

УДК 630.311.29

Методика формирования обобщенного критерия состояния гидроагрегатов ГЭС на основе критериев эксплуатационной надежности и экономичности

Ю.А. СЕКРЕТАРЁВ, С.В. МИТРОФАНОВ

Рассмотренная в данной статье методика позволяет производить оценку состояния гидроагрегатов ГЭС на основе критерия эксплуатационной надежности гидроагрегата и его проточного тракта, а также критерия экономичности режима работы гидроагрегата. Полученные оценки могут быть использованы для решения задачи выбора гидроагрегатов станции, эксплуатация которых наиболее или наименее целесообразна при изменении нагрузки в энергосистеме. Решение данной задачи позволит сформировать основные принципы программного комплекса управления составом агрегатов станции, который может быть использован для создания подсистемы интеллектуальной поддержки оптимальных решений (ИНПОР) на базе АСУ ТП ГЭС.

Работа разделена на несколько разделов. В разделе «введение» описаны основные подходы к управлению составом агрегатов ГЭС. Раздел «постановка задачи» содержит основные положения представленной методики и формализованные стратегии управления агрегатами ГЭС на основе двух критериев. В разделе «результаты исследований» в качестве примера будет рассмотрена реализация принципов рассматриваемой методики на Саяно-Шушенской гидроэлектростанции. Раздел «заключение» содержит основные результаты по проделанной работе.

Ключевые слова: гидроэлектростанция, автоматизированное управление, выбор состава агрегатов ГЭС, многокритериальный подход, теория нечётких множеств.

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря своей высокой маневренности и возможности работать в пиках графиков нагрузки ГЭС способны брать на себя задачи обеспечения нагрузочного резерва и быстро реагировать на изменение потребления мощности в энергосистеме.

На ГЭС чаще, чем на других электростанциях происходит перераспределение нагрузки и соответственно ввод в работу либо отключение гидроагрегатов. Иногда количество подобных «включений / отключений» агрегатов за смену может достигать десятка раз.

В таких условиях становится актуальной задача оптимизации состава гидроагрегатов находящихся в работе на станции.

При реализации управления составом агрегатов встает проблема наличия большого количества критериев, по которым осуществляется выбор, таких как надежность оборудования, экономичность режима работы, выполнение требований энергосистемы, влияние на экологию и т. д. Успех в решении данной проблемы напрямую зависит от способа оптимизации на станции.

На сегодняшний день существуют два подхода к решению данной задачи: оптимизация по одному доминирующему критерию; многокритериальная оптимизация.

Первый способ часто реализуется в системах автоматического регулирования. Наиболее известны следующие метод однокритериальной оптимизации состава агрегатов на электростанции: метод узлов и ветвей, метод динамического программирования, лексикографический метод и т. д. [7, 8, 9]. В качестве основного критерия при реализации данных методов в большинстве случаев выбирается критерий экономичности, который выражается с помощью удельного расхода через турбины. Такой способ удобен для небольших ГЭС, которые имеют малую мощность и не выполняют регулирующих функций в энергосистеме. Однако неучёт,

упрощение и перевод в ограничения остальных критериев может привести к серьёзным нарушениям в нормальной работе на крупных гидроэлектростанциях.

В данном случае более приемлем способ оптимизации при учёте нескольких критериев. Этот способ не позволяет достичь лучших результатов по любому из рассматриваемых критериев, но он даёт возможность найти компромисс между ними и принять решение, которое в достаточной степени удовлетворит все рассматриваемые критерии [3].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве основных критериев, по которым будет производиться оптимизация, выбраны эксплуатационная надёжность и экономичность режима работы гидроагрегатов. Выбор не случаен, поскольку при принятии решения оперативный персонал рассматривает эти два критерия как основные.

