

О ЦИФРОВИЗАЦИИ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В.Е. Захарченко, А.А. Сидоров (ООО НВФ "Сенсоры. Модули. Системы")

Вводится и поясняется понятие цифрового двойника предприятия. На примере гидроэлектростанций (ГЭС) рассматриваются компоненты цифрового двойника предприятия, охватывающего весь жизненный цикл ГЭС. Показано, что комплексный цифровой подход позволяет значительно снизить стоимости владения инфраструктурой предприятия.

Ключевые слова: цифровизация, цифровой двойник, ГЭС, 3D модель, информационная модель, комплексное проектирование, моделирование, виртуальная пуско-наладка, обучение, оптимизация, предсказательная диагностика, база знаний, информационная безопасность.

Мировые тенденции создания цифровых производств оказывают значительное влияние на производство в России. Новые веяния не могли не затронуть и область электроэнергетики, в частности, гидроэнергетики. В последнее время при описании передовых объектов гидроэнергетики используются понятия "Цифровое производство", "Цифровизация", "Цифровой двойник" и пр. Группа компаний "СМС-Автоматизация" имеет значительный опыт работы в области гидроэнергетики — более 20 лет. За это время были реализованы более сотни локальных систем автоматического управления основным и вспомогательным оборудованием ГЭС, десятки диспетчерских систем оперативного управления всеми процессами. Накопленный опыт и знания позволили разработать и непрерывно применять на практике унифицированную нормативно-справочную информацию и типовые проектные решения для различных АСУТП ГЭС (САУ ГА, РЧВ, ГРАМ, САУ МНУ и др.).

Согласно нормативным документам, гидроэлектростанции проектируются с минимальным расчетом на 100 лет эксплуатации, однако при должном обслуживании срок фактической эксплуатации может быть существенно увеличен и достигать нескольких сотен лет (<http://blog.rushydro.ru/?p=9950>). Основное оборудование естественно изнашивается и требует капитального ремонта, модернизации, замены. Срок работы основного оборудования — гидротурбин, гидрогенераторов рассчитан на несколько десятков лет. Жизненный цикл систем автоматизации обычно составляет не больше 20 лет, при этом типичный срок модернизации систем автоматизации составляет 5 лет. Таким образом, весь жизненный цикл гидроэлектростанции — это череда постоянных обновлений, модернизаций, реконструкций, связанных то с заменой систем автоматизации, то с заменой основного или вспомогательного оборудования. Каждый этап базируется на предыдущем. Каждый этап определяет и ограничивает качество и функциональность последующих этапов. Преимущества, получаемые от совершенствований на каждом этапе в отдельности, не могут быть сравнимы с выгодами, полученными в результате комплексного подхода развития гидропредприятия.

Следуя этой логике, анализируя и обобщая все этапы жизненного цикла гидроэлектростанции, становится очевидной необходимость консолидации разрозненной информации по объекту управления

в единое цифровое представление, получившее название цифровой двойник предприятия. Цель создания такого двойника — сохранить данные, созданные на одном этапе жизненного цикла в цифровом виде, с тем, чтобы использовать их на последующих этапах.

Впервые это понятие было введено в 2003 г. в статье Майкла Гривса «Цифровые двойники: превосходство в производстве на основе виртуального прототипа завода»: «Цифровые двойники — это гибридная модель (одновременно физическая и цифровая), которая создается специально для определенных целей бизнеса, например, предсказать неудачи, снизить затраты на обслуживание, предотвратить незапланированные отключения».

В наши дни с развитием технологий Industry 4.0 концепция цифровых двойников подразумевает соединение физического и цифрового мира через взаимодействие информационных моделей здания, оборудования и аналитического программного обеспечения. Другими словами, для физического объекта, единицы оборудования или целого процесса, создается математическая модель, которая в дальнейшем используется для анализа поведения объекта. Более того, цифровая модель постоянно обновляется, чтобы максимально полно соответствовать текущему рабочему режиму реальной установки. Это дает возможность выявить непредусмотренные изменения в процессах, оптимизировать режимы работы оборудования, предотвращать поломки и аварии, что в итоге позволяет существенно повысить надежность и эффективность эксплуатации [1].

