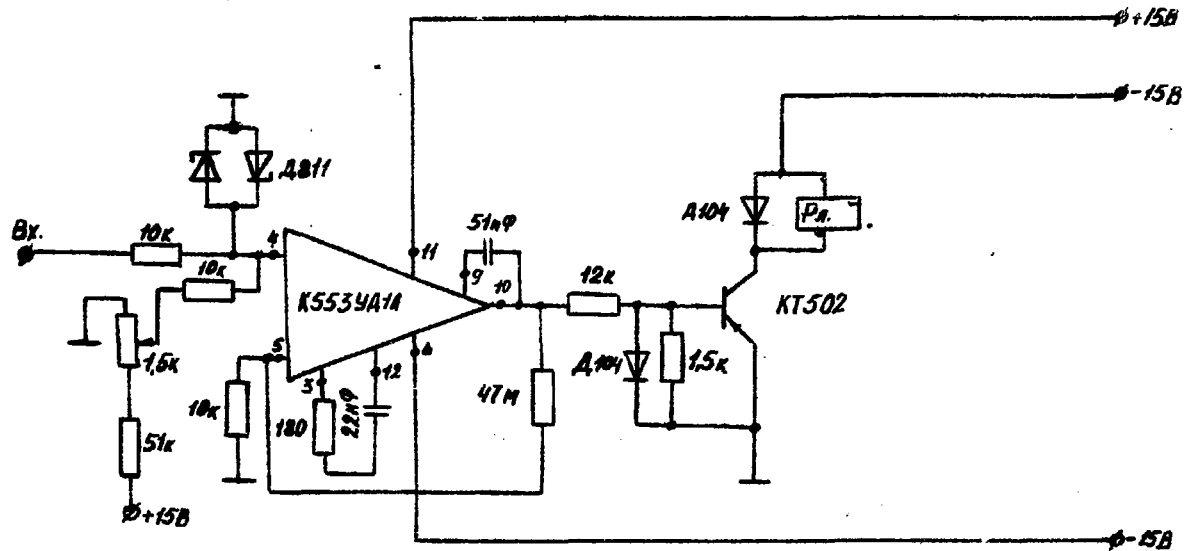


Рис. 2.6. Принципиальная схема компаратора

II.7. Источники напряжения питания ИК

Высоковольтный стабилизатор напряжения рис. II.7. обеспечивает получение высокого напряжения на выходе без использования первичного источника высокого напряжения, высоковольтных транзисторов или стабилизирующих диодов. Он представляет собой повышающий преобразователь постоянного напряжения 25 ± 30 В в постоянное напряжение 500 В и состоит из низковольтного стабилизатора напряжения, генератора напряжения приблизительно прямоугольной формы с повышающим трансформатором, выпрямителя с удвоением напряжения и сглаживающего фильтра.

В качестве стабилизирующего усилителя в низковольтном источнике напряжения используется микросхема К140 УД7. Прходной регулирующий составной транзистор выполнен на основе малосигнального транзистора КТ 601А и мощного КТ 903Б. Опорное напряжение снимается со стабилитрона Д808, нагруженного током 8 мА.

Генератор на транзисторах МП 26Б, включенного по схеме с ОЭ, работает по принципу двухтактного генератора с трансформаторной обратной связью [12]. Элементы схемы подобраны таким образом, что в случае замыкания выхода накоротко генерация прекращается и обеспечивается защита от короткого замыкания.

Частота генерации прямоугольных колебаний напряжения равна 4 кГц, что позволяет осуществить фильтрацию выходного напряжения при помощи малогабаритных конденсаторов. Коэффициент стабилизации выходного напряжения $K_{ст} = 10^{-4}$, уровень пульсаций не превышает 10 мВ. Источник питания ИК отличается наличием узла контроля напряжения, представляющего собой компаратор напряжения, срабатывающий при уменьшении выходного напряжения ниже 450 В.

