

ТРУБОПРОВОДНЫЕ УСТРОЙСТВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Р.Р. Ионайтис, А.Ю. Василенко, В.Ф. Лисовой, М.А. Туктаров

*Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники (НИКИЭТ),
а/я 788, 101000, Москва, Россия, ionaitis@entek.ru*

Ядерные энергетические установки (ЯЭУ) оснащены множеством разнообразных трубопроводных устройств (ТПУ), которые находятся в сложных условиях работы. Количество отказов ТПУ в ЯЭУ уже достигло 35 % от общего числа отказов оборудования. В этой работе рассмотрены главные направления модернизации ТПУ, основанные на применении устройств с памятью формы (УПФ). Предлагаются быстро заменяемые плоско-кольцевые фиксаторно-уплотнительные элементы для уплотнений седел арматуры и защиты сварных швов. Рассматриваются малогабаритные безредукторные электроприводные ПФ-актуаторы, пассивные (прямодействующие) ПФ-инициаторы срабатывания арматуры при аварийных изменениях параметров энергоустановки (температура, расход, давление, уровень воды, нейтронный поток).

1. Введение

Вначале возможности СПФ и устройств на их основе (УПФ) для использования в ядерной энергетике казались безграничными: была создана база разработки и исследования, начато опытно-промышленное внедрение, получены обнадеживающие результаты [1-2].

Поскольку условия функционирования СПФ и УПФ в ядерной энергетике очень сложные, была разработана концепция их применения для АЭС [3], были определены возможности и особенности использования СПФ в ядерной промышленности, в частности, при монтаже и ремонте, для воздействия на реактивность, при перекрытии трубопроводов [3-5]. Возможности ускорения использования инженерного применения СПФ и УПФ были обстоятельно рассмотрены в докладе [6], а патенты – в обзорах [7-8].

В настоящее время предложены: защитные фиксаторно-уплотнительные плоско-кольцевые элементы [9-11]; разработаны активно управляемые приводы [12-14] и пассивные инициаторы срабатывания [9-10], в основном, на основе монокристаллов СПФ [11].

2. Проблемы ТПУ. Цели и средства их разрешения

ТПУ конструируются, изготавливаются, испытываются, эксплуатируются с соблюдением жестких Правил и Норм Атомной Энергетики. Однако на них приходится до 25 % всех отказов энергоблока и до 40 % его простоев, они забирают до 70% затрат на ремонт. ТПУ присущи устоявшиеся технические решения. В ряде случаев они не соответствуют современным устремлениям по надежности и безопасности.

К обычно требуемым свойствам арматуры в настоящее время добавляются: уменьшение массо-габаритных параметров; легкоустанавливаемость, быстроедействие; пассивность срабатывания; вибро(сейсмо)стойкость; диагнозопригодность; развитость сервисного обслуживания; управление сроком службы (с продлением его до 60 лет).

3. Нетрадиционные средства решения проблем ТПУ

Главными средствами достижения ТПУ указанных целей и свойств являются:

- использование надежных, проверенных практикой технических решений;
- разработка арматуры на соответствие всему комплексу критериев надежности и безопасности;
- использование нетрадиционных решений.

К последним относятся:

- применение арматурных изделий с разными принципами действия и/или конструкторско-технологическими исполнениями для выполнения одной и той же функции (быстрого открытия или закрытия);
- пассивная защита (автоматически включающаяся при работе на мощности) сварных швов трубопроводов, в первую очередь, (в месте соединения с арматурой) с помощью плоско-кольцевых фиксаторов с памятью формы, что заметно продлевает срок службы сварных швов и упрощает компоновку арматуры (уменьшением ее количества, частичным или полным размещением вне защитной оболочки);
- разработка и освоение быстросменяемых выемных частей, установка неизнашиваемых фиксаторов и уплотнителей (с памятью формы);
- разработка аварийных устройств, срабатывающих по логике «2 из 3^x»;
- обеспечение легкой трансформируемости актуаторов ТПУ на различные усилия и хода использованием в системах безопасности пневмопружинных актуаторов (взвод и удержание поршневым приводом, срабатывание - пружинами);
- предпочтение сейсмостойким тарельчато-пружинным актуаторам для использования в широком диапазоне ходов ТПУ, включая задвижки на ход до сотен миллиметров;
- использование пассивных инициаторов срабатывания: по обесточиванию (снижению напряжения), изменению величины или направления расхода теплоносителя, понижению уровня жидкости в активной зоне, повышению давления и/или температуры в помещениях, росту нейтронного потока;
- разработка супермалогабаритных (мощных) ПФ-актуаторов для ТПУ малых DN.