Итак, цифровой двойник предприятия — совокупность данных различных форм представления (чертежи, схемы, документация, исторические архивы, алгоритмы и программное обеспечение систем управления, сложные мультидисциплинарные математические модели с высоким уровнем адекватности реальным материалам, конструкциям и физико-механическим процессам [2]), описывающая динамическое поведение объекта и его компонентов во времени.

Основные требования, предъявляемые к цифровому двойнику.

1) Консистентность — взаимосвязность, непротиворечивость и актуальность всех данных.

2) Гетерогенность — разнообразие представления и хранения информации: чертежи, текстовые документы, спецификации, программное обеспечение,

трёхмерные (3D) модели основного и вспомогательного оборудования, систем автоматизации, помещений, модели технологических процессов и участков производств, исторические данные о работе систем, базы знаний, описания бизнес-процессов и т. д.

3) Хронологичность — регистрация всех изменений в верном порядке с сохранением консистентности.

4) Моделеориентированность — описание технологических процессов, их параметров и их взаимодействия в виде сложных мультидисциплинарных математических моделей — информационных, графических, имитационных и др.

Отдельные компоненты цифрового двойника предприятия существуют и применяются уже давно (информационные модели здания, имитационные модели ТП и др.). На современном этапе отличительной концептуальной особенностью является системообразующее свойство консистентности — взаимосвязности всех компонентов между собой. В результате тесной взаимосвязи появляется новая функциональность, которая позволяет сопровождать, развивать производство в течение всего жизненного цикла более эффективно.

Рассмотрим основные функциональные рамки и достоинства цифрового двойника предприятия.

Компоненты цифрового двойника предприятия

3D-модели

3D-модели используются в гидроэнергетике давно и предлагают решение конкретной узкоспециализированной задачи:

— 3D модели помещения ГЭС, гидроузлов, прочих вспомогательных помещений служат для решения задач логистики, размещения оборудования в действующем производстве, планирования реконструкции, связанных с заменой основного оборудования и изменения основных параметров плотины, ГЭС и т. д.

— 3D модели отдельных компонентов основного оборудования (водопроточного тракта, лопаток агрегата) служат для анализа качества — определение мест трещин, протечек, для предсказательного определения возможных неисправностей оборудования.

Построение комплексной 3D-модели ГЭС позволяет заблаговременно на этапе проектирования ответить на многие вопросы, например.

1) Можно ли физически разместить бак маслonaпорной установки (МНУ) отличной от имеющихся на ГЭС конфигурации на заданной площадке ГЭС? Можно ли систему управления МНУ разместить в заданном месте?

2) Можно ли бак МНУ транспортировать по существующим коридорам внутри ГЭС? Какая техника для этого необходима?

3) Совместима ли маслonaпорная установка с существующей или проектируемой системой трубопроводов?

4) Достаточно ли существующих кабель-каналов для подключения системы управления к МНУ или для интеграции с САУ агрегатов и комплексной АСУТП?

Таким образом, 3D-модель ГЭС позволяет не только сразу определить необходимые условия проведения предстоящих работ, но и проверить применимость спроектированного решения в целом, до поставки оборудования, тем самым, исключая возможные проблемы и несоответствия на этапах монтажа и пуска.

Применение актуальных трехмерных моделей сокращает затраты на проектирование, пусконаладочные работы, обслуживание и модернизацию производственных систем.

Кроме того, 3D-модели могут быть использованы не только для нужд проектирования, но и при обучении эксплуатирующего (в том числе оперативно-го) персонала. На 3D-моделях можно организовать обучение по сценарному принципу, включающему штатное управление агрегатами с рабочих мест и тренировку по перемещению по помещениям ГЭС и прилегающей территории, и выполнение тех или иных действий вне диспетчерского пункта, например, выполнение переключений непосредственно на агрегате, эвакуация и действия в аварийной ситуации. Ценностной 3D-моделирования, как составной части цифровизации, является возможность использования модели не просто как облака точек в трехмерном пространстве, но и в качестве информационного объекта, взаимосвязанного с другими компонентами цифрового двойника: тренажерами, системами комплексного проектирования и т. д.