II.8. Импульсный канал контроля нейтронного потока

Импульсный предусилитель представляет собой выносной зарядочувствительный усилитель с гальванической связью с детектором (рис. II.8.), что обеспечивает компенсацию емкости кабеля и приемлемо низкий уровень входного шума. Зарядочувствительный усилитель построен на базе серийной ИМС К574 УД1 со следующими параметрами: скорость нарастания выходного напряжения 90 В/микс;

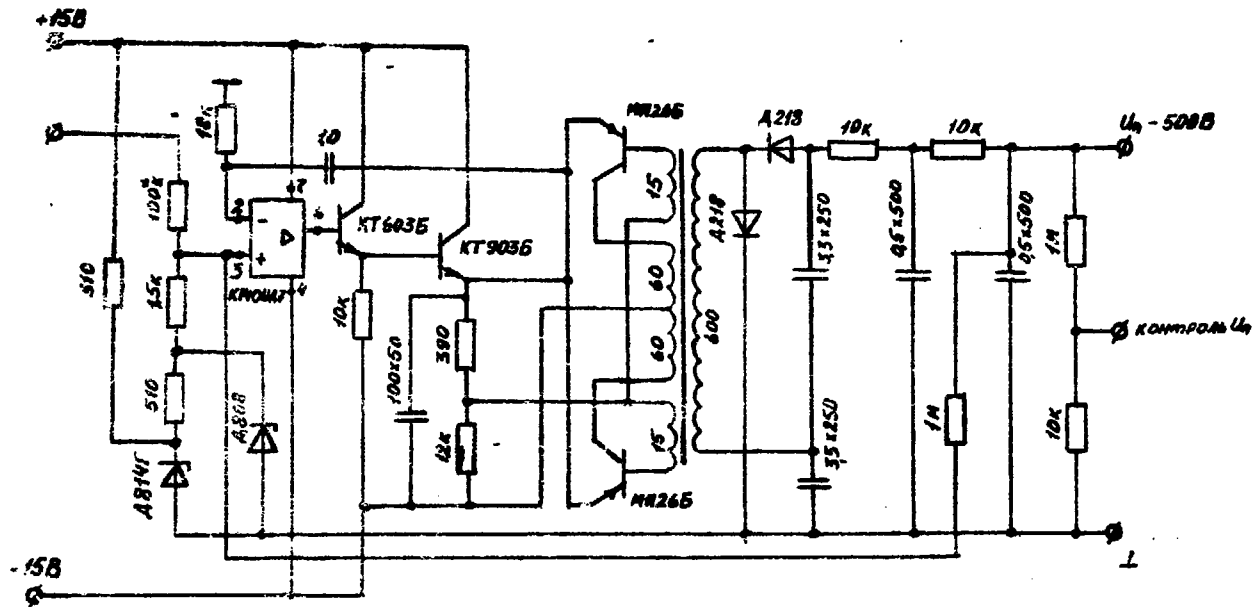


Рис. 2.7. Принципиальная схема стабилизированного источника напряжения компенсации

γ - фона

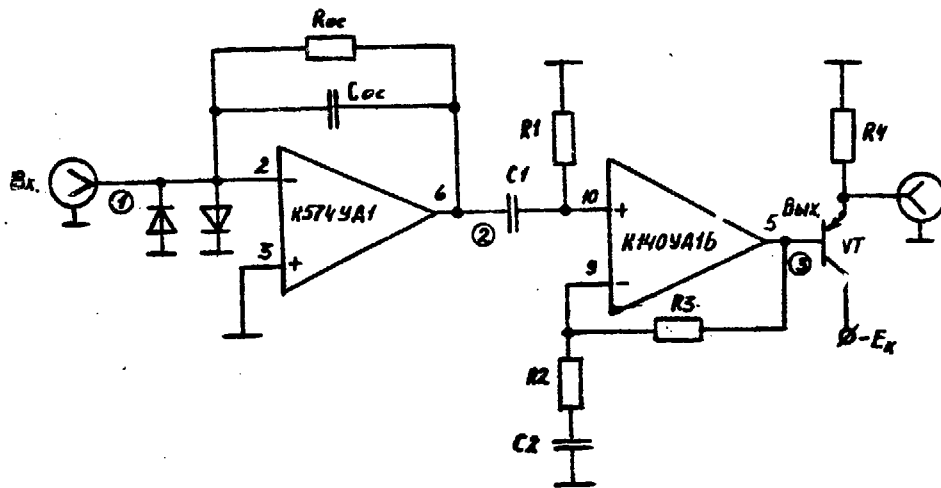


Рис. 2.8. Схема входного импульсного усилителя

входное сопротивление не менее 10^9 Ом;
коэффициент усиления с разомкнутой обратной связью $1,5 \cdot 10^5$.

