

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОСТАНЦИИ КАК УЧАСТНИКА ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА

А.А. Жданович, Ю.А. Секретарев

*В статье предложена модель формализации информации об эксплуатационном состоянии гидроагрегатов станции, основанная на теории нечетких множеств. Показана возможность оценки параметров контроля состояния гидроагрегатов для выявления и предотвращения возможных аварийных ситуаций. Приведены результаты моделирования на примере Новосибирской ГЭС.*

*Ключевые слова: водное хозяйство, гидростанции, оперативное управление, нечеткие множества.*

### Введение

Использование гидроэлектростанциями потенциальной энергии естественных водных потоков для получения электричества позволяет отнести их к возобновляемым источникам энергии. Что касается последних, то с каждым годом к ним приковано все больше внимания ввиду ряда их неоспоримых преимуществ.

Необходимо отметить, что гидростанции являются участником водохозяйственного комплекса (ВХК). Наряду с выполнением функции выработки электроэнергии и электроснабжения потребителей ГЭС ведет регулирование стока для водного транспорта, водоснабжения промпредприятий и городов, рыбного хозяйства, ирригации и орошения. Причем выполнение этих функций станцией является обязательным. Поэтому нарушение эксплуатационной надежности гидроагрегатов станции в том числе может создать проблемы в управлении водным хозяйством региона.

В течение последних нескольких лет ОАО «РусГидро» выделяются значительные средства как на строительство новых станций, среди которых мощные (Бурейская, Богучанская ГЭС) и малые ГЭС (Чибит и др.) [1], так и на модернизацию и расширение существующих ГЭС. Одним из приоритетных направлений при модернизации гидростанций является разработка и внедрение новых проектов системы мониторинга режимов работы и состояния гидроагрегатов с фиксацией и сохранением параметров. Необходимость создания таких систем подтверждена документально [2].

Сказанное выше позволяет говорить об актуальности проведения исследований в

области повышения эффективности работы ГЭС. Представленные исследования посвящены разработке моделей контроля гидроагрегата с учетом их эксплуатационного состояния.

### Управление на ГЭС

Объектом исследования является контроль эксплуатационного состояния гидроагрегатов. Контроль является одной из важнейших задач управления. В качестве видов управления нормальными режимами ГЭС выступают следующие: 1. автоматическое регулирование; 2. оперативное управление, которое имеет различные контуры: планирование; корректировка плана по факту; превентивное (предупредительное) управление.

При оперативном управлении начальник смены станции (лицо, принимающее решение, далее ЛПР) должен удерживать, анализировать и принимать решение по большому кругу вопросов, так как управление ведется в изменяющихся условиях. Недооценка одних ситуаций и переоценка других ЛПР может привести к нарушению надежности и экономичности работающего оборудования, а в некоторых случаях, к катастрофе [2].

Это делает необходимым повышение адаптивных свойств информации о текущей ситуации на таком этапе управления, как выбор и принятие решения, где информация обрабатывается человеком. Решением этой задачи может быть подсистема интеллектуальной поддержки принятия решений (ИНПОР).

Проведенные исследования показали, что именно в контуре превентивного управления наиболее эффективна подсистема ИНПОР [3].

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОСТАНЦИИ КАК УЧАСТНИКА ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА

Превентивное управление представляет большой интерес с точки зрения обеспечения надежности и безопасности работы оборудования. Основными инструментами превентивного управления являются мониторинг, диагностирование, прогнозирование изменения текущей ситуации на объекте и своевременная реализация управляющих воздействий, направленных на возвращение объекта в нормальное состояние.

Для работы в контуре превентивного управления необходима систематизация информации о показателях эксплуатационного состояния гидроагрегата и оперативная комплексная оценка всех факторов. Причем представление этой информации должно быть понятным для ЛПР. Поэтому целесообразно использование в контуре АСУ ТП ГЭС подсистемы ИНПОР, которая могла бы на базе получаемой информации выдавать «совет» по изменению текущей ситуации на этапе выбора и принятия решений. Для работы такой подсистемы необходимо создание моделей информационного описания эксплуатационного состояния ГЭС.

### Моделирование ситуации на гидроагрегате

Символическое описание процесса управления ЭС выглядит так:

$$S : S_t \times S_t^{\ominus} \times S_t^H \xrightarrow{U} S_{t+1}^C, \quad (1)$$

где  $S$  – полная ситуация;  $S_t$  – текущая ситуация на ЭС, сформулированная в виде требований, которые предъявляются к работе электростанции по условиям покрытия активной и реактивной нагрузок;  $S_t^H$ ,  $S_t^{\ominus}$  – текущие ситуации, связанные с фактическим режимом станции, которые определяются экономической и надежностью работающего на ней оборудования;  $U$  – вектор многоцелевого управления;  $S_{t+1}^C$  – новая текущая ситуация на станции как декартово произведение предшествующих.