Информационная модель ГЭС

Одной из ключевых задач цифрового двойника является приведение всех объектов и их свойств к единой системе описания — информационной модели предприятия. В энергетике активно применяется СИМ (Common information model, IEC 61970) [3]. Помимо логической идентификации объектов ГЭС, определения их параметров и взаимосвязей, важно привести к этой информационной модели документацию всех систем управления, создать единую платформу для хранения нормативно справочной информации всех объектов как основного, так и вспомогательного оборудования ГЭС, включая системы автоматизации. Идентификация и НСИ должны единым стержнем связывать все компоненты цифрового двойника ГЭС. При необходимости информационная модель и НСИ могут быть расширены на все гидроэлектростанции.

Говоря о практической стороне использования рассмотренной технологии, отметим, что группой компаний “СМС-Автоматизация” разработан компонент интеграции информационной модели ГЭС с диспетчерскими системами.

Платформы поддержки жизненного цикла

Платформа поддержки жизненного цикла предприятия в составе цифрового двойника должна обеспечить целостную среду для разработки, хранения и сопровождения: технологических схем, схем автоматизации, электрических схем (подключения КИП,



Рис. 1. Схема комплексного проектирования предприятия на базе продуктов Siemens

питания), схем размещения объектов, конструкторской документации на системы автоматизации, алгоритмов систем управления технологическими процессами, математических моделей технологических процессов и другой проектной и сопроводительной документации (руководства и регламенты по эксплуатации, паспорта на основное и вспомогательное оборудование, шкафы автоматизации и др.).

В настоящее время такие платформы существуют, например, COMOS от фирмы SIEMENS (рис. 1). Платформа предоставляет инструментарий для реализации объектно-ориентированного подхода к проектированию, где для каждого объекта формируется различное представление на электрической, технологической схеме или схеме автоматизации (рис. 1). При этом изменения, вносимые на одном типе схемы, будут отражены и в других представлениях, что позволяет различным инженерным службам вести совместную проектную деятельность.

Платформа COMOS позволяет автоматически на основе созданной схемы автоматизации генерировать модели объектов управления средствами пакета имитационного моделирования SIMIT. Управляющие алгоритмы, разработанные в COMOS, автоматически переводятся в среде PCS7 в управляющее ПО, которое может быть загружено в ПЛК или системы оперативного управления (SCADA). Таким образом обеспечивается взаимосвязь конструкторской документации, управляющего ПО и моделей техно-

логического процесса — все они работают в единых терминах с одной базой объектов и их свойств. При внесении изменений в технологическую схему изменения будут автоматически применены к модели техпроцесса и ПО системы автоматизации (PCS7). И наоборот, как только будет внесено изменение в ПО PCS7, в системе COMOS сформируется соответствующее изменение в описании системы автоматизации (алгоритмов, модулей ввода/вывода и др.).

Дополнительным эффектом от внедрения платформы жизненного цикла может стать определение наиболее уязвимых или проблемных участков в обслуживаемых системах за счет контроля версий эксплуатируемого ПО, прошивок, операционных систем и т. д. Использование таких механизмов повысит как информационную защищенность предприятия, так и поможет с определением наиболее проблемных программных комплексов, что в свою очередь влияет на планирование модернизации систем.

Функции, реализуемые с помощью цифрового двойника предприятия

Функции обучения

Цифровой двойник предприятия может использоваться для организации обучения по трем направлениям.

1) Обучение перемещению по основным объектам гидроузла, внутри ГЭС и прилегающих территорий (распределителей) и т. д. Задачи ставятся по сценар-

ному принципу, например: внутри трехмерной модели пространства ГЭС необходимо переместить виртуальную фигуру (аватара) из точки А в точку В. Цель может быть любой: отработка эвакуации, поиск и контроль показаний местных приборов, выполнение переключений, ознакомление с новым, возможно физически не существующим, проектируемым объектом, действия в аварийной ситуации и т. д. Модель 3D пространства может быть интегрирована с моделью технологического процесса и/или связана с реальным техпроцессом при помощи системы диспетчеризации. Примером подобного обучающего комплекса является пакет Walkinside, входящий в платформу COMOS.