Импульсный канал рассчитывается на максимальную скорость счета 10^4 -имп/с, при этом токовый канал реактиметра должен находиться в начале первого поддиапазона. Расчет показывает, что емкость, компенсируемая ЗУ, составляет 2200 пФ, что дает для кабеля РК-50 длину около 40 м.

Дифференцирующий усилитель включен после ЗУ и предназначен для выделения и усиления импульсов, а также для компенсации затухания сигнала в кабеле, соединяющем входной усилитель и дискриминатор-формирователь. Он собран на основе серийного операционного усилителя К140 УД1В и дифференцирующей цепочки C_1, R_1 . Так как постоянная выхода уровня ЗУ изменяется в пределах $0 + 10$ В, то C_1 выполняет также функции разделительного конденсатора. При этом входная секция действует как дифференцирующая цепь с постоянной времени $\tau = C_1 R_1$.

По постоянному току усилитель схвачен 100%-ной обратной связью. Импульсы, продифференцированные и усиленные в 10 раз, подаются на эмиттерный повторитель, собранный на транзисторе КТ 361А. Он предназначен для согласования выходного сопротивления дифференцирующего усилителя с сопротивлением кабеля. Использование в качестве линии связи между входным усилителем и дискриминатором-формирователем согласованного кабеля (нагруженного на волновое сопротивление) позволяет повысить помехоустойчивость канала.

II.9. Дискриминатор-формирователь.

Выходной канал предусилителя включает импульсы за счет регистрации счетчиком СМН-1В нейтронов и γ -излучения, а также шум аппаратуры и помехи. Дискриминатор-формирователь предназначен для выделения импульсов регистрации нейтронов и их нормирование по амплитуде и длительности. Он выполнен на серийном компараторе К521 СА2 и транзисторах КТ 312В и КТ 315А. Схема дискриминатора-формирователя представлена на рис. II.9.

Длительность импульса формирователя для исключения просчетов необходимо уменьшать, а для надежной работы усреднителя катодельно увеличивать. Исходя из того, что разрешающая способность входного импульсного усилителя составляет 3 мкс, то для исключения просчетов

за счет формирователя, длительность импульсов формирователя выбрана 2 мкс, восстановление 0,5 мкс.

Далее импульсы ограничиваются до амплитуды 15 В. С коллектора транзистора VT3 снимаются импульсы одинаковой амплитуды и длительности. Фиксация амплитуды на уровне питания достигается тем, что транзисторы VT2, VT3 работают в ключевом режиме.

Эмиттерный повторитель собран на транзисторе VT4. Он необходим для получения низкоомного выхода формирователя. Это обстоятельство делает независимой работу усреднителя при подключении к формирователю пересчетных устройств.

II.10. Усреднитель

Усреднитель предназначен для получения аналогового сигнала, пропорционального частоте следования импульсов с датчика нейтронного потока. Схема усреднителя представлена на рис. II.10. Он выполнен на базе серийного операционного усилителя К140 УД6. На усреднитель подаются импульсы, сформированные по длительности и амплитуде с дискриминатора-формирователя. Усреднитель работает по принципу интегратора. В соответствии с функциональной схемой реактиметра, учитывающей использование импульсного канала рис. II.2., выходной сигнал усреднителя должен находиться в пределах 6+600 мВ.

II.11. Блоки контроля и защиты.

Аналого-цифровой преобразователь.

Блоки контроля и защиты по реактивности, току и скорости введения реактивности построены по принципу "безопасного отказа" на основе блокинг-генератора, который при достижении заданного напряжения на входе блока (обычно - 6 В, выводится из режима генерации и отключает исполнительное реле.

Аналого-цифровой преобразователь реактиметров с цифровой индикацией представляет собой двуполярный преобразователь напряжения в частоту, счетчик с фиксированными временными воротами и дешифратор с регистром для запоминания и индикации в десятичном коде каждой десятой выборки контролируемой величины. Индикация осуществляется с помощью четырех газоразрядных цифровых индикаторов ИИ-12 и ряда светодиодов, указывающих порядок входного тока.