В общем виде процесс управления составом агрегатов станции при двухкритериальном управлении может быть представлен в виде следующего выражения:

$$U^* = DE_2(KS_{\Sigma}, KS_H); \quad (1)$$

где KS_H , KS_{Σ} – критерии текущей ситуации, определяющие эксплуатационную надёжность и экономичность режима работы станции; DE_2 – свертка, описывающая формирование единого критерия управления гидроагрегатом на основе двух критериев.

Параметры, характеризующие эксплуатационную надёжность гидроагрегата, достаточно многочисленны и образуют и имеют различную размерность и диапазоны измерений, образующие многомерное пространство вида:

$$R_H = (R_T, R_B, R_{\Sigma}, R_Y, R_{\text{ПГТ}}, R_{\text{ПР}}),$$

где R_T , R_B , R_{Σ} , R_Y , $R_{\text{ПГТ}}$, $R_{\text{ПР}}$ – параметры температурного, вибрационного, электрического состояний, параметры, характеризующие отклонение уровней воды и масла, давления воздуха на контролируемых узлах, а также ряд прочих.

Для высоконапорных ГЭС также является актуальным учёт параметров проточного тракта гидротурбины.

В общем виде процесс формирования обобщенного критерия может быть записан в следующем виде:

$$\forall k = 1, \dots, m; m \leq Z_{\max}; L_{Vkj} = 1 - \max(J_k(\Pi_i)),$$

где $i = 1, \dots, n$ – количество контролируемых параметров эксплуатационной надёжности; $J_k(\Pi_i)$ – значения результирующих оценок параметров гидроагрегатов.

$$J_k(\Pi_i) = B_k(\Pi_i)T_k(\Pi_i),$$

где $B_k(\Pi_i)$ и $T_k(\Pi_i)$ – базовые и текущие оценки эксплуатационной надёжности на k -м агрегате.

Более подробно с методикой формирования базовых, текущих и результирующих оценок можно познакомиться в работах [1, 4, 5, 6].

В качестве обобщенного критерия выбирается параметр, результирующая оценка которого наиболее близка к аварийному состоянию.

Экономичность режима работы гидроагрегатов определяется их коэффициентом полезного действия (КПД). Однако для сравнения таких разнородных параметров, как эксплуатационная надёжность и КПД гидроагрегата, необходимо выполнить приведение КПД к единым безразмерным единицам.

Условие нормировки и линеаризации КПД может быть записано следующим образом:

$$\forall k = 1, \dots, m; m \leq Z_{\max}; L_{Ukj} = \Delta a - (\eta^* - \eta_{\min})\Delta a / \Delta \eta,$$

где $\Delta \eta = (\eta_{\max} - \eta_{\min})$ представляет собой размах вариации КПД на работающих в данный момент агрегатах; η^* – фактический КПД на k -м работающем агрегате; $\Delta a = (a_{\max} - a_{\min})$ – раз-

мах вариации в лингвистических оценках экономичности на станции, который определяется следующим образом:

$$\eta_{\max} \rightarrow (a_{\max} = 1); \eta_{\min} \rightarrow (a_{\min} = 0,5).$$

Значения КПД ограничены нижним порогом 0,5. В нормальном установившемся режиме эксплуатация гидроагрегата с меньшим значением КПД нецелесообразна.

Более подробно с методикой формирования критериев эксплуатационной надежности и экономичности можно познакомиться в работах [1, 2, 4, 5, 6].

Полученные значения критериев эксплуатационной надежности (V) и экономичности (U) для всех агрегатов могут быть использованы для нахождения результирующей оценки эффективности работы для каждого из них с целью дальнейшего выбора номера агрегата, эксплуатация которого наиболее или наименее целесообразна.

Следует отметить, что персонал разных станций в различной степени оценивает важность параметров надежности и экономичности по отношению друг к другу. Вследствие этого для формирования поля типовых решений необходимо охватить как можно больший диапазон изменения ситуаций по каждой цели и выявить на их основе критерии, которые использует персонал станции (лицо принимающее решение, ЛПР) для достижения двух взаимно противоречивых целей при управлении.