Текущие ситуации на станции (режим работы)  $S_t^{\ominus}$  и  $S_t^H$  определяются рядом экономических и надежностных параметров  $R_3^*$  и  $R_n^*$ , которые характеризуют фактическое состояние работающего оборудования в момент времени  $t$  (главным образом, речь идет о гидроагрегате (ГА), который является важнейшим элементом станции). В связи с этим возникает закономерный вопрос о размерности режимных параметров, контроль которых позволяет определить  $R_3$  и  $R_n$  и на их основании получить оценки ситуаций  $S_t^{\ominus}$  и  $S_t^H$ .

В отличие от экономических режимные параметры, характеризующие эксплуатационную надежность ГА, достаточно многочисленны. Они образуют многомерное пространство вида

$$R_n = (R_m, R_b, R_{эл}, R_y, R_{np}), \quad (2)$$

где  $R_m$ ,  $R_b$ ,  $R_{эл}$ ,  $R_y$ ,  $R_{np}$  – параметры температурного, вибрационного, электрического состояний, параметры, характеризующие отклонение уровней воды и масла, давления воздуха на контролируемых узлах гидроагрегата (ГА), а также ряд прочих параметров соответственно.

Отсутствие строгих моделей расчета текущего износа энергетического блока делает необходимым косвенный учет эксплуатационной надежности на основе контроля изменения многочисленных параметров в соответствии с (2). Это требует разработки специальных процедур их получения, приведение параметров к единой размерности, а также ранжированию контролируемых параметров, так как степень их информационной ценности для принятия решения в контуре оперативного управления в общем случае различна.

### Оценка эксплуатационного состояния ГА

Предлагается методика оценивания контролируемых параметров, характеризующих эксплуатационное состояние ГА, реализация которой подразумевает несколько этапов:

1. Оценка важности контролируемых параметров блока П (с точки зрения их информационной ценности для принятия решения) вне зависимости от текущей ситуации, а определяемой только степенью ответственности контроля за отдельным узлом гидроагрегата. Такую оценку можно назвать «базовой»:

$$B(\Pi_i) = (R_n, i = 1, \dots, n), \quad (3)$$

где  $i$  – номер контролируемого параметра П, определяющего эксплуатационную надежность агрегата  $R_n$ .

2. Получение «текущих» оценок, которые характеризуют степень эксплуатационной надежности агрегата в момент принятия решения  $t$ . Очевидно, что эти оценки непосредственно определяются текущей ситуацией на станции.

$$T(\Pi_j) = (R_n, j = 1, \dots, k), \quad (4)$$

где  $j$  – номер контролируемого параметра П, значение которого в текущий момент времени

$t$  отклоняется (или не отклоняется) от номинального значения.

3. Определение «*результатирующих*» оценок эксплуатационной надежности для каждого работающего в данный момент времени гидроагрегата. Они могут быть получены путем наложения «текущих» оценок контролируемых параметров на их «базовые», в частности, в виде произведения

$$J(\Pi_i) = (R_n, B(\Pi_i) \times T(\Pi_i), i=1, \dots, n). \quad (5)$$

Это будет означать формирование некоторого уровня описания, который является проекцией отображения в общем информационном пространстве режимных параметров станции. На основе  $J(\Pi_i)$  ЛПР может принять решение, связанное с изменением или неизменением работающего на станции оборудования, а также оценить состояние агрегата с целью вывода или невывода в ремонт.

Рассмотрим, как эти этапы будут реализованы для подсистемы ИНПОР.

#### Представление параметров эксплуатационного состояния ГА в виде нечетких интервалов

Параметры, характеризующие эксплуатационную надежность ГА, имеют различную размерность; их оценивание проходит в три этапа, поэтому можно сделать вывод о том, насколько сложным является процесс оценки ситуации из-за объемов информации и сложности ее взаимоувязки.

Для решения этой задачи воспользуемся теорией нечетких множеств, позволяющей унифицировать значения параметров и создать единое информационное пространство [3].

Целесообразность использования теории нечетких множеств обусловлена и тем, что принятие решений в режиме превентивного управления, как правило, характеризуется неполнотой информационного описания, разнообразием ситуаций и состояний, а также присутствием субъективной интерпретации информации ЛПР.

Согласно разработанному методу, все параметры были представлены в виде нечетких интервалов [3]. Исходной информацией для построения последних послужили объективные данные карт уставок релейной защиты и автоматики НГЭС. Эти параметры были переведены в нечеткие единицы и, были получены функции принадлежности.

На рисунке 1 показан пример представления параметра «Уровень масла в котле

маслонапорной установки (МНУ)» в виде нечеткого интервала. Отклонение значений этого параметра в сторону увеличения или снижения относительно допустимой величины приведет к ухудшению работы (имеется 2 уставки), следовательно, параметр может быть представлен трапециевидным нечетким интервалом. Трапециевидный нечеткий интервал описывается двумя функциями принадлежности.