4. Фиксаторно-уплотнительные ПФ-элементы

В первую очередь, фиксаторно-уплотнительные ПФ-элементы предлагаются для укрепления сварных швов трубопроводов, которые, как правило, растянуты давлением внутренней среды, не “любят” работать под напряжением и поэтому через 15-20 лет “стареют”, образуя мелкие (несквозные) трещинки.

Для создания пассивной защиты сварных швов путем снижения растягивающих напряжений на трубопровод (остановленной энергоустановки) около сварного шва предлагается устанавливать без натяга ленточные ПФ-хомуты в мартенситном состоянии (рис.1). Фиксаторы могут иметь замки, не выходящие за пределы внешнего диаметра хомута, а внешние хомуты могут иметь и выступающие замки [9-10].

При разогреве трубопровода (при выводе энергоустановки на мощность) ПФ-хомуты при переходе в аустенитной состоянии с деформацией сжатия 6-8 % от начальной длины хомута пассивно создают напряжение сжатия. При охлаждении (например, остановке энергоустановки для ремонта) материал хомутов переходит в мартенситное состояние (снижает напряжение в 3-8 раз) и перестает создавать давление на трубу.

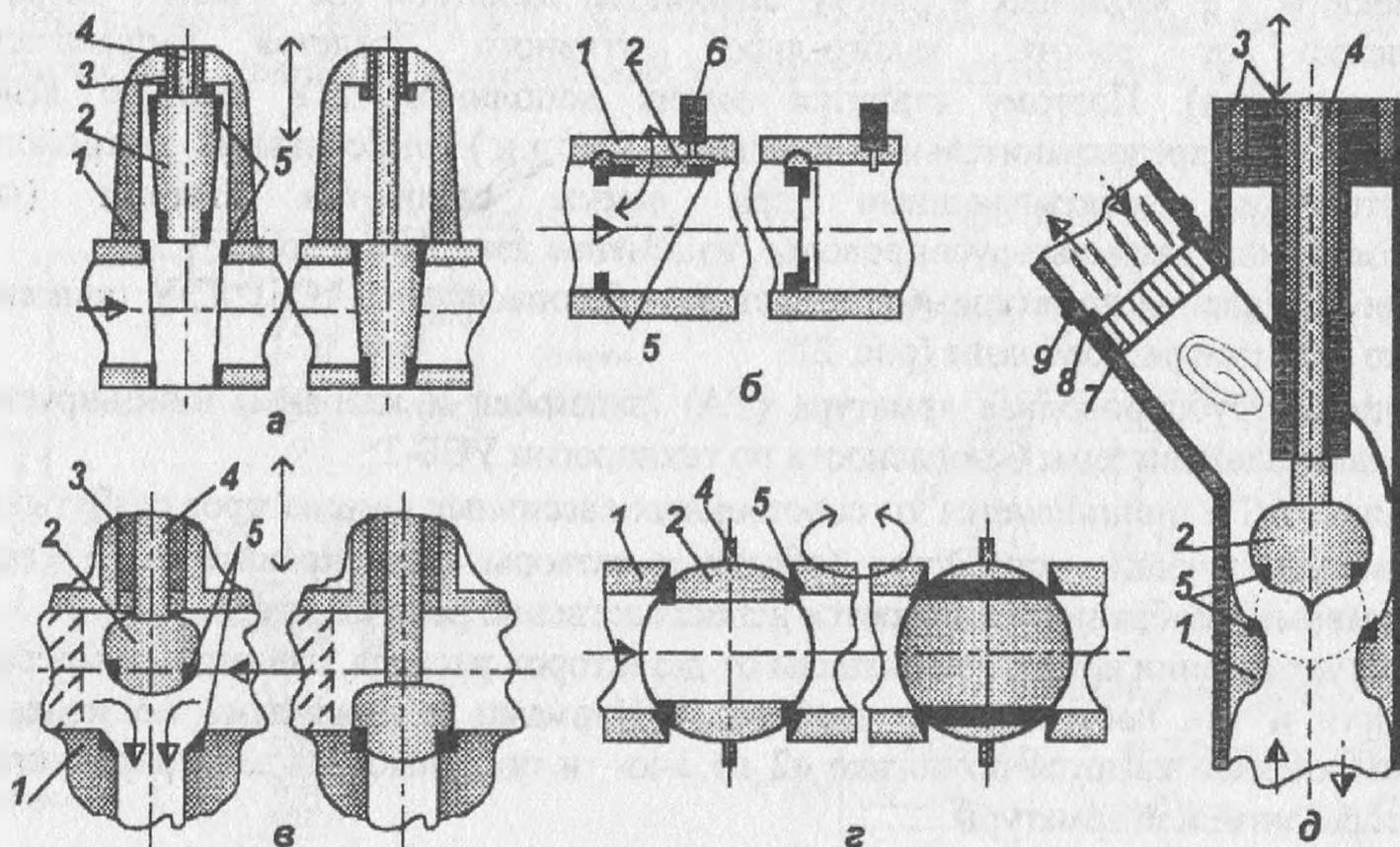


Рис.1. Проточная часть: а – задвижка; б – затвор обратный проходной (с указателем положения); в – клапан угловой (пунктир) или двухстороннего подвода (запорно-дрессельный, предохранительный); г – кран; д – клапан (отсекатель) с наклонным патрубком и вихревыпрямителем; 1 – корпус; 2 – затвор; 3 – уплотнение сальниковое; 4 – шток; 5 – уплотнение седла; 6 – указатель положения; 7 – вихревыпрямитель; 8 – сварной шов; 9 – фиксатор.

Даже в толстостенных трубах в сварных швах достигается снижение напряжения почти до нуля при инженерно-приемлемых размерах ПФ-хомутов по ширине и толщине. Количество хомутов определяется возможностями технологии и целесообразностью.

Другим эффективным применением фиксаторно-уплотнительных ПФ-элементов является использование их для быстрой замены выемных частей седел клапанов и задвижек и для установки стойких к износу седельно-плунжерных пар (см. рис.1). Последнее объясняется высокой стойкостью СПФ к эрозии – в 5-6 раз большей, чем стойкость известных наплавки. Такое направление использования СПФ облегчает эксплуатацию ТПУ и уменьшает дозовые нагрузки на персонал АЭС.

5. Прямодействующие инициаторы срабатывания