Для формализации возможных типовых решений может быть использована процедура свёртывания критериев эксплуатационной надежности и экономичности.

К сожалению, законы формальной логики не позволяют охватить всё пространство возможных вариантов управления ЛПР агрегатами ГЭС. Число возможных свёрток в этом случае ограничивается лишь двумя: поиск минимума $h = \min(U, V)$ и поиск максимума $h = \max(U, V)$. Использование этих свёрток приводит к жесткому доминированию одного из критериев и полному исключению компромисса между ними. Когда же цели приобретают некоторые градации, связанные со степенью их достижения, стремление к компромиссу становится одной из естественных линий поведения ЛПР [2].

Математический аппарат для решения этой задачи предоставляет теория возможностей.

Предложенная для оценки целей лингвистическая шкала уровней совместимости (табл. 1) позволяет значительно расширить множество возможных решений управления составом агрегатов ГЭС.

Таблица 1

Лингвистическая шкала оценок

Уровень совместимости с целью	Числовое значение	Лингвистическая оценка
А. Полная совместимость	1	Отлично
В. Большая совместимость	0,75	Хорошо
С. Средняя совместимость	0,5	Достаточно хорошо
Д. Малая совместимость	0,25	Удовлетворительно
Е. Несовместимость	0	Плохо

Имея широкий спектр операций, выражающих различные возможные стратегии поведения ЛПР и дискретизированную шкалу их оценки, возможно, рассмотреть варианты идентификации стратегии управления с помощью вопросника, предъявляемого ЛПР.

Для идентификации целей ЛПР в управлении агрегатами ГЭС могут быть представлены 4 возможные типовые ситуации (табл. 2).

Таблица 2

Оценка целей в различных ситуациях

Цели	Ситуация 1	Ситуация 2	Ситуация 3	Ситуация 4
Цель U	Плохо (0)	Средне (0,5)	Средне (0,5)	Плохо (0)
Цель V	Отлично (1)	Средне (0,5)	Отлично (1)	Средне (0,5)

Ситуация 4 является наименее эффективной с позиции управления гидроагрегатами станции. Очевидно, что гидроагрегат, обладающий плохой надежностью и средней экономичностью стоит отключать в первую очередь. Вследствие этого ситуация 4 исключена из рассмотрения.

Полученная матрица из трех типовых (табл. 3) ситуаций охватывает 39 возможных вариантов ответов, что позволяет в полной мере описать практически все возможные варианты управления на ГЭС.

Таблица 3

Оценка целей в различных ситуациях

Цели	Ситуация 1	Ситуация 2	Ситуация 3
Цель U (надежность гидроагрегата)	Плохо (0)	Средне (0,5)	Средне (0,5)
Цель V (экономичность гидроагрегата)	Отлично (1)	Средне (0,5)	Отлично (1)
Общая оценка состояния гидроагрегата	Заполняется ЛПР		

Тройки ответов по трём типовым ситуациям позволяют определить стратегию, которой придерживается ЛПР при управлении гидроагрегатами ГЭС. Каждая стратегия выражается в виде свёртки критериев эксплуатационной надежности и экономичности.

При анализе ответов ЛПР могут быть введены три категории свёрток целей: точные, близкие и достаточно близкие.

1. Точные свертки – это свертки, погрешность которых по оценкам ЛПР для всех трёх ситуаций составляет не более 0,125.

2. Близкие свертки – погрешность одной из оценок (любой) не более 0,25, а двух других не менее 0,125 (средняя погрешность равна 0,167).

3. Достаточно близкие свертки – погрешность одной из оценок не более 0,125, а двух других – не более 0,25 (средняя погрешность – 0,208).