2) Обучение оперативного персонала для повышения качества и/или безопасности производства. Существуют различные виды подобных тренажеров, действующих как по принципу вопрос-ответ, так и на основе моделирования техпроцесса в различных условиях, режимах. Задача оператору может ставиться следующим образом: удержать процесс производства в допустимом диапазоне качества и/или количества при заданном возмущении. Например, для ГЭС задача может быть задана так: обеспечить в электросети частоту на уровне 50 Гц при выделении системы на изолированный район при изменяющейся нагрузке или обеспечить выполнение планового задания активной мощности ГЭС при различных возмущениях. При этом чрезвычайно важно, чтобы обучаемый-оператор взаимодействовал с человеко-машинным интерфейсом, максимально приближенным к реальному или с его точной копией. Реализация такого рода задач может быть выполнена средствами имитационного моделирования платформы SIMIT фирмы Siemens. Отметим, что для имитации работы автоматических систем управления можно использованы ПО, выполняемое в физических ПЛК Simatic. Таким образом, практически отсутствуют затраты на инжиниринг для поддержания моделей САУ в актуальном состоянии.

3) Обучение эксплуатирующего персонала внесению изменений в системы автоматизации и технологии: добавление и проверка новых систем, устройств, алгоритмов. Данный вид обучения получил название “виртуальная пуско-наладка”. Трудности реализации такого рода обучения заключаются в том, что тестирование алгоритмов должно выполняться в реальном времени. То есть работа системы управления (или ее модели) и модель технологического процесса должны выполняться в едином времени. Задача для обучаемого может ставиться следующим образом: добавить новый сигнал или объект в систему управления, дополнить алгоритм управления новой функциональностью, не нарушая существующей. Платформа SIMIT также покрывает эти требования, обеспечивая моделирование состояния входов/выходов системы управления в реальном времени.

Подчеркнем, что наибольшую эффективность процесс обучения получает именно в философии Industry 4.0, когда модели техпроцесса и систем

Исследуемый много мир есть воистину мир двойников. Но я утверждаю, что эти двойники не только не бессильны, но самым решительным образом влияют на жизнь...

Ремейк по фразе М. Е. Салтыкова-Щедрина

автоматизации полностью соответствуют реальным версиям ПО систем автоматизации, технологии, оборудованию и комплексной проектной документации.

Функции производственной оптимизации и анализ исторических данных

Оперативная оптимизация работы ГЭС связана с повышением КПД основного и вспомогательного оборудования в течение значительного периода времени. Повышение эффективности может быть достигнуто за счет оптимизации работы существующей системы группового регулирования активной мощности (ГРАМ) и/или за счет внедрения новой системы рационального управления составом агрегатов.

Оперативная оптимизация работы ГЭС подразумевает:

- 1) оптимальное распределение задания мощности для повышения КПД каждого гидроагрегата и станции в целом с учетом многозонных агрегатов и агрегатов с разными номиналами;
- 2) равномерное распределение нагрузки, включений/отключений основного и вспомогательного оборудования;
- 3) автоматизация переходов между зонами разрешенной работы гидроагрегата;
- 4) повышение КПД каждого гидроагрегата и станции в целом;
- 5) повышение безопасности эксплуатации за счет учета состояния основного оборудования (превентивная диагностика и ремонт по состоянию);
- 6) снижение износа регулирующего оборудования;
- 7) прогнозирование задания и состояния ГЭС в зависимости от плана балансирующего рынка;
- 8) обучение персонала на основе моделирования состава агрегатов.

Комплекс оперативной оптимизации работы ГЭС может работать как в автономном режиме, анализируя недавние исторические данные, так и в on-line режиме, выполняя автоматическое управление основным и вспомогательным оборудованием ГЭС в реальном времени. Также комплекс оперативной оптимизации может выполнять функции «интеллектуального» советчика, помогая оператору принять решение в сложных, аварийных или внештатных ситуациях, поскольку эти ситуации могут быть заранее апробированы на математических моделях цифрового двойника.