Большинство ТПУ являются управляемыми средствами, работающими по команде извне, от оператора. ТПУ, относящиеся к средствам безопасности (СБ), являются, как правило, автоматически управляемыми средствами, работающими извне по командам от приборов.

Инициация срабатывания таких ТПУ может производиться по логике «2 из 3». Они снабжены тремя детекторами, соединенными так, что срабатывание происходит при выработке не менее двух сигналов.

Некоторые ТПУ являются средствами прямого действия, т.е. работающими от рабочей среды.

Они простые, но срабатывают лишь по логике «1из1», т.е. по единственному аварийному сигналу (может быть ложному).

В ядерной технике для повышения надежности срабатывания СБ настоятельно рекомендуется использование прямодействующих устройств, реализующих принцип

пассивности, т.е. вводимых в работу аварийным событием (без участия оператора), независимо от работы какого-либо активного средства (управляющего, энергоисточника). Поэтому ставится задача дополнить ТПУ прямого действия (обратные и предохранительные клапаны и т.п.) пассивными устройствами, автоматически срабатывающими при самых различных авариях (потеря электропитания, разрывы трубопроводов, изменение давления и др.).

Для управления арматурными средствами безопасности (АСБ) ЯЭУ применяется широко развитое разнообразие (рис. 2):

- активная трубопроводная арматура (ТА) (задвижки и клапаны) инициируется из управляющей системы безопасности по технологии УСБ-Т;
- пассивная ТА инициируется от собственных пассивных инициаторов срабатывания;
- прямодействующие устройства (обратные затворы, предохранительные клапаны, разрывные мембраны) управляются непосредственно рабочей средой.

При управлении арматурой сигналы от детекторов расхода, давления, температуры, мощности и т.п. поступают по требуемым Нормами и Правилами не менее чем трем каналам, обрабатываются по логике «2 из 3-х» и поступают на электроредукторные актуаторы активной арматуры.

Сигналы от пассивных инициаторов срабатывания (по давлению, температуре, уровню, расходу) от каждого также по трем каналам поступают в блоки управления, где вызывают срабатывание трехходовых электромагнитопневматических переключателей по логике «2 из 3-х» (без участия электроники), отключают пневмоприводы и включают пружинные приводы.