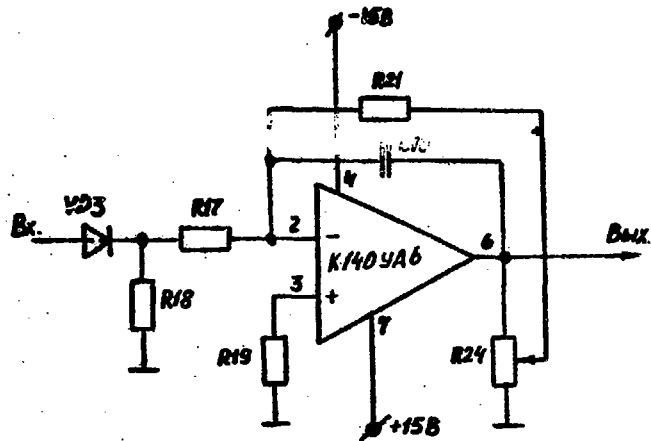


Рис. 2.10. Принципиальная схема усреднителя

11.12. Технические данные.

1. Детектор нейтронов -ионизационные камеры типа КНК-56, КНК-53М, КНК-4, счетчик нейтронов СНМ-18.
2. Начальный уровень рабочего тока - 10^{-12} А.
3. Динамический диапазон непрерывной работы:
 - при повышении мощности - 9 декад, до 10^{-4} А (с учетом импульсного канала);
 - при понижении мощности - 7 декад, от 10^{-4} А до 10^{-11} А, разбит на 4 поддиапазона: 10^{-11} А + 10^{-9} А, 10^{-9} А + 10^{-7} А, 10^{-8} А + 10^{-6} А, 10^{-6} А + 10^{-4} А.
4. Осуществляется контроль превышения заданных уровней входного тока. Уровни входного тока разбиты на два канала и равны: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10; 20; 50; 100 % от значения входного тока канала.

Предупреждающая сигнализация срабатывает при 80 % заданного уровня входного тока, а аварийная при 100 %. Аварийная и предупреждающая сигнализация осуществляется при помощи индикаторных ламп и реле, контакты которых могут быть заведены во внешние схемы.
5. Основная погрешность определения тока:
 - на поддиапазоне 10^{-11} А + 10^{-9} А - + 4 %;
 - на поддиапазоне 10^{-7} А + 10^{-4} А - + 2,5 %.
6. Дрейф нулевого тока - $3 \cdot 10^{-13}$ А/ч.
7. Динамический диапазон импульсного канала - от 30 до 10000 имп/с.
8. Разрешающее время канала - 3 мкс.
9. Вероятность просчета на максимальной частоте следования импульсов - не более 0,01.
10. Индикация величины тока и реактивности осуществляется при помощи цифрового дисплея или стрелочного прибора.
11. Выходное напряжение тока и реактивности 0 + 10 В на шкалу.
12. Обеспечивается плавный переход с импульсного канала на токовый при вычислении реактивности в сторону увеличения нейтронного потока.
13. Диапазоны измеряемых реактивностей: -0,1; -0,2; -0,5; -1,0; -2,0; -5,0; -10; -20β с возможностью повышения чувствительности на один порядок переключателем $\rho \cdot 10^{-1}$.
14. Осуществляется контроль превышения положительных реактивностей 0,2 и $0,3 \beta$ с сигнализацией при помощи индикаторных ламп и релевым выходом.

15. Предусмотрено автоматическое переключение шкал реактивности на -20β при превышении любого меньшего диапазона отрицательной реактивности и подача сигнала на повышение скорости записи на самописце или включение другого быстродействующего устройства.

16. Частотный диапазон измерения реактивности определяется уровнем входного сигнала и при входном токе $10^{-7} \text{ A} + 10^{-4} \text{ A}$ достигает 15 Гц.

17. Погрешность измерения реактивности:

- в поддиапазоне $10^{-11} \text{ A} + 10^{-9} \text{ A}$ - 5 % от полной шкалы;
- в поддиапазоне $10^{-7} \text{ A} + 10^{-4} \text{ A}$ - 3 % от полной шкалы.

18. Диапазон измерения скорости введения реактивности $0,005 + 0,15 \beta/\text{с}$.

19. Осуществляется контроль превышения уровня скорости ввода реактивности $7 \cdot 10^{-2} \beta/\text{с}$ с предупреждающей 80 % и аварийной 100%-ной сигнализацией.

20. Прибор оснащен блоками питания и компенсации γ -фона ионизационных камер и счетчика СМ-18.

21. Внешнее исполнение прибора настольное.

Габаритные размеры - 480 x 360 x 130;

масса не более 15 кг;

потребляемая мощность не более 70 Вт.

II. МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ РЕАКТОРА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

II.1. Векторная модель кинетики реактора.