В 2018 г. на одной из ГЭС сотрудниками группы компаний “СМС-Автоматизация” была успешно внедрена система рационального управления составом агрегатов нового поколения, выполняющая перечисленные функции [4, 5].

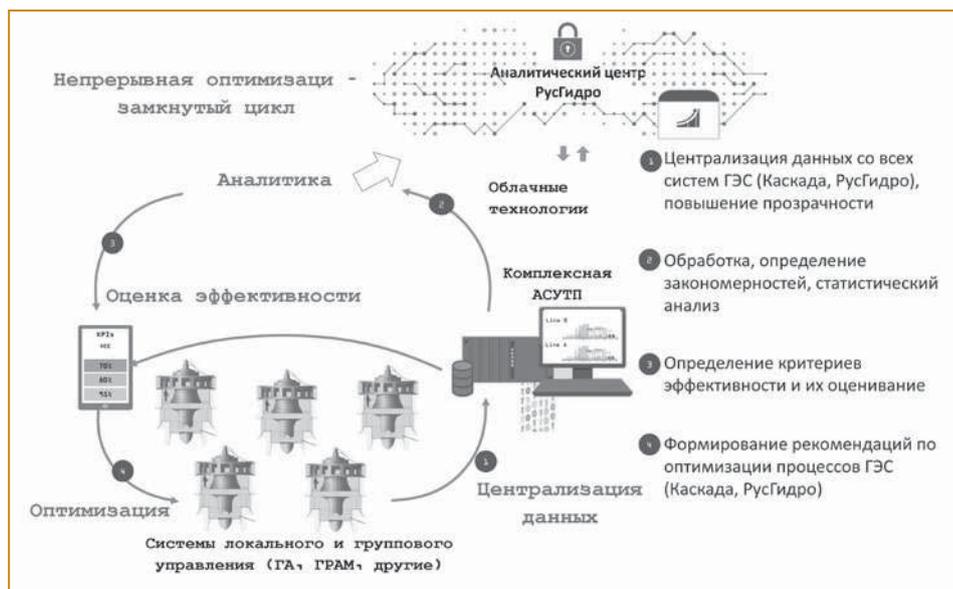


Рис. 2. Схема оптимизации работы ГЭС

Для решения задач производственной оптимизации могут использоваться технологии больших данных, собранных с ГЭС или каскада за значительный период времени. Полученная таким образом информация позволяет: формировать критерии эффективности ГЭС или каскада; непрерывно повышать качество и эффективность управления; увеличить горизонт планирования работы ГЭС; оптимизировать расходы на ремонты оборудования.

Для работы с большими данными необходим специальный инструментарий, выполняющий анализ данных, поиск закономерностей, оценивающий корреляции, реализующий машинное обучение аналитической системы на основе исторических данных. Результаты анализа могут быть использованы в оперативном управлении, а также в комбинации с результатами моделирования могут быть трансформированы в рекомендации по предотвращению возможных нежелательных ситуаций в будущем. Например, можно настроить оповещение персонала ГЭС при выходе параметров технологического процесса за пределы допустимых значений. Примером такого ПО может служить расширение SCADA системы WinCC Open Architecture под названием SM@rtSCADA.

Следует отметить, что оптимизация работы ГЭС — это непрерывный циклический процесс, который включает сбор данных, определение критериев эффективности, анализ данных и заканчивается выработкой управляющих воздействий, переводящих работу ГЭС в оптимальный режим (рис. 2).