Пассивный инициатор срабатывания по росту нейтронного потока (и мощности реактора) испытан на расстоянии 340-390 мм над активной зоной в реакторе ИВВ-2М (окт. 1990 г). Его рабочий орган – пружины из сплава Mn-Cu – длительно облучался при 75°C, замыкал электроконтакты при $80,5 \pm 2,5$ °C, а размыкал при $83,5 \pm 4$ °C. Отношение нейтронных потоков по 8 опытам составило $1,25 \pm 1,7$ °C.

Для осуществления безэлектрического управления разработано трехножковое удерживающе-пусковое ПФ-устройство, чувствительное к увеличению нейтронного потока. Этот ПИС по росту нейтронного потока включает корпус с коническим выступом, плоские ПФ-элементы, закрепленные с помощью крепежного кольца на несущей трубке рабочего органа. Число удерживающих ПФ-элементов позволяет реализовать логику срабатывания «2 из 3-х». Испытания ПИС-Ф показали возможность удержания рабочего органа с усилием до 50 Н при температуре 20 °C и срабатывание практически мгновенно при превышении пороговой температуры СПФ до (≈ 100 °C).

Пассивный инициатор срабатывания при превышении температуры (ПИС-Т) в помещении разработан на основе изогнутых пластин из сплава с памятью формы (СПФ) (никелид титана), которые выпрямляясь взаимодействуют с микровыключателем (размыкая электроконтакты) при достижении заданной температуры. Понижение температуры среды, а следовательно, и пластины из СПФ, приводит к возврату ее в исходное состояние под действием пружины микровыключателя. При этом контакты снова замыкаются. Строго определенная температура фазового перехода СПФ обеспечивает хорошую воспроизводимость срабатывания инициатора.

За прототип пассивного инициатора срабатывания по снижению уровня теплоносителя (ПИС-У) в корпусе реактора выбран термоэлектрический сигнализатор уровня. ПИС-У инициирует об изменениях температуры на границе раздела жидкость-пар вследствие разницы в коэффициентах теплоотдачи к жидкой и паровой фазам. ПИС-У должен длительно работать при высокой температуре (≈ 280 °C) и давлении (≈ 7 МПа) практически не изменяя своих параметров при облучении. При аварийном

снижении в реакторе уровня (на 0.3 м) ПИС-У обесточиваются, размыкают контакты и вызывают срабатывание исполнительных устройств (по логике «2из3^x».)