Таким образом, можно получить функции принадлежности для других параметров контроля эксплуатационного состояния агрегатов ГЭС.

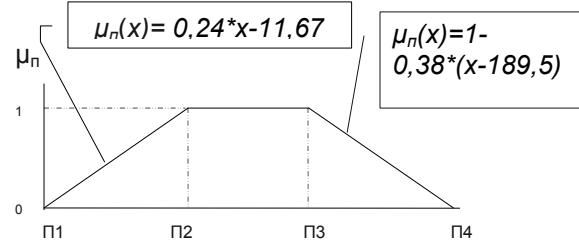


Рисунок 1 – Графическая и математическая формы функции принадлежности параметра «Уровень масла в котле МНУ»

Важно, что полученные выражения не имеют размерности, поэтому их удобно сравнивать между собой, определять наиболее приоритетные, а также реализовывать этапы оценки (3)-(5).

#### Расчет результирующей оценки эксплуатационного состояния гидроагрегата станции

Общую оценку ситуации по состоянию параметра в частности и ГА в целом может дать результирующая оценка, которая позволит оценить ситуацию с учетом текущего состояния.

Результирующая оценка в соответствии с (5) представляет собой произведение базовой оценки  $B(\Pi_i)$  на текущую  $T(\Pi_i)$ . Поэтому ее получение зависит от используемых процедур (моделей) получения базовых и текущих оценок.

Наиболее целесообразным способом определения результирующих оценок, характеризующих эксплуатационное состояние агрегата является подход на основе теории нечетких множеств. Для такого утверждения есть следующие основания:

1. Единый информационный и методологический подход к определению как базовых, так и текущих оценок эксплуатационной надежности на основе теории возможностей.

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОСТАНЦИИ КАК УЧАСТНИКА ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА

2. Объективность получения оценок  $V(\Pi_i)$  и  $T(\Pi_i)$ , так как построение и расчет нечетких интервалов опирается на используемые на станции способы настройки автоматических устройств контроля состояния оборудования. Перенастройка устройств контроля, связанная с изменением номинального диапазона или уставок отключения, приводит к простому пересчету параметров тех нечетких интервалов, для которых она имела место.

3. Отсутствие громоздких расчетов, связанных со статистической обработкой случайных изменений значений контролируемых параметров, простота расчета.

Методика расчета и пример получения базовых оценок  $V(\Pi_i)$  на основе теории нечетких множеств представлены в [3]. Полученные оценки неизменны, т.к. не зависят от текущей ситуации. Отметим, что эта оценка принимается неизменной и зависит только от уставки защиты оборудования, т.е. её изменение возможно только в случае, если изменится функция принадлежности этого параметра.

Что касается текущей оценки  $T(\Pi_i)$ , то модель ее получения будет зависеть от типа нечеткого интервала параметра [4].

Ввиду отсутствия на ГЭС представительной статистики по величине текущих значений параметров  $\Pi_i$  (в первую очередь это касается ситуаций, когда текущее значение выходит за пределы своего номинального диапазона), эти величины были смоделированы. Наиболее объективным, по мнению авторов, в этом случае является моделирование по равномерному закону распределения величины.

Учитывая единую информационно-диагностическую ценность базовых и текущих оценок, суть которой может быть сформулирована как определение наихудшего режимного параметра с точки зрения эксплуатационной надежности работы агрегата, необходимо осуществить преобразование текущих оценок в виде  $(1-\mu_i)$ . Имея в виду условие нормирования нечетких интервалов, это преобразование является строгим.

Рассмотрим пример получения результирующих оценок параметра контроля эксплуатационного состояния гидроагрегата «Уровень масла в котле МНУ», функции принадлежности которого описаны выше.

Смоделированы 8 случайных значений фактической величины уровня в котле МНУ в  $\text{м}^3$  в диапазоне, отличном от нормального, 4 из которых характеризуют отклонение параметра в сторону увеличения, 4 – в сторону

уменьшения относительно номинального диапазона работы. И тот и другой случай приводит к ухудшению работы, а значит к срабатыванию сигнала.

Затем получены приведенные значения  $T_n$  в о.е., которые также находятся в диапазоне от 0 до 1. Результирующие оценки для каждого параметра получены путем наложения базовой оценки  $V_n$  на текущую  $T_n$ . Параметр представлен двумя базовыми оценками, т.к. имеет две функции принадлежности. Результаты расчета сведены в таблицу 1.

Проанализируем результаты. Из таблицы 1 видно, что, несмотря на относительно высокий базовый показатель, при незначительных отклонениях от номинала текущего значения итоговые результирующие оценки также малы. Чем ближе результирующая оценка к нулевому значению, тем лучше состояние параметра. Если результирующая оценка равно 0, значит отклонений нет.

