

# *Раздел четвертый* **ДИАГНОСТИКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 621.039

## **ОПТИМИЗАЦИЯ СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ, ВАЖНЫХ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК**

*О.А. Чулкин*

*Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина*

*E-mail: gntcod@te.net.ua*

Предложена концепция оптимизации стратегий управления надежностью оборудования систем, важных для безопасности ядерных энергоустановок. Концепция основана на принципах приоритетности критических по надежности элементов и явлений, а также критериях оптимизации в формате «надежность–затраты». Рассмотрен пример реализации концепции оптимизации стратегий управления надежностью для системы с насосом (критический элемент) и относительно минимальной для системы надежностью при его запуске (критическое явление). В результате установлено, что оптимальная стратегия управления надежностью для такой системы определяется комплексом технических решений/мероприятий по снижению инерционности напорно-расходной характеристики насосов и установке дополнительных демпфирующих устройств.

### **АКТУАЛЬНОСТЬ**

Многолетний опыт эксплуатации украинских атомных энергоблоков с реакторами типа ВВЭР подтвердил необходимый уровень их безопасности и эффективности. Однако комплексные вопросы дальнейшего повышения безопасности и эффективности ядерной энергетики Украины продолжают быть достаточно актуальными, особенно с учетом уроков большой аварии на АЭС Fukushima-Daiichi в 2011 г. [1].

Одним из направлений дальнейшего повышения безопасности и эффективности производства ядерной энергии является разработка и внедрение концепции оптимизации стратегий управления надежностью (СУН) энергооборудования (насосы, арматура, теплообменники и т. п.) систем, важных для безопасности ядерных энергоустановок (СВБ ЯЭУ), основанной на следующих принципах.

1. Принцип приоритетности критических для безопасности систем и оборудования.

2. Принцип приоритетности критических для надежности/работоспособности явлений и факторов.

3. Принцип оптимизации, основанный на комплексном учете обоснованного повышения надежности и экономических затрат.

Концепция и принципы оптимизации СУН основаны на следующих положениях.

Показатели надежности системы определяются элементом, имеющим минимальные значения показателей надежности (критический элемент), и приоритетностью явлений, определяющих надежность критического элемента (критические явления).

Необходимо исключить СУН с относительно небольшим эффектом повышения надежности при необоснованных затратах на их реализацию.

Далее в работе рассмотрен пример реализации концепции оптимизации СУН для системы с насосом (критический элемент) и относительно

минимальной для системы надежностью при его запуске (критическое явление).

### **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ СУН ДЛЯ СВБ ЯЭУ С НАСОСАМИ. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ ОПТИМИЗАЦИИ СУН**

Анализ опыта эксплуатации АЭС с ВВЭР показывает, что критическим элементом для СВБ ЯЭУ является насосное оборудование, а критическими для надежности – гидродинамические удары (ГУ), сопровождаемые импульсным высокоамплитудным воздействием на оборудование и элементы трубопроводов (например, [2–5] и др.).

Анализ известных результатов опыта эксплуатации и моделирования ГУ в оборудовании и трубопроводах ЯЭУ с реакторами под давлением (PWR/ВВЭР) позволяет сделать следующие выводы.

Дополнительного исследования требует анализ условий и последствий ГУ в реакторном контуре, вызванных различными видами теплогидродинамической неустойчивости (ТГН) в нормальных условиях и при нарушении нормальных условий эксплуатации.

При нормальных условиях эксплуатации возникновение ГУ в реакторном контуре может также быть вызвано: термоакустической неустойчивостью при поверхностном (недогретом) кипении теплоносителя в активной зоне реактора [6]; колебательной гидродинамической неустойчивостью теплоносителя, связанной с инерционностью напорно-расходной характеристики главного циркуляционного насоса [7]; резонансными эффектами в переходных режимах пуска/остановка реактора [8] и др.