Поведение нейтронного потока в ядерном реакторе можно описать с помощью транспортного уравнения Больцмана, которое может быть записано следующим образом [1,8] :

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\partial t} - \frac{\vec{v}}{|\vec{v}|} \nabla \phi(\vec{r}, \vec{v}, t) - \Sigma_a(\vec{r}, \vec{v}) \phi(\vec{r}, \vec{v}, t) + \int \Sigma_s(\vec{r}, \vec{v}' \rightarrow \vec{v}, t) \phi(\vec{r}, \vec{v}', t) d\vec{v}' + \int (+\beta) \chi_0(v) \nu(v) \sum_f(\vec{r}, \vec{v}) \phi(\vec{r}, \vec{v}, t) dv + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(\vec{r}, t) \chi_i(v) + S(\vec{r}, \vec{v}, t),$$

где все обозначения общеприняты.

Уравнение для предшественников запаздывающих нейтронов будет иметь вид:

$$\frac{dC_i}{dt} = \beta_i \int \nu(v) \sum_f(\vec{r}, v) \phi(\vec{r}, v, t) - \lambda_i C_i(\vec{r}, t)$$

В работе [1] показано, что решение уравнений (III.1) и (III.2) может быть записано в виде:

$$\phi(\vec{r}, \vec{v}, t) = \sum_{j=0}^{\infty} f_j(t) \psi_j(\vec{r}, \vec{v}).$$

"Основная мода" - собственная функция ψ_0 , соответствующая наибольшему собственному значению эффективного коэффициента размножения k_{eff} , является хорошим приближенным решением при малых отклонениях от равновесного состояния.

Выражение $f_0(t) \psi_0(\vec{r}, \vec{v})$ может быть полным решением в случае, если переменные допускают разделение переменных по пространству и времени, по скорости и времени.

Уравнение (III.1) можно привести к уже известному виду уравнений кинетики реактора (I.2), для этого необходимо функцию нейтронного потока ϕ представить в виде:

$$\phi(\vec{r}, \vec{v}, t) = n(t) \psi(\vec{r}, \vec{v}, t),$$

где $n(t)$ - амплитудная функция;

$\psi(\vec{r}, \vec{v}, t)$ - функция формы (в общем случае, когда ψ содержит время, называется случаем с неразделяющимися переменными).

В этом случае после некоторых преобразований уравнение (III.1) можно привести к виду:

$$\frac{d}{dt} \frac{\langle \varphi_0^+ \frac{1}{\beta} \Phi \rangle}{\langle \varphi_0^+ \frac{1}{\beta} \varphi_0 \rangle} = \frac{1}{\Lambda_0} (\rho_0 - \beta) A_0(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i^i + \frac{S^*}{\Lambda_0}$$

$$\frac{dC_i^i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda_0} A_0(t) - \lambda_i C_i^i,$$

где знак $\langle \dots \rangle$ означает интегрирование по всему шестимерному фазовому пространству $\vec{r} \times \vec{v}$;

$$\rho_0 = \frac{\langle \varphi_0^+ (\hat{M} + \hat{F}) \varphi_0 \rangle}{\langle \varphi_0^+ \hat{F} \varphi_0 \rangle} \quad - \text{глобальная реактивность реактора};$$

$$\Lambda_0 = \frac{\langle \varphi_0^+ \frac{1}{\beta} \varphi_0 \rangle}{\langle \varphi_0^+ \hat{F} \varphi_0 \rangle} \quad - \text{время генерации нейтронов энергетической группы, соответствующей скорости};$$

$$C_i^i = \frac{\langle \varphi_0^+ C_i^i \rangle}{\langle \varphi_0^+ \frac{1}{\beta} \varphi_0 \rangle} \quad - \text{эффективное количество предшественников запаздывающих нейтронов } i \text{-ой группы};$$

$$S^* = \frac{\langle \varphi_0^+ S \rangle}{\langle \varphi_0^+ \hat{F} \varphi \rangle} \quad - \text{эффективная мощность внешнего источника};$$

φ_0 - основное распределение нейтронного потока в реакторе;

φ_0^+ - основное распределение сопряженной функции, которая называется ценностью нейтронов;

\hat{M} - оператор диффузии, который в общепринятой системе обозначений имеет следующий вид:

$$\hat{M} = -\nabla D(\vec{r}, \vec{v}, t) \nabla - \sum_{\vec{v}} D(\vec{r}, \vec{v}, t) \int d\vec{v}' \Sigma_s(\vec{r}, \vec{v}' \rightarrow \vec{v}, t).$$

\hat{F} - оператор деления, который имеет вид для быстрых нейтронов:

$$\hat{F}_0 = (1 - \beta) \chi_f(v) \int d\vec{v}' \chi(v') \Sigma_f(\vec{r}, v', t)$$

для запаздывающих нейтронов

$$F_i = \beta_i \chi_i(v) \int d\vec{v}' \chi(v') \Sigma_f(\vec{r}, v', t)$$

Ш.2. Измерение глобальной реактивности с использованием распределенной модели реактора.

