

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ (05.13.06)

УДК 681.5:681.51:681.52

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-98-107

## Особенности реализации системы рационального управления составом агрегатов гидроэлектростанций и перспективы ее развития

В.Е. Захарченко

Рассмотрены основные положения по созданию системы оперативного рационального управления составом агрегатов на основе критериев повышения эффективности работы гидроэлектростанции (ГЭС) и безопасности работы агрегатов.

В основу расчета эффективности ГЭС заложен принцип потерь мощности агрегатов, определяемый по разнице вырабатываемой мощности и возможной, которая была бы выработана на том же объеме воды и при том же напоре при работе агрегата с оптимальным КПД. Критерий безопасности основан на сравнении параметров агрегата из системы АСУ ТП с моделью. Предпочтителен для изменения состояния агрегата с минимальным общим количеством отклонений от модели по всей ГЭС. Еще одна группа критериев ориентирована на равномерное распределение нагрузки на агрегаты: наработку, количества пусков–остановов, переходов через зоны ограниченной работы и т.д. Процесс принятия мультикритериального решения проиллюстрирован примером. Для оперирования составом выбран агрегат с учетом всех групп критериев, ранжированных с весовыми коэффициентами оператора.

Описана основная мнемосхема системы, при помощи которой оператор управляет составом. Проанализированы следующие проблемы реализации и перспективные направления дальнейших исследований:

- планирования изменения состава агрегатов в кратко-, средне- и долгосрочном периодах;
- оптимизации функции распределения мощности для систем группового управления, числа переключений в средне- и долгосрочной перспективах, критериев эффективности, безопасности и оценки состояния;
- дополнения модели расчетами реактивной мощности и потерями на трансформаторах;
- учета водных ресурсов и ограничений;
- предиктивной оценки состояния гидроагрегатов и ГЭС;
- объединения подходов системы рационального управления с системами энергоменеджмента основных потребителей электроэнергии;
- мотивации операторов;
- развития и построения полностью автоматической системы рационального управления составом агрегатов.

Реализация приведенных проблем полностью соответствует последним тенденциям Industry 4.0 в мире и может быть использована для построения умных производств энергетического сектора.

*Ключевые слова:* оптимизация, рациональное управление, состав агрегатов, оценка состояния, групповое регулирование, эффективность, потенциальные потери, моделирование, распределение мощности, РУСА, проблемы рационального управления, перспективы рационального управления, гидроэлектростанции.

*Для цитирования:* Захарченко В.Е. Особенности реализации системы рационального управления составом агрегатов гидроэлектростанций и перспективы ее развития // Вестник МЭИ. 2019. № 1. С. 98—107. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-98-107.

## Specific Features Pertinent to Designing a System for Rationally Managing the Composition of Hydro Power Plant Units and Prospects for Its Further Development

V.E. Zakharchenko

The article discusses the key principles of designing a system for rationally managing the composition of hydro power units in the online mode based on the criteria of achieving more efficient and safe operation of a hydro power plant's (HPP) units.

The hydro power plant efficiency is calculated proceeding from the principle of determining the underproduction of its output from the difference between the generated power and the power that would be generated at the same volume of water and the same head during power unit operation

with the optimal efficiency. The safety criterion is based on comparison between the power unit parameters data received from the process control system and those obtained from the model. The unit characterized by the minimum sum of deviations from the model for the entire HPP will be preferred for changing its state. A one else group of criteria is oriented at achieving uniform distribution of load among the HPP units, including the times for which the power units have been in operation, the number of startup and shutdown cycles, the number of transitions through the restricted operation zones, etc. An example illustrating the process of making a multicriteria-based decision is given. For the composition management purposes, the unit selected subject to all three groups of criteria ranked with the operator weighting coefficients has been adopted.

The system general mimic diagram using which the operator manages the composition is described. The following problems concerned with implementation of the system and the prospective lines of future investigations are analyzed:

- scheduling the changes in the composition of power units for short-term, mid-term and long-term periods of time;
- optimizing the power distribution function for group control systems, the number of switching operations in the mid- and long-term timeframes, and the effectiveness, safety and state estimation criteria;
- supplementing the model with calculations of reactive power and power losses in transformers;
- taking into consideration the water resources and constraints;
- carrying out predictive state estimation of hydro power units and HPPs;
- combining the approaches used in the rational management system with the energy management systems of key electric power consumers;
- motivating the operators; and
- developing and constructing a fully automatic system for controlling the rational composition of power units.

The solutions for coping with the mentioned problems are fully consistent with the latest worldwide trends in the Industry 4.0 system and can be used for making smart production facilities in the power industry sector.

*Key words:* optimization, rational management, composition of power units, state estimation, group control, efficiency, potential power losses, modeling, rational management of power units composition, rational control problems, rational control prospects, hydraulic power plants.

*For citation:* Zakharchenko V.E. Specific Features Pertinent to Designing a System for Rationally Managing the Composition of Hydro Power Plant Units and Prospects for Its Further Development. MPEI Vestnik. 2019;1:98—107. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-98-107.

Идея создания системы, управляющей составом агрегатов, далеко не нова, ей занимались многие ученые с середины первой половины XX века. Она должна, не нарушая течения технологического процесса, естественным образом проанализировать состояние оборудования текущего состава агрегатов и резерва, определить, какие агрегаты смогут выполнять поставленную задачу лучше. Задача выбора состава оборудования чрезвычайно сложна [1]. Комбинаторика [2] позволяет поверхностно оценить количество вариантов состава с работающими  $M$  из  $N$  агрегатов  $C_N^M = \frac{N!}{M!(N-M)!}$ . Та-

ким образом, для выбора 10 агрегатов из 24 необходимо проанализировать 1 961 256 различных вариантов.

В работе [3] задача рационального управления составом агрегатов поделена на две достаточно большие группы: оперативное управление составом агрегатов и планирование состава агрегатов на значительное время (сутки, недели, месяцы).