При нарушениях нормальной эксплуатации или аварийных режимах возникновение ГУ в реакторном контуре может также быть вызвано:

низкочастотной колебательной гидродинамиче-

ской неустойчивостью при авариях с течами реакторного контура, определяемой инерционностью теплообменных процессов в двухфазных потоках [9];

колебательной гидродинамической неустойчивостью, связанной с инерционностью напорно-расходной характеристики насосов активной части систем аварийного охлаждения реактора [7], и другими видами ТГН теплоносителя.

В отчетах по анализу безопасности украинских АЭС с ВВЭР при детерминистском моделировании аварий вопросы условий и последствий возможных ГУ не рассматриваются. Вместе с тем возможные ГУ могут быть как исходным аварийным событием, так и следствием развития аварийных процессов с переходом проектных аварий в статус запроектных с множественными отказами систем, важных для безопасности.

В данной работе рассматривается характерная (типичная) для ЯЭУ трубопроводная система теплотехнического оборудования (рис. 1). Условно трубопроводная магистраль разделена на подающую и напорную магистрали длиной соответственно  $L_1$  и  $L_2$ .

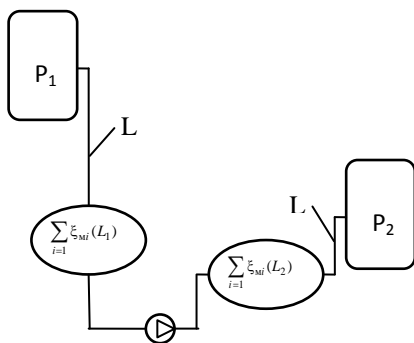


Рис. 1. Типичная трубопроводная система теплотехнического оборудования

Полагается, что необходимым условием возникновения критического по надежности гидроудара (КГУ) на рабочие элементы насосов является ТГН потока, которая заключается в отклонении гидродинамических параметров от установившихся (стабильных) значений.

Расходная (сетевая) характеристика зависимости гидродинамического напора насоса  $\Delta P_H$  от массового расхода  $G$  или средней скорости потока в трубопроводной системе  $v$

$$\Delta P_H = f(G); \Delta P_H = f(v). \quad (1)$$

Чувствительность расходной (сетевой) характеристики к изменениям расхода/скорости потока

$$f' = \frac{d\Delta P_H}{dG} \text{ или } f' = \frac{d\Delta P_H}{dv}. \quad (2)$$

Для напорных насосов проектная чувствительность расходной (сетевой) характеристики

$$f'(G, v) \leq 0. \quad (3)$$

При допущениях несжимаемости жидкости и изотермичности процессов уравнения движения потока в рассматриваемой трубопроводной системе и текущего изменения гидродинамического напора насоса имеем:

$$\rho L \frac{dv}{dt} = \Delta P_H(v) + P_1 - P_2 - \Delta P_1(v) - \Delta P_2(v), \quad (4)$$

$$\Delta P_H = \Delta P_{nm} + \int_0^t f'(v) \frac{dv}{d\tau} d\tau, \quad (5)$$

при начальных условиях

$$v(t=0) = 0, \quad (6)$$

$$\Delta P_H(t=0) = \Delta P_{nm}, \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность среды потока;  $L$  – длина трубопроводной магистрали;  $\Delta P_{nm}$  – максимально возможный гидродинамический напор насоса, определяемый его техническими характеристиками;  $t$  – текущее время;  $v$  – средняя скорость потока;  $f'$  – текущая чувствительность расходной характеристики насоса;  $P_1, P_2$  – статические давления в объектах источника и потребления соответственно (см. рис. 1).

Характерный пример решения в критериальной форме приведен на рис. 2, что позволяет сделать следующие основные выводы.

Доминирующим фактором условий возникновения гидродинамической колебательной неустойчивости однофазных потоков и критических гидроударов является инерционность расходной (сетевой) характеристики напорных насосов трубопроводных систем, определяющая «запаздывания» реакции напорно-расходной характеристики насоса на изменения гидродинамических параметров однофазного потока жидкости. При максимальной (критической) инерционности напорно-расходной характеристики амплитуды колебаний гидродинамических параметров потока достигают критических значений, при которых происходит отказ по работоспособности рабочих элементов насосов.