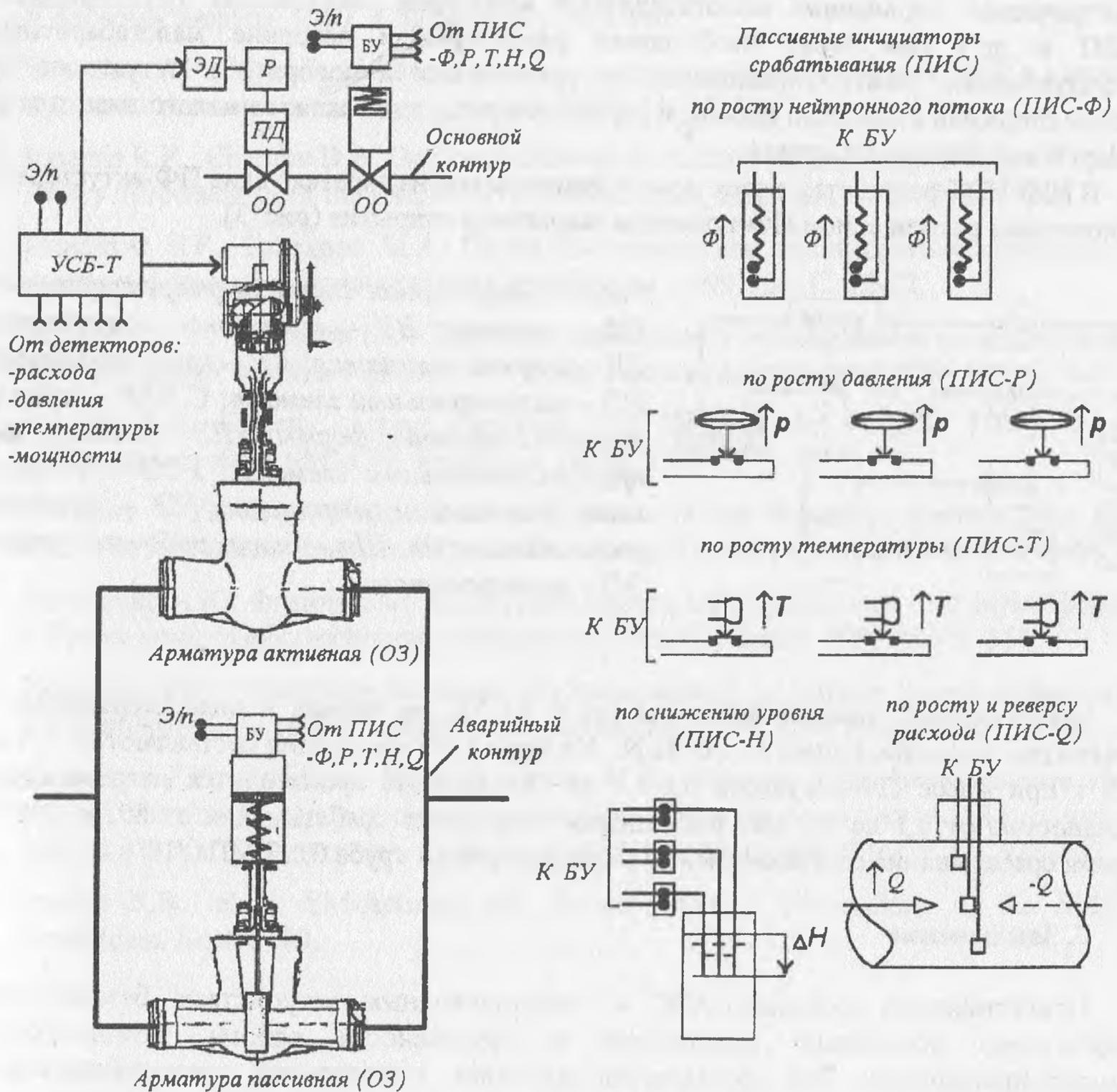


Рис. 2. Схема управления трубопроводными устройствами: ОО – обычно открыто; ОЗ – обычно закрыто; БУ – блок управления; УСБ – управляющая система безопасности; Φ – поток нейтронов; Q – расход среды; P – давление; T – температура; H – уровень.

Разрабатывается ПИС по расходу на основе изменения температуры, соответствующей температуре питательной воды ($\approx 190^\circ\text{C}$), на аварийную температуру ($\approx 280^\circ\text{C}$) вытекающей из реактора вскипающей воды.

6. Электроуправляемые ПФ-актуаторы (приводы)

Существующие электроуправляемые приводы (актуаторы) клапанов имеют устоявшиеся (десятилетиями) технические решения и достаточно высокие массогабаритные параметры. Поэтому тысячи (а порой десятки тысяч) клапанов,

устанавливаемых на трубопроводах малого диаметра (с DN от 6 мм), управляются вручную.

Для ЯЭУ XXI века целесообразно создание новой потребности – дистанционное электрическое управление малогабаритной арматурой импульсных трубопроводов (КИП и др.) Для этого необходимы разработка и освоение малогабаритных безредукторных электроуправляемых поступательных и поворотных актуаторов на основе стержней с памятью формы, в первую очередь, для клапанов малого диаметра (с DN от 6 мм) и шаровых кранов.

В НИКИЭТ разрабатываются и экспериментально изучаются такие ПФ-актуаторы с оппозитным размещением ПФ-приводов закрытия и открытия (рис. 3).

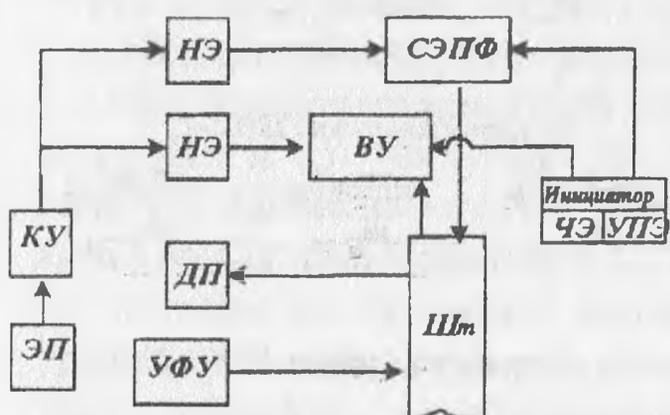


Рис.3. Структурная схема терморезагирующего ПФ – клапана: ВУ – возвратное устройство; ДП – датчик положения; КУ – ключ управления; НЭ – нагревательный элемент; СЭПФ – силовой элемент с памятью формы; УПЭ – усилительно-преобразовательный элемент; УФЭ – устройство фиксации и удержания; ЧЭ – чувствительный элемент; Шт – шток рабочего органа; ЭП – электропитание.