При этом следует отметить, что иногда ЛПР в процессе идентификации целей принимает решения, которые противоречат законам логики, поэтому для получения корректных результатов экспертизы должны выполняться два правила:

Правило 1. Оценка обобщенной цели по ситуации 3 не может быть ниже оценки «достаточно хорошо», т. е.:

$$h(C, A) \geq C ;$$

Правило 2. Оценка обобщенной цели по ситуации 3 может быть больше наибольшей из оценок по ситуациям 1 и 2, или равна ей, т. е.:

$$h(C, A) \geq \max(h(E, A), h(C, C)) .$$

Руководствуясь данными правилами при идентификации целей, возможно, достаточно точно определить тип свёртки, описывающей стратегию управления каждого ЛПР.

В [1] предложен набор из 17 свёрток критериев, которые характеризуют возможные стратегии управления на ГЭС в зависимости от полученных при проектировании троек ответов по трём типовым ситуациям (табл. 4).

Таблица 4

Виды свёртывания критериев

Математический вид свёртки критериев	Ответы, описываемые точными свёртками	Ответы, описываемые близкими свёртками	Ответы, описываемые достаточно близкими свёртками
$\max(0, U + V - 1)$ $U \cdot V$	EEC EDC	DEC EEB EDB	DEB
$\min(U, V)$	ECC		
$\sqrt{UV}$ $(2UV)/(U + V)$	ECB	ECA EBB	EDA EBA
$\text{med}(U, V, 1/4)$	DCC	DCB DDC	DDB EBA
$\min(UV)/(1 - U - V)$ $\text{med}(U, V, 1/2)$	CCC	CDC	
$(U + V - UV)/(1 + U + V - 2UV)$ $(U + V)/2$ $\max(UV)/(1 + U - V)$	CCA	CBA CBA DCA	DBA DDA
$(U + V - UV)/(1 + U + V - 2UV)$	CCA	CBA CDA DCA	DBA DDA
$\text{med}(U, V, 3/4)$	BCB	BCA BBB BDB	BDA
$1 - \sqrt{(1 - U)(1 - V)}$ $\max(U, V)$	ACA	ADA	
$U + V - UV$	ABA	BBA	
$\max(1, U + V)$	AAA	AAB	

После того, как выбран тип свёртки для процедуры формирования единого критерия управления и на её основе сформированы единые оценки состояния каждого гидроагрегата, встаёт задача непосредственного выбора номера агрегата, эксплуатация которого наиболее или наименее целесообразна.

Полученное в результате значение номера агрегата передаётся ЛПР, который вправе согласиться с ним или проигнорировать. Однако в противном случае вся ответственность за неправильное решение ложится на плечи ЛПР.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения возможных моделей поведения оперативного персонала СШГЭС при выборе оптимального состава агрегатов была проведена экспертиза, в рамках которой были опрошены 11 начальников смен станции и диспетчеров ЦПУ.

Каждым экспертом были представлены ответы по каждой из 3 предложенных ему типовых ситуаций. Полученные результаты сведены в табл. 5.

Таблица 5

Ответы, полученные от экспертов СШГЭС

№ Эксперта	Оценка 1 ситуации	Оценка 2 ситуации	Оценка 3 ситуации
1	Е	С	В
2	Е	В	А
3	Е	Д	С
4	Е	Д	В
5	Д	В	А
6	Е	С	А
7	Е	Д	В
8	Е	С	В
9	Д	С	А
10	Е	С	С
11	Е	С	В

Из полученных обобщённых оценок можно сделать вывод, что:

– ответы, представленные экспертами № 1, № 8 и № 11, точно указывают на необходимость применения в выборе состава агрегатов стратегии управления, описываемой свёртками

$\sqrt{UV}$ и $\frac{2UV}{(U+V)}$ – среднее геометрическое и среднее гармоническое (рис. 1 и 2).