Возникновение критических гидроударов соответствует переходу колебательной ТГН в аperiодическую.

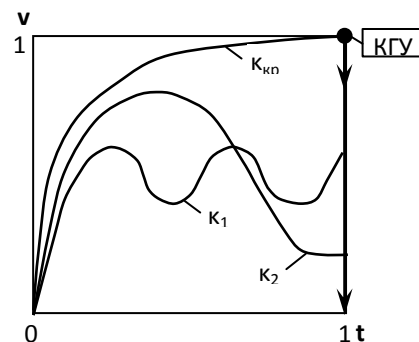


Рис. 2. Изменение средней скорости потока при ТГН с разной чувствительностью расходной (сетевой) характеристики насоса при коэффициентах линейной аппроксимации  $K_1 > K_2 > K_{кр}$

Перспективным подходом в отношении предотвращения критических гидроударов представляется приоритет использования насосов с минимальной инерционностью напорно-расходной (сетевой) характеристики (при прочих равных технических возможностях).

В качестве примера оптимизации СУН рас-

смотрим три характерных стратегии (рис. 3):

СУН1 – стратегия при минимальных затратах на модернизацию и относительно малом увеличении надежности;

СУН2 – стратегия, использующая только максимально возможные эффективные модернизации;

СУН3 – стратегия достижения максимально возможного уровня надежности.

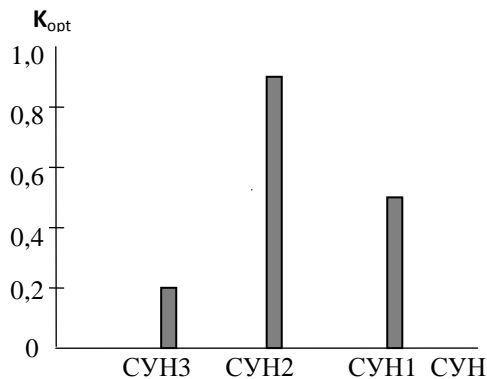


Рис. 3. Критерии оптимизации стратегий управления надежностью

Критерий оптимизации СУН [2]:

$$K_{\text{opt}} = \frac{\sum_i K_{zi} \Delta C_i}{\sum_i \Delta C_i} \rightarrow \max, \quad (8)$$

где индекс  $i$  соответствует номеру отдельной модернизации в конкретной СУН.

Определяющим параметром СУН по факторам надежности является отношение интегральных показателей неготовности выполнения назначенных функций для модернизированной  $K_n$  и проектной  $K_{n0}$  системы:

$$K_n = \frac{K_n}{K_{n0}}, \quad (9)$$

где в общем случае за период эксплуатации  $t$

$$K_n = \frac{1}{t} \int_0^t P(\tau) d\tau, \quad (10)$$

$P(\tau)$  – текущая вероятность критического отказа в различных режимах эксплуатации (рабочие, переходные, аварийные).

Определяющий параметр СУН по затратам на модернизацию – отношение затрат на модернизацию  $C$  к стоимости проектной системы  $C_0$ :

$$C = \frac{C}{C_0}. \quad (11)$$

Характерными примерами модернизаций систем насосного оборудования тепловых и ядерных энергоустановок могут быть следующие:

СУН1 – установка на выходе насоса демпфирующих предвключенных емкостей для уменьшения амплитуд колебаний давления.

СУН3 – установка на трубопроводах насосов систем аварийного охлаждения ядерного реактора дополнительной регулирующей арматуры для предотвращения «термоудара» на корпус реактора в аварийных режимах.

СУН2 – параллельное дублирование каналов трубопроводной системы с установкой демпфирую-

щих устройств до и после насосного оборудования.

Результаты оптимизации СУН показаны на рис. 3.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Предложена концепция оптимизации стратегий управления надежностью оборудования систем, важных для безопасности ядерных энергоустановок. Концепция основана на принципах приоритетности критических по надежности элементов и явлений, а также критериях оптимизации в формате «надежность–затраты».