Для того чтобы применять уравнение (Ш.12) для определения глобальной реактивности, необходимо определить временное поведение двух функционалов:

$$A_0(t) = \langle \varphi_0^+ \hat{F} \Phi \rangle$$

$$B_0(t) = \frac{\langle \varphi_0^+ \frac{1}{\beta} \Phi \rangle}{\langle \varphi_0^+ \frac{1}{\beta} \varphi_0 \rangle}.$$

Измерение этих функционалов в реакторе может быть проведено при помощи внутризсных детекторов нейтронного потока. Объем реактора для этого необходимо разбить на n объемов V_i и в каждый поместить детектор нейтронов с эффективностью $\varepsilon_i(r, t)$. В этом случае можно представить

$$A_0(t) = \sum_{i=1}^n A_i \theta_i(t)$$

$$B_0(t) = \sum_{i=1}^n B_i \theta_i(t),$$

где

$$A_i = \frac{\int d\nu \int dr \varphi_0^+ \chi \int d\nu' \nu \sum_{f(\vec{r}, \vec{v}')} \psi(\vec{r}, \vec{v}', t)}{\theta_i}$$

$$B_i = \frac{\int d\nu \int dr \varphi_0^+ \frac{1}{\beta} \psi(\vec{r}, \vec{v}', t)}{\theta_i}$$

$$\theta_i = \int dr \int d\nu \varepsilon_i(\vec{r}, \vec{v}', t) \psi(\vec{r}, \vec{v}', t).$$

Величины объемов необходимо выбирать таким образом, чтобы сохранить независимость от времени коэффициентов A_i и B_i . Для реактора на тепловых нейтронах коэффициенты A_i и B_i практически можно определить из временного поведения набора величин

θ_i в критическом реакторе.

В этом случае

$$A_i = \frac{\int d\nu dr \Phi_0^+(\vec{r}) P(\nu)}{\theta_i}$$

$$B_i = \frac{\int_{V_i} d\vec{r} \int dv \varphi_0^+ \frac{1}{v} \Psi}{\theta_i}$$

где Φ_0^+ - распределение ценности нейтронов деления;
 P - распределение плотности мощности в активной зоне;
 θ_i - величина сигнала i -го детектора.

Ш.3. Возможность определения глобальной реактивности на базе вычислителя точечной модели

Рассмотрим применение системы уравнений (Ш.5.) для случая одногруппового приближения. Пусть все объемы V_i одинаковы и равны V_0 . С учетом уравнений (Ш.9) получим выражения для функционалов A_0 и B_0 .

$$A_i(t) = \frac{\varphi_{0i}^+ P_i V_0}{\theta_i(t)}$$

$$B_i(t) = \frac{1}{v} V_0 \varphi_{0i}^+ \Psi_i(t) \cdot \frac{1}{\theta_i(t)}$$

следовательно,

$$A_0(t) = V_0 \sum_{i=1}^n \varphi_{0i}^+ P_i$$

$$B_0(t) = \frac{1}{v} V_0 \sum_{i=1}^n \varphi_{0i}^+ \Psi_i(t)$$

и уравнения кинетики принимают вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{v} \sum_{i=1}^n \varphi_{0i}^+ \Psi_i(t) \right) = \frac{1}{\lambda_0} (P_0 - \beta) \sum_{i=1}^n \varphi_{0i}^+ P_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\lambda_j c_j')_i$$

$$\left(\frac{dC_j'}{dt} \right)_i = \frac{\beta_j}{\lambda_0} A_i(t) - (\lambda_j c_j')_i$$

где все величины, входящие в уравнения могут быть определены для любого элемента объема разбиения. При этом необходимо лишь при-

держиваться требования, чтобы внутри элемента объема разбиения можно было пренебречь неравномерностью распределения потока нейтронов.