Рассмотрено оперативное изменение состава оборудования. При выборе должны быть учтены критерии надежности, экономической целесообразности, эффективности составов. При этом ставятся ограничения по точному исполнению заданной системным оператором мощности, обеспечению резервов на загрузку и разгрузку активной мощности, равномерного распределения износа ресурсов и т. д. Ограничения должны безусловно выполняться как в установившемся режиме работы оборудования, так и во время переходных процессов. Заданная системным оператором мощность имеет две составляющие: плановую и внеплановую. Плановое задание содержит получасовые значения на сутки вперед и может уточняться в течение суток.

Внеплановая — состоит из дополнительной мощности для регулирования частоты в энергосистеме и может меняться ежесекундно. Таким образом, существенное изменение внепланового задания вносит серьезные коррективы в плановый состав оборудования.

Кроме исполнения задания от системного оператора чрезвычайно важно уменьшить число необоснованных изменений состояний гидроагрегатов (ГА), поскольку каждое изменение расходует ресурс основного оборудования: срабатывают выключатели, изнашиваются тормозные домкраты, происходят переходные процессы, связанные с пуском, остановом, переходами через зоны повышенной вибрации.

Последнее требование позволяет анализировать задачу оперативного рационального управления следующим образом: существует ли хотя бы один агрегат, изменение состояния которого привело к увеличению значения некоторого обобщенного критерия, включающего в себя как экономическую составляющую, так и составляющую оценки состояния, надежности гидроагрегатов и гидроэлектростанции (ГЭС) в целом.

При такой постановке проблемы следует обратить внимание на преимущество работы агрегата в группе по сравнению с агрегатом на индивидуальном управлении — это предсказуемое задание мощности. Следовательно, если предположить, что агрегат запускается в групповом режиме, то, поскольку общее задание на ГЭС не меняется, известно, как перераспределится задание между гидроагрегатами в группе. С остановом агрегата аналогично. Таким образом, система рационального управления составом агрегатов (РУСА) должна, учитывая функционал системы группового регулирования активной мощностью (ГРАМ), реко-

мендовать наилучший состав агрегатов, принимая во внимание как план балансирующего рынка и экономический эффект, так и состояние оборудования.

Для учета системой РУСА эффективности работы оборудования использован метод потенциальных потерь гидроагрегатов. Гидроагрегат — это машина, преобразующая потенциальную энергию воды в электрическую:

$$P = \rho ghQ\eta_t\eta_g,$$

где  $P$  — активная мощность;  $\rho$  — плотность воды;  $g$  — гравитационная постоянная;  $h$  — напор;  $Q$  — расход воды через турбину;  $\eta_t$  — КПД турбины,  $\eta_g$  — КПД генератора.

Создана цифровая модель гидроагрегата по зависимостям КПД, расхода, напора и мощности всех агрегатов ГЭС в виде функциональных зависимостей вида  $Q(P, h)$ ,  $\eta_t(P, h)$ ,  $\eta_g(P)$ . На базе реальных данных из АСУТП о напоре  $h$  и активной мощности агрегата  $P$  по модели вычислена, какая энергия могла бы быть выдана гидроагрегатом при данном напоре и текущем расходе воды, но в условиях работы при максимальном КПД (рис. 1).

Разницу между энергией, произведенной фактически и потенциально возможной, называют потенциальными потерями:

$$D_{GAi}^e = N_t \eta_{gt} - \frac{Q_t}{Q_o} N_o \eta_{g_{\eta_t \rightarrow \max}}, \quad (1)$$

где  $D_{GAi}^e$  — потенциальные потери для  $i$ -го агрегата ГЭС;  $N_t$  — мощность на валу турбины ГА в рассматриваемый момент времени;  $\eta_{gt}$  — КПД генератора;  $Q_t$  — расход через турбину в анализируемый момент времени;  $Q_o, N_o, \eta_{g_{\eta_t \rightarrow \max}}$  — расход через турбину, мощность на валу и КПД генератора, когда КПД турбины максимален, при напоре в рассматриваемый момент времени.

Очевидно, что один из критериев оптимизации работы гидроэлектростанции — минимизация потенциальных потерь ГЭС. Это значит, что идет поиск такого состояния, когда все агрегаты ГЭС работают на своем максимальном КПД. Иными словами, с точки зрения оптимизации состава по критерию эффективности работы ГЭС целесообразно изменить состояние такого агрегата, после которого потенциальные потери ГЭС будут минимальны из всех возможных альтернатив [4].

$$\sum_i D_{GAi}^e \rightarrow \min; \quad \eta_{ГЭС} \rightarrow \max.$$

При решении изменения состава следует принимать во внимание состояние агрегатов. Для этого создается цифровая функционально-ориентированная динамическая имитационная модель, описывающая ключевые режимы работы агрегата, взаимосвязь основных параметров [5]. При отклонении параметров процесса от модельных формируется рекомендация на изменение состава оборудования. Упрощенно таким отклонением от модельного поведения можно назвать достижение предупредительной уставки по некоторому параметру. Менять состав агрегатов следует таким образом, чтобы число отклонений параметров реальных агрегатов от модельных значений было минимальным. Так, если предположить, что ГА  $i$  имеет  $x_i$  отклонений от модельного поведения, то оценка состояния ГЭС тем выше, чем меньше отклонений агрегатов от модельного поведения. Аналогично можно записать критерий для системы рационального управления составом агрегатов: следует менять состояние того агрегата, который вызовет наименьшее отклонение агрегатов от модельного поведения:

$$\sum_i x_i \rightarrow \min.$$

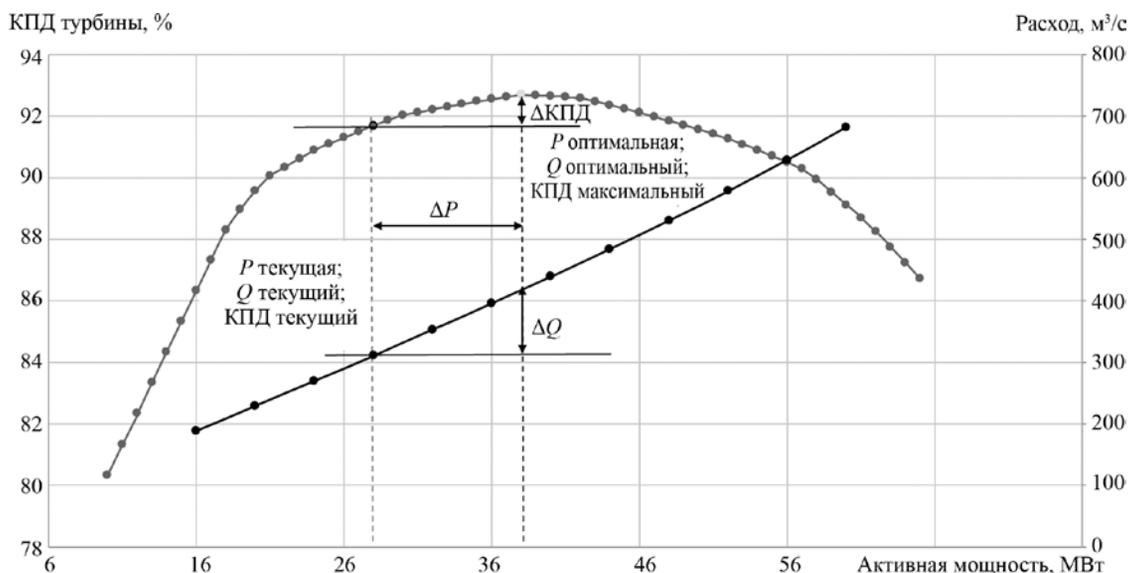


Рис. 1. Эксплуатационная и расходная характеристики при фиксированном напоре

Еще одним предназначением системы рационального управления составом агрегатов является контроль за примерно равномерным расходом ресурсов агрегатов в некотором периоде, так, чтобы исключить чрезмерное расходование ресурсов одного или некоторой группы агрегатов.

Существует множество критериев, влияющих на принятие решения об изменении состава агрегатов ГЭС. На первых порах эксплуатации системы РУСА крайне важно заслужить доверие оператора, чтобы он мог аргументировать или хотя бы понять, почему система рекомендовала определенный состав агрегатов, а не предпочла другой. Ясность может быть достигнута в случае задания предпочтений оператора в виде весовых коэффициентов. В перспективе возможно применение и более сложных методов принятия многокритериальных решений. Проиллюстрируем сложность многокритериального принятия решения примером. Предположим, на ГЭС 12 гидроагрегатов, все из них в работе, необходимо принять решение об останове одного агрегата (табл. 1). Строка «КПД, %» содержит КПД ГЭС в случае останова агрегата с соответствующим номером в соответствии с (2), а «Остановы» и «Отклонения» — число остановов и количество предупреждений (отклонений от нормального течения процесса) в контрольном периоде для соответствующего агрегата.

Для критериев повышения КПД ГЭС и поддержания равенства числа остановов справедливо: чем ниже значение, тем серьезнее рекомендация на останов. Для критерия минимизации числа предупреждений наоборот, чем больше количество отклонений от нормального течения процесса, тем рекомендация на останов выше.

Для принятия решения выбора из альтернативных гидроагрегатов  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ , каждый из которых описывается параметрами агрегатов (состояния)

$\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_m\}$ , последствия принятия решения (действия) характеризуется функцией полезности в некоторых единицах  $u_{ij}(a_i, \omega_j)$ . Зададим функцию предпочтений пользователя  $v_j$ . Для простоты используем самые распространенные критерии с выражением предпочтений [6].

*Критерий максимума ожидаемой полезности.* Каждому параметру и критерию ЛПР назначает некое значение полезности  $v_j$ , веса, тогда решается задача на увеличение взвешенной суммы всех значений альтернатив  $u_{ij}$ :

$$\sum_{k=1}^m u_{kj} v_j = \max_{i=1, N} \sum_{j=1}^m u_{kj} v_j; \quad \sum_{j=1}^m v_j = 1.$$

*Критерий Ходжа–Лемана:*

$$u_k = \min_{j=1 \dots m} u_j; \quad u_k = \sum_{j=1}^m u_{kj} v_j;$$

$$\alpha u_k + (1 - \alpha) u_k = \max_{i=1, N} (\alpha u_i + (1 - \alpha) u_i).$$

*Критерий минимума ожидаемых сожалений.* Для каждого параметра (критерия) следует определить максимальную величину, тогда отклонение от максимума, взвешенное с коэффициентом предпочтения  $v_j$ , покажет, насколько далеко значение параметра от своего оптимального значения. Оптимальным же является то решение, при котором

$$\Delta u_k = \sum_{j=1}^m v_j \Delta u_k = \min_{i=1 \dots N} \Delta u_i.$$

Пусть ЛПР задал предпочтения для параметра КПД — 0,5, для числа остановов — 0,2, для наработок — 0,3. При расчете очередности по сверткам максимума ожидаемой полезности, Ходжа–Лемана и минимума ожидаемых сожалений, результирующая очередь на останов будет иметь вид, представленный в табл. 2.

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что первыми идут на отключение агрегаты ГА2,

Таблица 1

**Исходные параметры гидроагрегатов**

<b>Номер гидроагрегата</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>КПД, %</b>	92,3	91,6	92,2	92,12	93	92,6	92	92,1	91,85	92,15	93,01	91,8
<b>Остановы</b>	53	21	35	64	28	32	15	1	45	24	11	48
<b>Отклонения</b>	200	129	183	180	325	110	152	24	288	157	93	420

Таблица 2

**Очередность отключения агрегатов по разным критериям**

<b>Максимум ожидаемой полезности (МОП)</b>												
Номер гидроагрегата	2	12	7	9	8	10	3	4	1	6	5	11
<b>Критерий Ходжа–Лемана (ХЛ)</b>												
Номер гидроагрегата	2	12	9	7	10	8	3	1	4	6	5	11
<b>Минимум ожидаемых сожалений (МОС)</b>												
Номер гидроагрегата	2	12	7	9	8	10	3	4	1	6	5	11

ГА12, ГА7, ГА9. Недостатки ГА8 были сглажены предпочтениями ЛПР. Среди наиболее успешных в данных условиях — агрегаты ГА11, ГА5, ГА6.