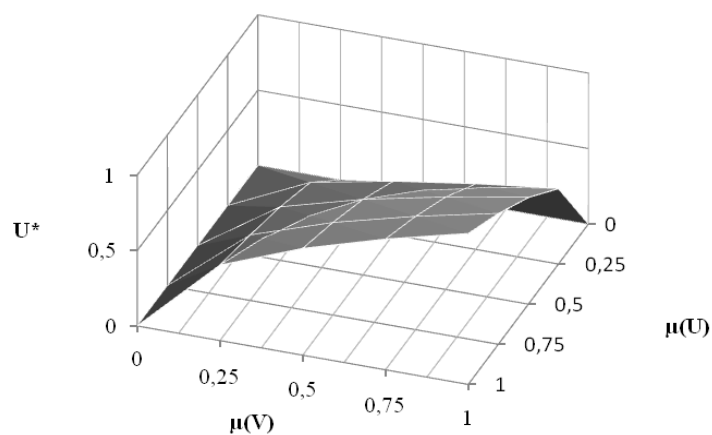


Рис. 1. Свёртка «среднее геометрическое»

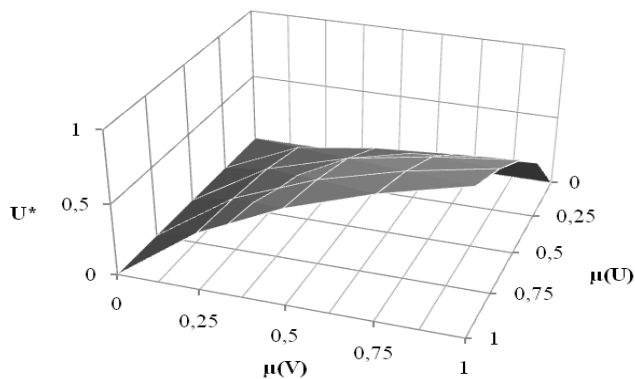


Рис. 2. Свёртка «среднее гармоническое»

Также близким данной свёртки является ответ данный экспертом № 9 и достаточно близкими является ответ эксперта № 2.

– Обобщенная оценка, полученная от эксперта № 3, указывает на необходимость использования в управлении свёртки UV – строго монотонная операция пересечения (рис. 3).

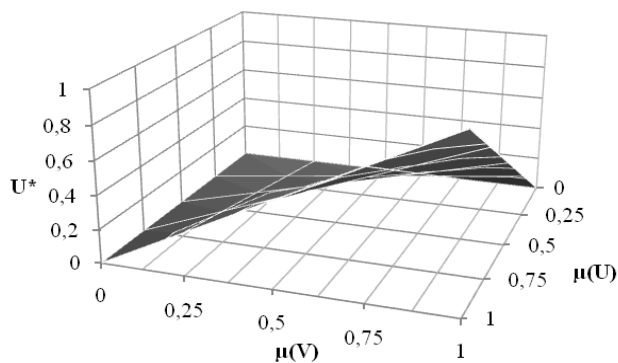


Рис. 3. Свёртка «строго монотонная операция пересечения»

Помимо эксперта № 3 эксперты № 4 и № 7 также дали ответы близкие к данной свёртке.

– Полученные данные от эксперта № 10 указывают на необходимость использования в управлении свёртки $\min(UV)$ – идемпотентная операция пересечения (рис. 4).

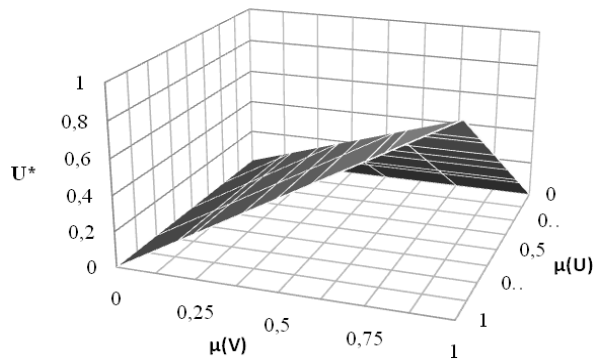


Рис. 4. Свёртка «идемпотентная операция пересечения»

Ответы, полученные от экспертов № 5 и № 9, не указывают точно ни на одну из имеющихся свёрток. Однако оба эти ответа являются близкими к свёртке $\left(\frac{U+V-UV}{1+U+V-2UV} \right)$ – неассоциативная симметрическая сумма (рис. 5).