Используются силовые элементы (от 4 до 12) на привод в виде стержневых и трубчатых монокристаллов из Cu-Al-Ni. На ходе 2,5-5 мм усилия составляют от 1,5 до 3,5 т при массе ПФ-актуатора 0,6-1,6 кг. Управление производится нагревателями мощностью от 0,1 до 0,9 кВт в диапазоне температур срабатывания от 80 до 200°C, время срабатывания составляет 10-30 с при давлении в трубе 0...7 МПа /12/.

7. Заключение

Ответственным изделиям АЭС – трубопроводным устройствам безопасности необходимо повышение надежности и безопасности работы, компактности, ремонтпригодности. Это предлагается достигать: дополнением прямодействующих устройств срабатывания пассивными устройствами, срабатывающими от прямодействующих инициаторов; разнопринципностью действия средств безопасности; применением пассивных фиксаторно-уплотнительных элементов; выполнением инициаторов срабатывания (по обесточиванию, падению уровня жидкости в реакторе, изменению температуры и/или давления, росту нейтронного потока) с логикой инициации «2 из 3^x».

Выполнение указанных ТПУ с памятью формы позволяет получить высокие параметры и характеристики.

Список литературы

1. Митенков Ф.М., Самойлов О.Б., Щукин И.М. Перспективы использования СПФ в атомной технике // Тяжелое машиностроение. 1991. № 7. С. 16-19.
2. Ионайтис Р.Р., Котов В.В., Щукин И.М. Возможности использования СПФ в ядерной энергетике // Атомная энергия. 1995. Т.79. Вып.4. С. 304-306.

3. Ionaitis R.R. Concept of Functional Materials Use in Unconventional Means For Nuclear Plants // Proc. of 3^d Int. Conf. on Intelligent Materials. 1996. SPEE. V. 2779. P. 974-985.
4. Ионайтис Р.Р. Возможности и особенности использования СПФ в ядерной технике // Атомная энергия. 1997. Т.82. Вып.5. С.392-396.
5. Ионайтис Р.Р., М.А. Туктаров. Патентное исследование применения СПФ в ядерной технике // Атомная техника за рубежом. 1997. №2. С.3-5.
6. Ionaytis R.R., Chernov D.B. On Possibilities to Accelerate Engineering of Shape Memory Alloys // Proceedings of the ESOMAT-97, Netherlands, Enschede. 1997. P. 643-648.
7. Ионайтис Р.Р., Туктаров М.А. Патентно-техническое исследование актуаторов с памятью формы // Атомная техника за рубежом. 1999. №4. С. 12-22.
8. Ионайтис Р.Р., Туктаров М.А. Патентно-техническое исследование терморреагирующих клапанов с памятью формы // Атомная техника за рубежом. 1999. №9. С. 3-9.
9. Ionaitis R.R. Directly Acting Pipe-Line SM Devices for Nuclear Power Plants // Proceedings of the SMM'99, Kanazawa, Japan. 1999. P.51-54.
10. Abramov V.Ya, et al. Perspectives of Creation of the Protective System with SM-Elements for Nuclear Reactors // Proc. of Int. Symp. Quebec, Canada. 1999. P. 449-460.
11. Василенко А.Ю. Физические основы применения монокристаллов с памятью формы // Труды конф «Перспективные материалы». Псков, Россия. 1999. С.353-356.
12. Ионайтис Р.Р. Усовершенствование трубопроводных устройств (ядерной техники) нетрадиционными средствами // Атомная энергия. 1998. Т.84. Вып. 4. С. 363-366.
13. Ионайтис Р.Р., Сеницын Е.Н., Туктаров М.А., Власова Е.М. Возможности пассивной защиты кольцевых сварных соединений на основе укрепителей с памятью формы // В сб. «Безопасность трубопроводов». М.- Пушкино. 1999. Т.2. С.214-222.
14. Ionaitis R.R., et al. SM-Actuator of Power Valve // Proceedings of the SMST, Amsterdam. Sept. 1999.