### Описание реализации системы рационального управления составом агрегатов

Реализация предложенного подхода по созданию системы оперативного рационального управления составом агрегатов была выполнена на основе OEM-решения компании «СМС Автоматизация» под названием АСОКУ на базе платформы построения SCADA-систем фирмы SIEMENS SIMATIC WinCC Open Architecture. Ключевыми факторами, повлиявшими на выбор, стали широкий выбор промышленных коммуникационных протоколов для интеграции с системами автоматизации, гибкий функционал и значительная библиотека графических примитивов, моделей и компонентов, применяющихся на многих гидроэлектростанциях. Модели гидроагрегатов выполнены на оцифрованных эксплуатационных и расходных характеристиках турбин и генераторов, установленных на станции. Модели группового регулятора активной мощности (ГРАМ), системы рационального управления составом агрегатов (РУСА) ГЭС реализованы по алгоритмам системы ГРАМ ГЭС с функцией равномерного распределения задания мощности.

Основная мнемосхема, с которой работает оператор, представлена на рис. 2. Она разделена на две идентичные части: в левой иллюстрируются рекомендации по изменению состава агрегатов в настоящий момент времени, справа — прогнозная часть, через дискрет план-графика балансирующего рынка через 30 мин.

В верхней части мнемосхемы указаны основные параметры ГЭС: напор, задание ГРАМ, суммарная мощность агрегатов на индивидуальном управлении, КПД ГЭС, эффективность ГЭС, весовой коэффициент КПД, мощность агрегатов, минимально и максимально достижимые мощности ГЭС и ГРАМ на текущем составе агрегатов. Параметры получены автоматически из системы ГРАМ, но могут быть скорректированы или изменены вручную.

Задание ГРАМ и границы диапазона регулирования вместе с плановым заданием отражаются в середине окна в виде графиков.

В правой прогнозной части измеряемых параметров нет, есть только модельные, рассчитанные на основании распределения следующего задания плана балансирующего рынка, что соответствует прогнозному значению через 30 мин. при условии сохранения текущего состава агрегатов.

Ниже блока основных параметров расположены блоки рекомендаций на пуск и останов ГА. В данном случае зон ограниченной работы нет, если бы они были, то блок рекомендаций по переходу через зоны располагался бы ниже.

Блок рекомендаций достаточно прост: в левой части кнопка, позволяющая настраивать критерии выдачи рекомендаций РУСА, затем располагается очередь из кнопок ГА, упорядоченных слева направо, левый агрегат — рекомендован к изменению состава. Нажатие на кнопку

приводит к рекомендуемому изменению состава. В случае рекомендации кнопки агрегатов подсвечиваются зеленым цветом для пуска, желтым — для останова. В случае, если изменение состава невозможно, кнопки неактивны. В этом же блоке рекомендаций размещается транспарант, сообщающий о возможности реализации полученного задания действующим составом. Оператор может изменить состояние агрегата, дающего не максимальный эффект, в этом случае система сгенерирует соответствующее сообщение «оператор пустил (остановил) не самый оптимальный агрегат». Операторы могут принимать во внимание другие факторы, неизвестные системе, однако каждый такой случай должен быть проанализирован и, возможно, после этого будет добавлен новый критерий или изменены веса у существующих.

В самой нижней части основной мнемосхемы размещены мнемознаки агрегатов, показывающие режимы работы агрегатов (генераторный, групповой, индивидуальный и т. д.), основные параметры агрегатов и промежуточные результаты вычисления системы РУСА: какова будет обобщенная оценка, если агрегат изменит состояние.

На рисунке 2 показано состояние дефицита мощности ГЭС. Система РУСА рекомендует пустить один из остановленных агрегатов, что приведет к увеличению КПД. Однако в правой части можно наблюдать, что через 30 мин. даже действующий состав агрегатов будет избыточен для удовлетворения потребностей рынка электроэнергии, и система РУСА будет рекомендовать останов агрегатов.

Система предоставляет возможность настраивать ключевые критерии. Решение принимается автоматически в зависимости от числа аварий, предупреждений, наработок моточасов в генераторном режиме, пусков-остановов, диапазона регулирования гидроагрегатов. Каждый критерий имеет вес и признак активности. Оператор может в процессе эксплуатации менять вес критериев и исключать их из расчетов РУСА. Любое действие заносится в журнал работы системы. Критерий КПД является приоритетным и вынесен на основную мнемосхему. Также это сделано для того, чтобы оператор мог быстро отключить его в случае паводков, когда главенствующей становится задача увеличения расхода воды через ГЭС. Рассчитанное значение обобщенной оценки и вклад каждого критерия можно также узнать, подведя курсор мыши к кнопке изменения состояния агрегата, не нажимая ее. (см. рис. 1). Также во время исполнения модели оператор может посмотреть все действующие ограничения, характеристики, текущие параметры ГА (см. рис. 2).