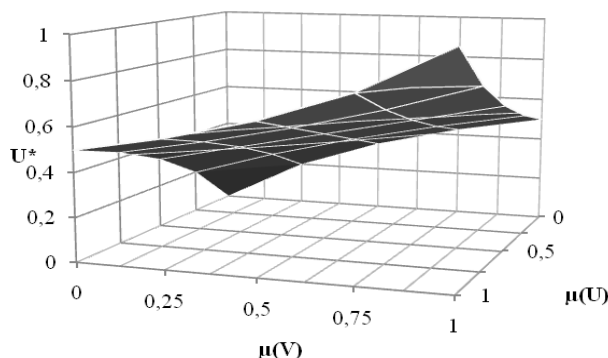


Рис. 5. Свёртка «неассоциативная симметрическая сумма»

Из 17 свёрток наиболее актуальными для экспертов СШГЭС являются 4. Результаты оценки ответов сведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты анализа ответов персонала СШГЭС

№	Тип свёртки	Кол-во точных ответов	Кол-во ответов, описываемых близкими свёртками	Кол-во ответов, описываемых достаточно близкими свёртками
1	Среднее геометрическое и среднее гармоническое $\sqrt{UV}$, $\frac{2UV}{(U+V)}$	3	2	0
2	Строго монотонная операция пересечения UV	1	2	0
3	Идемпотентная операция пересечения $\min(U, V)$	1	0	0
4	Неассоциативная симметрическая сумма $\left(\frac{U+V-UV}{1+U+V-2UV} \right)$	0	2	0

1. Свёртки $\sqrt{UV}$ и $\frac{2UV}{(U+V)}$ характеризуется наиболее компромиссной стратегией в управления составом агрегатов. В значительной степени учитываются значения как критерия эксплуатационной надежности, так и критерия экономичности гидроагрегатов. Однако при этом приоритет критерия эксплуатационной надежности всё же доминирует в малой степени.

2. Стратегия управления, реализуемая с помощью свёртки UV , практически полностью ориентирована на управление гидроагрегатами при полном доминировании критерия эксплуатационной надежности. Критерий экономичности режима работы в этом случае отходит на второй план.

3. Свёртка $\min(U, V)$ также характеризует приоритет критерия эксплуатационной надёжности над критерием экономичности в управлении составом агрегатов, однако она не столь категорична как свёртка UV и оставляет значительно больше пространства для поиска компромиссных решений.

4. Свёртка $\left(\frac{U + V - UV}{1 + U + V - 2UV} \right)$ реализует стратегию управления, при которой параметры эксплуатационной надёжности и экономичности учитываются в равной степени. При её реализации решение задачи выбора гидроагрегата на станции, эксплуатация которого наиболее или наименее целесообразна, крайне затруднительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог по проделанной работе можно сформулировать следующие выводы.

1. Использование процедуры свёртывания критериев позволяет получить простую и удобную для восприятия ЛПР систему оценок состояния гидроагрегатов на ГЭС.

2. Проведение процедуры идентификации свёрток для каждой конкретной станции позволяет формализовать стратегию двухкритериального управления агрегатами ГЭС в виде логико-множественной операции, вид которой определяется на основе степени приоритетности параметров эксплуатационной надёжности и экономичности режима работы агрегатов.

3. Инструментом идентификации свёрток является экспертиза на гидроэлектростанции.

4. Также в работе рассмотрен алгоритм выбора номера агрегата, эксплуатация которого наиболее или наименее целесообразна, на основе полученных свёрток критериев. Выбор производится в момент изменения ситуации на станции.