Например, если текущее значение выросло относительно номинального диапазона и стало равным  $7,217 \text{ м}^3$ , то результирующая оценка ситуации равна 0,017, что говорит о том, что большой опасности такое отклонение этого параметра не представляет. Действительно, нормальный диапазон работы находится в интервале  $[3,8; 7,2]$ , и отклонение в  $0,017 \text{ м}^3$  незначительно.

Снижение параметра относительно номинального диапазона также повлечет за собой появление результирующей оценки, и чем ниже текущее значение, тем выше величина результирующей. Например, при текущем значении объема  $3,771 \text{ м}^3$ , когда отклонение от нормального диапазона составляет  $0,009 \text{ м}^3$ , результирующая оценка с учетом базовой ценности параметра будет равной 0,031, что также означает, что большой опасности такая ситуация не представляет. Если же текущее значение равно  $3,528 \text{ м}^3$ , в то время как критическим является значение  $3,5 \text{ м}^3$ , результирующая оценка возрастает на порядок и равна 0,275, что фактически равно базовой оценки параметра.

Так значение результирующей оценки параметра контроля состояния  $J_n$  позволяет судить о текущей ситуации на элементе ГА.

Суммируя результирующие оценки всех параметров гидроагрегата, можно получить результирующую оценку по каждому гидроагрегату. Эта величина позволит судить об эксплуатационном состоянии на блоке с учетом всех параметров. Зная величины  $J$  для всех агрегатов станции можно решать различные задачи управления.

Таблица 1 – Моделирование и расчет оценок параметра контроля эксплуатационного состояния гидроагрегата «Уровень масла в котле МНУ»

Параметр состояния	Мера возможности ухудшения работы, базовая оценка (о.е.), $V_n$	Текущая оценка, $T_n$			Результующая оценка $J_n = V_n * T$
		Фактическое значение $x$ , м <sup>3</sup>	Приведенное значение $x$ , о.е.	$1-\mu(x)$	
Аварийный уровень в котле МНУ	Снижение параметра $V_n = 0,303$	3,528	49,004	0,909	0,275
		3,610	50,143	0,636	0,193
		3,771	52,371	0,101	0,031
		3,636	50,499	0,550	0,167
	Увеличение параметра $V_n = 0,105$	7,293	191,932	0,924	0,097
		7,266	191,199	0,645	0,068
		7,217	189,924	0,161	0,017
		7,203	189,557	0,022	0,002

### Выводы

По результатам приведенных в статье исследований можно сделать следующие выводы:

1. Создание и использование в АСУТП ГЭС подсистемы интеллектуальной поддержки принятия решения на основе расширения информационных возможностей и использования более гибких критериев управления позволит существенно повысить эффективность, безопасность и надежность работы ГЭС.

2. Основными принципами работы подсистемы ИНПОР являются следующие: работа такой подсистемы наиболее целесообразна в контуре превентивного управления; интерпретация информации для этой подсистемы осуществляется на основе моделей теории нечетких множеств.

3. Предложена модель результирующей оценки текущего эксплуатационного состояния гидроагрегата, основанная на учете состояния всех параметров контроля. Эта модель позволяет решать различные задачи управления, например выбора наилучшего состава работающих агрегатов и др.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киров, С.М. 408 миллиардов на будущее

/ С.М. Киров // Вестник РусГидро. – Изд-во РусГидро, 2010. – № 9. – С. 4.

2. Акт технического расследования причин аварии, произошедшей 17.08.2009 в филиале ОАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС им. П.С. Непорожного» // Доклад Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору России (Ростехнадзор): <http://www.gosnadzor.ru/>

3. Жданович, А.А. Основные принципы и модели превентивного управления гидроагрегатами с учетом их эксплуатационного состояния / А.А. Жданович, Ю.А. Секретарев // Журнал СФУ, г. Красноярск: Изд-во СФУ, 2010. – Т. 3. – № 3. – С. 322-334.

4. Секретарев, Ю.А. Ситуационное управление энергетическими объектами и процессами электроэнергетической системы: монография / Ю.А. Секретарев, С.А. Диденко и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 308 с.

**Жданович А.А.**, ст. преп. каф. «Системы электроснабжения предприятий», Новосибирский государственный технический университет, тел. 8(383)346-15-51, E-mail: [zhdanovich1985@mail.ru](mailto:zhdanovich1985@mail.ru);

**Секретарев Ю.А.**, д.т.н., проф., зав. каф. «Системы электроснабжения предприятий», Новосибирский государственный технический университет, тел. 8(383)346-15-51, E-mail: [uas@merlin.nstu.ru](mailto:uas@merlin.nstu.ru).