Большую часть мнемосхемы ГА (рис. 3) занимает изображение эксплуатационной характеристики ГА, в графическом виде представляющее информацию о рабочей точке, определяемой по текущему напору и мощности, минимальном и максимальном ограничениях мощности в системе ГРАМ и РУСА. В правой части даны основные параметры ГА в цифровом виде: мощность, ограничения, наработки, число пусков-остановов, сигнализации, КПД и т. д. Также в правой части, внизу, располагается панель управления ГА, по-

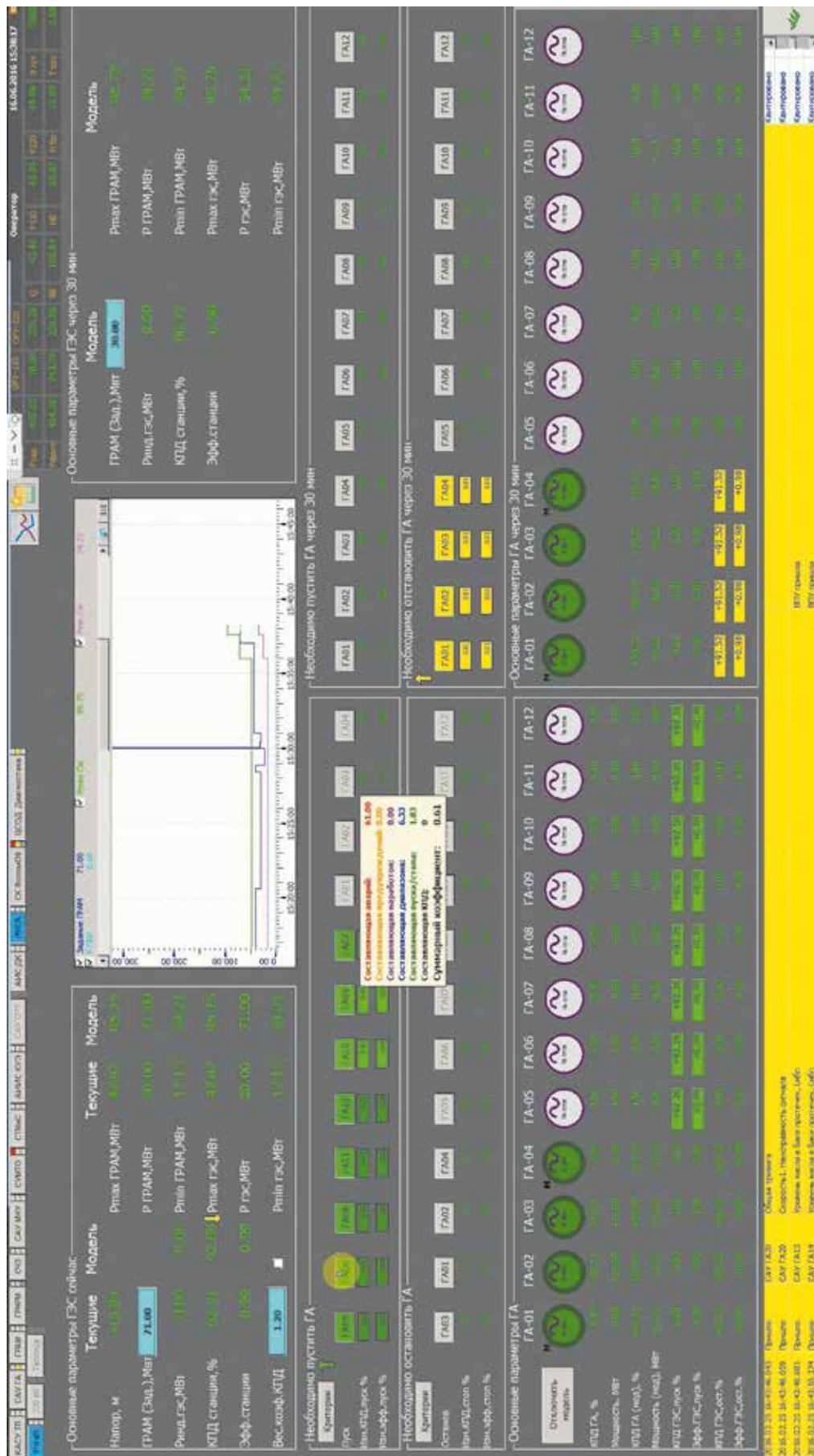


Рис. 2. Основная мнемосхема системы РУСА

звляющая пустить, остановить, включить или исключить агрегат из группового управления. Кроме того, оператор может перевести агрегат в режим «моделирования» и выполнить все обозначенные операции без воздействия на реальную систему. В модельном режиме он может также менять ограничения ГА, наработки, число пусков–остановов, мощности агрегатов на индивидуальном управлении и т. д., для того, чтобы смоделировать почти любую ситуацию и посмотреть, каковы рекомендации ПК РУСА будут при этом эксперименте.

Основная проблема при реализации системы рационального управления составом агрегатов может быть названа конкуренцией критериев. Система РУСА осуществляет принятие решений по пуску и останову гидроагрегата и переходу его через зону ограниченной работы вверх или вниз.

Иногда для достижения одной цели используются разные действия. Например, увеличение задания мощности приводит к рекомендации как перехода через зону нежелательной работы, так и к рекомендации пуска агрегата. Эта проблема решается заданием строгого приоритета одного действия над другим, так перевод через зону предпочтителен по сравнению с пуском или остановом агрегатов.

Еще одним признаком конкуренции критериев является то, что агрегат, над которым только что было совершено действие, может подходить для противоположного, обратного действия, что ведет к слишком частому изменению состояний агрегатов. Данное обстоятельство учитывается следующим образом:

- необходимость каждого действия проверяется на протяжении заданного оператором времени;
- решения по критерию увеличения КПД ГЭС принимаются только в случае, если при текущем значении задания мощности ГЭС есть положительный эффект от изменения состава агрегатов, и эта рекомендация совпадает с рекомендацией нескольких ( $\geq 2$ ) последующих значений задания мощности плана балансирующего рынка;
- после выполнения операции агрегат, над которым она была совершена, исключается из принятия решения на время, заданное оператором.

### Перспективы развития системы рационального управления составом агрегатов

Выделим основные направления перспективного развития системы РУСА.