2. Рассмотрен пример реализации концепции оптимизации стратегий управления надежностью для системы с насосом (критический элемент) и относительно минимальной для системы надежностью при его запуске (критическое явление). В результате установлено, что оптимальная стратегия управления надежностью для такой системы определяется комплексом технических решений/мероприятий по снижению инерционности напорно-расходной характеристики насосов и установке дополнительных демпфирующих устройств.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.И. Скалозубов, В.Н. Ващенко, А.А. Ключников. *Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima-Daiichi как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах*. Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2012, 280 с.
2. V.I. Skalozubov, Zhou HuiYu, O.A. Chulkin, D.S. Pirkovskiy. Optimization of Reliability in the Modernization of Heating Equipment // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science"*. 2017, N 4(110), p. 84-87.
3. В.И. Скалозубов, А.А. Ключников, Ю.А. Комаров, А.В. Шавлаков. *Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР*. Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010, 200 с.
4. 21.5.70.ОБ.02. Отчет по анализу безопасности. Анализ проектных аварий. Блок 5. Запорожская АЭС: Заключительный отчет. Энергодар: ГП НАЭК «Энергоатом», 2004.
5. 1D21DL12.DOC. Отчет по вероятностному анализу безопасности. Блок 1. Ровенская АЭС ГП НАЭК «Энергоатом», 2002.
6. Ю.Л. Коврижкин, В.И. Скалозубов. *Термоакустическая неустойчивость теплоносителя в активной зоне ВВЭР*. Одесса: ТЭС, 2003, 172 с.
7. V.I. Skalozubov, A.S. Mazurenko, O.A. Chulkin, D.S. Pirkovskiy. Hydrodynamic Impacts in Pipeline Systems Piston Pumps as a Consequence of Oscillatory Instability // *Problems of the Regional Energetics*. 2017, N 12(34), p. 98-104.
8. O.V. Korolyov, Zhou HuiYu. Dynamic damper fluctuation in the pumping systems // *Pratsi OPU*. 2016, issue 1(48), p. 35-41.
9. В.А. Герлига, В.Б. Хабенский. *Нестабильность потока теплоносителя в энергооборудовании*. М.: «Энергоиздат», 1994, 288 с.

Статья поступила в редакцию 07.06.2018 г.

ISSN 1562-6016. ВАХТ. 2018. №5(117)

## **ОПТИМІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЙ УПРАВЛІННЯ НАДІЙНІСТЮ ЕНЕРГООБЛАДНАННЯ СИСТЕМ, ВАЖЛИВИХ ДЛЯ БЕЗПЕКИ ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК**

*О.О. Чулкін*

Запропоновано концепцію оптимізації стратегій управління надійністю обладнання систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок. Концепція заснована на принципах пріоритетності критичних по надійності елементів і явищ, а також на критеріях оптимізації у форматі «надійність–витрати». Розглянуто приклад реалізації концепції оптимізації стратегій управління надійністю для системи з насосом (критичний елемент) і відносно мінімальною для системи надійністю при його запуску (критичне явище). В результаті встановлено, що оптимальна стратегія управління надійністю для такої системи визначається комплексом технічних рішень/заходів щодо зниження інерційності напірно-витратної характеристики насосів і установки додаткових демпфуючих пристроїв.

## **OPTIMIZATION OF RELIABILITY MANAGEMENT STRATEGIES FOR POWER EQUIPMENT OF SAFETY RELATED SYSTEMS AT NUCLEAR POWER PLANTS**

*O.A. Chulkin*

The concept of optimization of reliability management strategies for equipment of safety related systems at nuclear power plants is proposed. The concept is based on the principles of the priority of elements and phenomena critical for reliability, as well as on optimization criteria in the “reliability–costs” format. An example of the concept of optimization of reliability management strategies for the system with the pump (critical element) and the relatively minimal system reliability when it starts (critical phenomenon) is considered. The result found that a complex technical decisions / measures to reduce the inertia of the head-flow characteristics of the pumps and to install additional damping devices determine optimal reliability management strategy for such a system.