5. В качестве объекта для проведения исследований выбрана Саяно-Шушенская ГЭС. Результаты проведённой экспертизы указывают, что наиболее подходящими для реализации управления составом агрегатов на станции являются свёртки $\sqrt{UV}$ и $\frac{2UV}{(U + V)}$. Эти свёртки

достаточно близки друг к другу, поэтому обобщённые оценки, полученные при использовании любой из них, также не будут иметь значительных отличий. Выбор одной из представленных свёрток остаётся за ЛПР, однако следует принимать во внимание, что свёртка «среднее гармоническое» всё же отдаёт в большей степени приоритет параметру надёжности, нежели свёртка «среднее геометрическое».

6. Таким образом, в работе продемонстрировано, что использование представленной методики в разработке системы ИНПОР в рамках АСУ ТП позволит осуществлять управление агрегатами станции в соответствии с теми целями, которые преследует оперативный персонал ГЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дюбуа Д. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике: пер. с фр. / Д. Дюбуа, А. Прад. – М.: Радио и связь, 1990 – 288 с.: ил.
- [2] Секретарёв Ю.А. Ситуационное управление энергетическими объектами и процессами электроэнергетической системы: монография / Ю.А. Секретарёв. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 308 с. («Монографии НГТУ»).
- [3] Лотов А.В. Многокритериальные задачи принятия решений: учеб. пособие / А.В. Лотов, И.И. Поспелова. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 197 с.
- [4] Секретарёв Ю.А. Основные принципы и модели управления гидроагрегатами с учётом их эксплуатационного состояния / Ю.А. Секретарёв, А.А. Жданович // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2010 (3). – С. 322–334.
- [5] Жданович А.А. Разработка модели оценки текущего эксплуатационного состояния гидростанции как участника водохозяйственного комплекса / А.А. Жданович, Ю.А. Секретарёв // Ползуновский Вестник № 2/1 2011. – Изд. АлтГТУ 2011. – С. 122–126.
- [6] Митрофанов С.В. Оптимизация состава агрегатов ГЭС на основе теории возможностей. Наука. Технологии. Инновации / С.В. Митрофанов // Материалы всероссийской научной конференции молодых учёных в 6-ти т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 232–23.

[7] Филиппова Т.А. Оптимизация энергетических режимов гидроагрегатов гидроэлектростанций / Т.А. Филиппова. – М.: Энергия, 1975. – 207 с.

[8] Филиппова Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / Т.А. Филиппова, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина. – Новосибирск, 2007. – 356 с.

Секретарев Юрий Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований: гидроэнергетика, оптимизация режимов электрических станций, надежность функционирования, многокритериальные модели, ситуационное управление объектами и процессами в ЭЭС. Имеет 114 публикаций, 5 монографий. E-mail: SekretarevUA@mail.ru

Митрофанов Сергей Владимирович, ассистент кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований: гидроэнергетика, системы интеллектуальной поддержки принятия решений, современные средства автоматизированного управления крупными энергетическими объектами. Имеет 10 публикаций. E-mail: Mitrofan_Serg@mail.ru

Sekretarev U.A., Mitrofanov S.V.

Methodology of hydrounits condition generalized criterion forming on basis of operational reliability and efficiency

The methodology considered in this paper allows to make an assessment of a hydrounits condition on basis of criterion of operational reliability of the hydro unit and flowing path and also criterion of efficiency of an operating mode of the hydrounit. The received assessment s can be used for the decision of a choice hydrounits problem of the station which operation most or is least expedient at change of loading in a power energy system. The decision of this problem will allow to generate main principles of a program complex of management of station unit's composition which can be used for creation of a subsystem of intellectual support of optimum decisions (ISOD) on base of the ACS TP of hydropower station.

Article is divided into some parts. In part "introduction" the basic approaches to management of hydropower station unit's composition are described. Part «problem statement» contains basis positions of the presented methodology and the formalized strategy of management by units of hydropower station on the basis of two criteria. In part «results of researches» as an example realization of principles of a considered methodology on Sajano-Shushenskaya hydropower station will be considered. The part "conclusion" contains the basic results on the executed research work.

Key words: hydropower station, automatic control system, station unit's composition, multicriterion approach, fuzzy set theory.