*Планирование составов агрегатов на значительное время* (сутки, недели, месяцы) принципиально не отличается от предложенного подхода. Разница лишь в дискретности времени, при оперативном управлении — минуты, при долгосрочном — часы, дни. Преимуществом предложенного подхода является базирование на текущем составе агрегатов и оперативное перестроение оптимального состава при изменении значений мощности. При этом совершенно неважно, какая составляющая задания мощности была изменена: плановая, внеплановая, частотная или другая. Реко-

мендованное изменение касается всегда только одного агрегата, выбранного по критериям экономической эффективности и безопасности основного оборудования, после чего рассчитывается возможный эффект от следующей рекомендации.

*Оптимизация функции распределения мощности РУСА и ГРАМ.* В настоящей работе для моделирования системы РУСА рассмотрена одна функция распределения системы группового регулирования — по равенству мощностей. Она наиболее распространена в настоящее время. Однако в [7] показана эффективность применения других функций распределения задания мощности. Поскольку функция распределения мощности ГРАМ — ключевая, то ее изменение серьезно меняет систему РУСА, влияет на КПД ГЭС и, как следствие, на экономический эффект по основному критерию.

*Учет задания реактивной мощности ГЭС.* Помимо группового регулирования активной мощности (система ГРАМ) зачастую бывает необходимо контролировать напряжение на системах шин или реактивную мощность (систему ГРНРМ). В общем случае каждый агрегат ГЭС может быть подключен к обеим системам и одновременно участвовать в групповом регулировании. Принимая во внимание диаграмму мощности турбогенератора [8], можно сделать вывод о том, что увеличение реактивной мощности фактически ограничивает сверху диапазон активной мощности гидроагрегата. И наоборот, увеличение активной мощности ограничивает сверху диапазон регулирования реактивной мощности. Для систем ГРАМ и РУСА учет функции ГРНРМ сводится к введению функциональных зависимостей и ограничений вида  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ ;  $P = S \cos \varphi$ , где  $S$ ,  $P$ ,  $Q$ ,  $\cos \varphi$  — полная, активная, реактивная и коэффициент мощности.

*Учет водных ресурсов.* Диспетчерские графики составляются с учетом возможностей ГЭС и водного режима, однако зачастую для поддержания его вода расходуется неэффективно: либо агрегаты переводятся в режим повышенного расхода воды, как в паводок, либо открывают шлюзы и водосбросы. С повышением КПД ГЭС фактически экономится расход воды, что предполагает необходимость увеличения уровней бассейнов суточного регулирования, напоров, уровней нижнего и верхнего бьефа и т. д. Сэкономленная вода не означает однозначной прибыли для ГЭС. Для ГЭС нет стимула экономить воду. Данная проблема может быть решена и организационными мерами.

*Оптимизация числа изменений состояний ГА ГЭС.* В работе [9] приведена зависимость числа изменений состояний агрегатов от времени принятия решения РУСА, необходимого для достаточного экономического эффекта. Так проверяется качество рекомендации: чем выше длительность рекомендации, тем лучше предложенное решение.

Задачу можно сформулировать следующим образом: необходимо подобрать параметры модели системы РУСА таким образом, чтобы число рекомендаций было минимально, а их суммарная длительность — максимальна. Ее решение на ретроспективных данных,