Из системы уравнений (Ш.12) можно определить глобальную реактивность реактора. В этом случае удастся в значительной степени учесть пространственное перераспределение потока нейтронов, которое в основном и определяет пространственные эффекты при определении реактивности.

Сравнивая вид системы уравнений (I.2), полученных при рассмотрении точечной модели реактора и системы уравнений (Ш.12), полученной при выводе соотношений для глобальной реактивности, можно заметить, что вычисление реактивности в первом и во втором случае можно производить по одному алгоритму. Различие состоит в том, что в случае точечной модели на вход вычислителя подается сигнал непосредственно с детектора нейтронов, а в случае модели глобальной реактивности на вход вычислителя необходимо подавать сигнал, являющийся интегральным откликом системы с учетом статистического веса области V_i , в которой расположен детектор нейтронов.

Ш.4. Переходной процесс мгновенной реактивности в практических измерениях

Рассмотрим аналитический характер изменения реактивности, например, при скачке значения нейтронного потока в ядерном реакторе. Используя выражение для передаточной функции реактора [I] и полагив $\bar{c}_g \approx 0$, и $\Phi_{S_0} = 0$,

$$\alpha = \frac{\varphi(s)}{k(s)} = \frac{\Phi(1-s) \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i \bar{c}_i}{\bar{c}_i s + 1}}{s(\bar{c}_g + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i \bar{c}_i}{\bar{c}_i s + 1})}$$

Здесь $\varphi(s)$ и $k(s)$ приращения потока нейтронов и эффективного коэффициента размножения соответственно;

$\bar{c}_g \approx l$ и $\bar{c}_i = (\lambda_i)^{-1}$ время диффузии мгновенных и время жизни запаздывающих нейтронов i -ой группы соответственно.

В качестве простой иллюстрации примем следующие значения $\bar{c}_g = 1 \cdot 10^{-4}$ с и $\beta = 75 \cdot 10^{-4}$ характерные для водо-водяных

реакторов. Запаздывающие нейтроны объединим в одну группу, приняв $\beta\tau = 0,083$ с.

Таким образом, уравнение (II.20) примет следующий вид:

$$\frac{f(s)}{k(s)} = \frac{\Phi(1 - \frac{\beta\tau s}{s\tau + 1})}{s\tau_0 + \frac{\beta\tau}{s\tau + 1}},$$

из которого получим выражение для нахождения величины приращения коэффициента размножения

$$k(s) = \frac{s^2\tau_0 + s(\beta\tau + \tau_0)}{s(\tau - \beta\tau) + 1} \frac{f(s)}{\Phi}.$$

Выражение для оригинала выражения (III.22) будет иметь следующий вид:

$$k(t) = \left\{ \frac{\tau_0\tau_0}{\tau - \beta\tau} \frac{1}{(\tau - \beta\tau)^2} + \frac{\beta\tau + \tau_0}{\tau - \beta\tau} \left(\frac{1}{\tau - \beta\tau} \right) \right\} e^{at} \frac{f(s)}{\Phi},$$

где $a = \frac{1}{\tau - \beta\tau}$.

На рис. III.1. приведен вид зависимости $k(t)$ от времени для случая, когда приращение функции потока приняло значение $f(t) = 1$ в момент времени $t = 0$. Видно, что даже после установления потока нейтронов на постоянном уровне значение эффективного коэффициента размножения принимает постоянное значение только спустя время, равное $50 + 60$ с, что соответствует $4 + 5$ величинам постоянной спада τ .