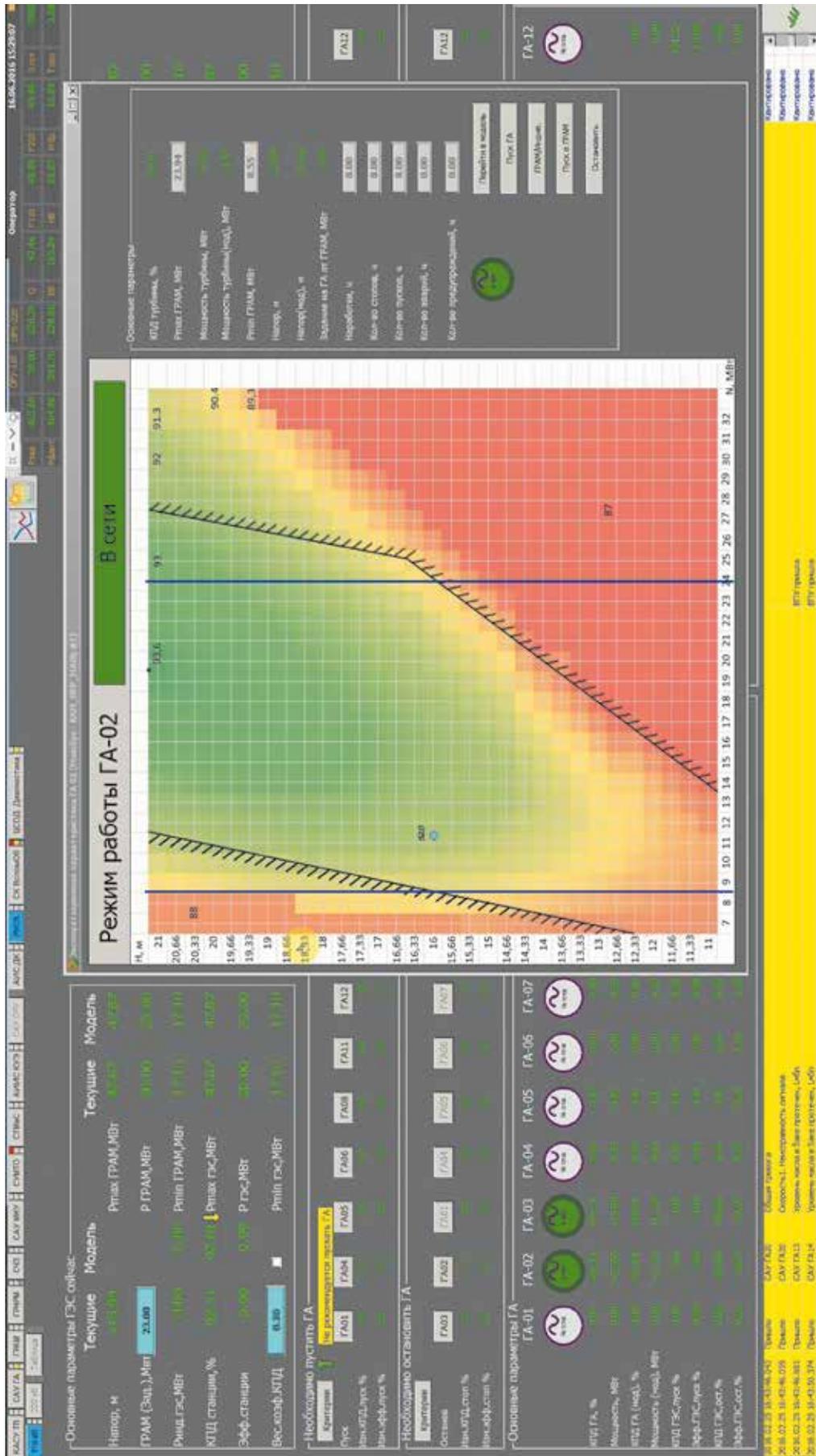


Рис. 3. Мнемосхема гидроагрегата

позволит определить, какое значение этого параметра было бы оптимальным в прошлом, но не в настоящем. Построение адаптивных, динамических моделей позволило бы гибко менять необходимое время принятия решения для достижения максимального эффекта.

*Оптимизация критерия повышения КПД ГА и ГЭС.* Одной из составляющих этой задачи является необходимость актуализации КПД гидроагрегата, зависящего от КПД турбины и генератора. Характеристики агрегатов выдаются производителями оборудования при поставке, однако со временем теряют актуальность в силу индивидуальных особенностей из-за разных условий эксплуатации. Для практического применения особенно важно, чтобы уточнение характеристик не требовало натурных испытаний во всем диапазоне напоров и мощностей.

*Предиктивная оценка и устаревание оценки состояния агрегата.* В данной реализации предпочтительным к переводу агрегата с индивидуального управления на групповое или предпочтительным к пуску агрегатом является тот, достоверность параметров которого выше в настоящий момент времени. Однако важно оценивать общее состояние после того, как будет изменено состояние одного агрегата, аналогично тому, как вычисляется значение потенциальных потерь после включения агрегата в групповое регулирование.

*Исследование характерного задания мощности ГРАМ.* Задание ГРАМ ГЭС формируется в первую очередь для удовлетворения нужд потребителей электрической энергии, именно регулирование выработкой ГЭС приводит к балансу спроса и предложения участников рынка электрической энергии. В исследовании характерного задания ГРАМ можно обозначить поиск закономерностей в формировании или величине задания ГРАМ и, следовательно, в рекомендациях системы РУСА, в зависимости от подключенных потребителей и времени (времени суток, рабочего или выходного дней, сезона). Моделирование потребления электроэнергии предприятий — тема, связанная в первую очередь с энергоменеджментом, управлением энергопотреблением предприятий для оптимизации затрат. Она стимулируется наличием государственного стандарта [10] и ей посвящено множество современных работ в различных отраслях промышленности: горной [11], металлургической [12], энергетике [13] и др.

*Поиск путей интеграции с ситуационным подходом.* В работе [14], описывающей ситуационный подход к управлению составом и режимом гидроагрегатов, приведена классификация, позволяющая проставить веса для предупредительных сигналов в зависимости от узла агрегата. Проведение подобных исследований и выявление общих закономерностей по другим ГЭС позволило бы использовать эти веса в оценивании эксплуатационного состояния ГА.

## Литература

1. Урин В.Д., Кутлер П.П. Энергетические характеристики для оптимизации режима электростанций и энергосистем. М.: Энергия, 1974.

*Оценка и мотивация действий операторов.* Влияние человеческого фактора на принятие решения в автоматизированной системе сложно переоценить. От выбора стратегии внедрения системы и мотивации оперативного персонала следовать оптимальным решениям системы зависит скорость и качество системы. Хорошему эффекту будет также способствовать принцип соревнования: кто за рабочую смену обеспечил наилучший эффект от работы системы РУСА.

*Переход к автоматической системе РУСА* — это способность выдавать непосредственное воздействие в систему ГРАМ для изменения текущего состава, пуска, останова или перехода через зоны нежелательной работы.

В статье рассмотрены основные положения по созданию системы оперативного рационального управления составом агрегатов, описаны внедрение и принятие решения системой, даны ключевые проблемы и перспективы развития системы. Построенный программный комплекс рационального управления составом агрегатов позволяет оценить экономическую эффективность ГЭС в реальном времени на основе расчетных параметров РУСА:

- повысить КПД ГЭС действующего состава ГА;
- менять КПД ГЭС при смене текущего состава ГА, что позволяет выявить экономическую эффективность действующего состава как на модели, так и в реальности;
- варьировать состав агрегатов ГЭС в перспективе плана балансирующего рынка;
- достигать оптимального состава и числа ГА в ГРАМ для получения наивысшего КПД.

Оценить текущее состояние агрегатов на основе сопоставления с эталонной моделью и за счет этого:

- исключить из управления составом агрегаты с повышенным износом, критическими отклонениями и т. д.
- осуществлять планомерную ротацию работающего оборудования для поддержания примерно равных наработок, пусков–остановов, переходов через зоны ограниченной работы.

Принимать решение с учетом необходимых критериев эффективности и надежности, оценивая вклад каждого критерия.

Моделировать в системе РУСА изменения распределения задания мощности, что позволяет:

- обучать, тренировать оперативный персонал;
- проводить моделирование различных ситуаций и анализировать поведение ГЭС в модельных условиях: при изменении параметров модели напора, наработок, ограничений ГА и др.

РУСА помогает оператору принять взвешенное решение по изменению состава оборудования.