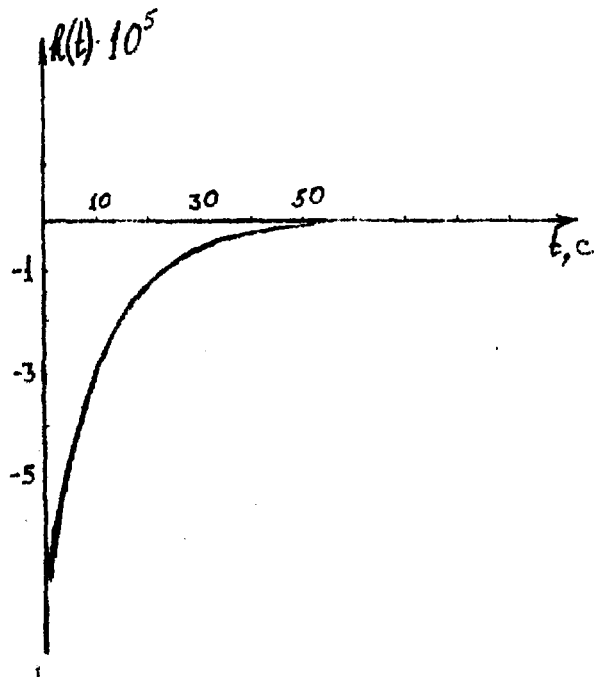


Рис. 3.1. Значение $k(t)$ в переходном периоде

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современных энергетических реакторах, несмотря на значительные отклонения поведения нейтронного потока от описываемого точечной моделью, в большинстве практически важных случаях, когда $|p| < \beta$, измерение эффектов реактивности допускает применение точечной модели при правильном выборе расположения детектора. Наиболее точные результаты будут получены, если использовать в качестве входного сигнала интегральный отклик системы детекторов с учетом статистических весов областей их расположения.

В ИЯИ АН УССР разработан широкодиапазонный аналоговый измеритель реактивности АИМР-8-2м, используемый на Запорожской, Ровенской АЭС и ряде исследовательских реакторов.

Применение реактиметров сокращает время, затрачиваемое на подготовительные работы по загрузке топлива, а также время проведения пусконаладочных работ при отработке технологических режимов реакторов АЭС в соответствии с правилами ядерной безопасности (ПЯБ), особенно на этапе физического пуска. Они могут применяться и как информационные устройства при изучении систем управления реакторов, для определения эффективности органов регулирования (с учетом интерференции). В системе управления реактиметр может использоваться для осуществления аварийной защиты реактора и его регулирования, если подавать в обратную связь системы управления выходной сигнал реактиметра для ограничения или поддержания заданной величины реактивности во время переходного процесса вместо сигнала периода.

Непрерывная запись реактивности полезна при анализе рабочих характеристик реактора и при установлении причин аварий на реакторе (в активной зоне).

В работе рассмотрена возможность измерения глобальной реактивности реактора с использованием сигналов от внутризонных детекторов нейтронного потока. Показан характер установления стационарного значения реактивности при скачке нейтронного потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хетрик Д. Динамика ядерных реакторов. /Пер. с англ./ М.:Атомиздат, 1975, -400с.
2. Сидоренко В.А. Вопросы безопасной работы реакторов ВВЭР. М.:Атомиздат, 1977, -216с.
3. Сборник статей. Атомные электрические станции. М.:Энергия, 1986.
4. Сборник статей. Атомные электрические станции. М.:Энергия, 1987.
5. Хессель Г., Малетти Д., Шуман П., Цигенбайн Д. Использование электронно-эмиссионных детекторов с родиевым эмиттером для динамических измерений реактивности в реакторах типа ВВЭР. Совещание тематической группы "Сбор эксплуатационных данных". Москва, 1980.
6. Collatz S., Grundman U., Maletti R., Rohde U., Ziegenbein D. Kernenergie, Bd.24, 1981.
7. Гриневич Ф.А. Аналоговые измерители реактивности. -Изв.АН ЕССР, серия: физика, энергетика. 2, 16-24 (1983).
8. Кипин Дж.Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. /Пер. с англ. М.:Атомиздат, 1967, -428с.
9. Ромеш Э.М. Транзисторные преобразователи в устройствах питания радиоэлектронной аппаратуры. М.:Энергия, 1975.
10. Борисов С.Я., Царьков В.А. Широко-импульсные модуляторы на основе интегральных операционных усилителей. Электронная техника в автоматике, вып.4, 1973.

Владимир Иванович Борисенко
Анатолий Иванович Головач
Федор Акимович Гриневич
Владимир Всеволодович Лукьянец
Николай Макарович Сидорук

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ
КИНЕТИКИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

(Препринт КИЯИ-88-42)

Редакторы: Л. П. Малашкина
Н. А. Солдатенко

БФ 19168

Изд. № КИЯИ-88-42

Тип. заказ 282

Цена 9 коп.

Подписано к печати 19.09.1988 г.

Печать офсетная Усл.-печ.л. - 2,5

Бумага офсетная Уч. -изд.л. - 1,5

Формат бумаги 60/90/16 Тираж 200 экз.

СКТБ с ЭП Института ядерных исследований АН УССР
252028, Киев-28, проспект Науки, 47