Реализация системы РУСА позволяет приблизить эпоху умного производства в энергетике. Идеи и алгоритмы, изложенные в работе, могут быть полезны и в других отраслях промышленности.

## References

1. Urin V.D., Kutler P.P. Energeticheskie Harakteristiki dlya Optimizatsii Rezhima Elektrostantsiy i Energosistem. M.: Energiya, 1974. (in Russian).

2. Кулабухов С.Ю. Дискретная математика. Шахты: Южно-Российский госуд. инст-т сервиса, 2006.
3. Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. М.: Энергоиздат, 1981.
4. Захарченко В.Е. Основной критерий автоматизированного рационального управления составом агрегатов ГЭС // Автоматизация в промышленности. 2017. № 9. С. 10—15.
5. Захарченко В.Е., Сидоров А.А. Оценка достоверности параметров контроля и управления АСУТП. Функционально-ориентированные модели. Lambert Academic Publ., 2012.
6. Уткин Л.В. Анализ риска и принятие решений при неполной информации. СПб.: Наука, 2007.
7. Захарченко В.Е., Сидоров А.А. Влияние функции распределения активной мощности на эффективность ГЭС // Автоматизация в промышленности. 2018. № 1. С. 29—33.
8. Усов С.В. и др. Электрическая часть электростанций. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
9. Захарченко В.Е. Техничко-экономическое обоснование автоматизированной системы рационального управления составом агрегатов ГЭС // Автоматизация в промышленности. 2017. № 11. С. 11—15.
10. ГОСТ Р ИСО 50001—2012. Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению.
11. Перфильева Е.Н. Повышение энергоэффективности горных предприятий на основе управления энергетическими ресурсами: дисс. ... канд. техн. наук. М.: Московский гос. горный ун-т, 2007.
12. Кокшаров В.А. Комплексное управление перспективным энергопотреблением металлургических предприятий: дисс. .... доктора экон. наук. Екатеринбург: Уральский федер. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2016.
13. Страхова Н. А., Лебединский П.А. Имитационное моделирование как инструмент анализа энергоэффективности теплогенерирующих предприятий // Инженерный вестник Дона. 2013. Т. 4. № 4. С. 1—6.
14. Филиппова Т.А., Секретарев Ю.А. Учет эксплуатационного состояния при управлении составом агрегатов в АСУ ТП // Известия СОАН СССР. 1977. № 1. С. 132—136.
2. Kulabuhov S.Yu. Diskretnaya Matematika. Shahty: Yuzhno-Rossiyskiy Gosud. Inst-t Servisa, 2006. (in Russian).
3. Venikov V.A., Zhuravlev V.G., Filippova T.A. Optimizatsiya Rezhimov Elektrostantsiy i Energosistem. M.: Energoizdat, 1981. (in Russian).
4. Zaharchenko V.E. Osnovnoy Kriteriy Avtomatizirovannogo Ratsional'nogo Upravleniya Sostavom Agregatov GES. Avtomatizatsiya v Promyshlennosti. 2017;9:10—15. (in Russian).
5. Zaharchenko V.E., Sidorov A.A. Otsenka Dostovernosti Parametrov Kontrolya i Upravleniya ASUTP. Funktsional'no-orientirovannye modeli. Lambert Academic Publ., 2012. (in Russian).
6. Utkin L.V. Analiz Riska i Prinyatie Resheniy pri Nopolnoy Informatsii. SPb.: Nauka, 2007. (in Russian).
7. Zaharchenko V.E., Sidorov A.A. Vliyanie Funktsii Raspredeleniya Aktivnoy Moshchnosti na Effektivnost' GES. Avtomatizatsiya v Promyshlennosti. 2018;1:29—33. (in Russian).
8. Usov S.V. i dr. Elektricheskaya Chast' Elektrostantsiy. L.: Energoatomizdat, 1987. (in Russian).
9. Zaharchenko V.E. Tekhniko-ekonomicheskoe Obosnovanie Avtomatizirovannoy Sistemy Ratsional'nogo Upravleniya Sostavom Agregatov GES. Avtomatizatsiya v Promyshlennosti. 2017;11:11—15. (in Russian).
10. GOST R ISO 50001—2012. Sistemy Energeticheskogo Menedzhmenta. Trebovaniya i Rukovodstvo po Primeneniyu. (in Russian).
11. Perfil'eva E.N. Povyshenie Energoeffektivnosti Gornyh Predpriyatiy na Osnove Upravleniya Energeticheskimi Resursami: Diss. ... Kand. Tehn. Nauk. M.: Moskovskiy Gos. Gornyy Un-t, 2007. (in Russian).
12. Koksharov V.A. Kompleksnoe Upravlenie Perspektivnym Energopotrebleniem Metallurgicheskikh Predpriyatiy: Diss. .... Doktora Ekon. Nauk. Ekaterinburg: Ural'skiy Feder. Un-t im. Pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2016. (in Russian).
13. Strahova N. A., Lebedinskiy P.A. Imitatsionnoe Modelirovanie kak Instrument Analiza Energoeffektivnosti Teplogeneriruyushchih Predpriyatiy. Inzhenernyy Vestnik Dona. 2013;4:4:1—6. (in Russian).
14. Filippova T.A., Sekretarev Yu.A. Uchet Eksploatatsionnogo Sostoyaniya pri Upravlenii Sostavom Agregatov v ASU TP. Izvestiya SOAN SSSR. 1977;1:132—136. (in Russian).

#### Сведения об авторе:

Захарченко Виталий Евгеньевич — кандидат технических наук, начальник отдела программирования ООО НВФ «Сенсоры. Модули. Системы», e-mail: vitaliy.zakharchenko@sms-a.ru

#### Information about author:

Zakharchenko Vitaliy E. — Ph.D. (Techn.), Head of Programming Dept., ООО NVF «Sensors. Modules. Systems», e-mail: vitaliy.zakharchenko@sms-a.ru

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the author declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 08.02.2018

**The article received to the editor:** 08.02.2018