Предсказательное техническое обслуживание и ремонты (ТОuP)

Цифровой двойник предприятия должен оперировать всеми необходимыми данными для проведения качественного ремонта оборудования: регламенты, инструкции по эксплуатации и ремонту, алгоритм проверки качества ремонта, проектная документация и т. д. Для

пользователя системы по одному нажатию на графическое представление насоса должна быть предоставлена информация о последнем и ближайшем запланированном ремонте: дата и вид ремонта, квалификация необходимого обслуживающего персонала, список операций для ремонта и контроля, список необходимых запасных частей, необходимая документация, технологически связанные объекты и т. д. Система должна автоматически составлять план обслуживания и ремонтов и уведомлять службу эксплуатации. При этом благодаря цифровизации могут быть решены такие задачи, как стыковка множе-

ства работ, выполняемых обслуживающим персоналом (сокращение времени вывода в ремонт), так и задачи автоматического формирования заявок на пополнение запасных частей и материалов.

Значительный эффект принесет переход от плановых ремонтов к предсказательным — по состоянию. В системе диспетчеризации комплексной АСУТП хранятся (или могут быть синтезированы с помощью ПО для анализа исторических данных) необходимые качественные признаки во всех режимах работы оборудования: «хороших», «плохих», предаварийных, аварийных и т. д. Цель системы предсказательного обслуживания — динамически составлять расписание ремонтов в зависимости от объективного состояния оборудования. Переход от ремонтов «на всякий случай» к ремонтам по состоянию позволит:

1) повысить качество планирования процесса обслуживания и ремонтов оборудования и, как следствие, достигнуть сокращения сроков простоя оборудования и связанных с ним издержек;

2) сократить затраты за счет ранней диагностики неисправностей, так как объем ремонта на ранней стадии требует меньших материальных и трудовых затрат.

Базы знаний ГЭС

Самое главное при работе в любой отрасли — это люди, специалисты, на чьих знаниях, навыках и умениях держится вся промышленность. В рамках цифровой ГЭС необходимо организовать информационный портал накопления знаний. Такая база знаний позволит быстрее находить нужные данные, понимать, как решаются задачи в различных сферах производства, быстрее обучаться, описывать нештатные или исключительные ситуации и действия в них, совершенствовать систему регламентов, руководств, стандартов. Базы знаний с различных ГЭС могут быть объединены в портал знаний всей отрасли — гидроэнергетики России.



Рис. 3. Цифровая ГЭС

Цифровизация — это долгий сложный процесс, в который должны быть вовлечены все подразделения предприятия, в данном случае — ГЭС. За рубежом уже существуют должности — “цифровой инженер”, “цифровой офицер” — специалист, который поддерживает инфраструктуру цифрового производства. В основе цифровой ГЭС лежит комплексная система диспетчеризации (рис. 3).

Обеспечение информационной безопасности

Обеспечение информационной безопасности (ИБ) — это неотъемлемая часть тренда цифровизации. Необходимо постоянно прорабатывать и совершенствовать меры ИБ: архитектуру цифровой ГЭС, правила работы и доступа к информации цифровой ГЭС, методы защиты и восстановления информации. Важно анализировать и своевременно реагировать на возникающие угрозы безопасности цифровой ГЭС. Обеспечение ИБ затрагивает все службы ГЭС.

Сценарий обеспечения ИБ цифровой ГЭС можно рассмотреть на примере установки обновления ПО. Офицер информационной безопасности получает уведомление о том, что производитель эксплуатируемого на предприятии ПО выпустил обновление, закрывающее критическую уязвимость, создающую угрозу ИБ предприятия. По базе данных комплексного проектирования он определяет конкретную систему и службу, ответственную за эксплуатацию. Совместно со службой эксплуатации проверяются устранение уязвимости, сохранение функциональности системы, интеграция со всеми смежными системами. Функциональные тесты системы выполняются на основе существующих моделей системы автоматизации и тех-

процесса. После успешного завершения тестирования формируется совместная заявка в систему планирования ремонтов (ТОиР) для установки обновления. После внесения изменений в реальной системе актуализируется эксплуатационная и проектная документация в среде комплексного проектирования и база знаний.

Заключение

По оценкам иностранных специалистов, следование концепциям создания цифрового производства позволяет снизить стоимости владения инфраструктурой предприятия на 10...15% за счет:

- 1) повышения квалификации персонала;
- 2) снижения затрат на поиск актуальной информации, как следствие, сократить затраты на проектирование, модернизацию и обслуживание;
- 3) оптимизации и повышения качества производства;
- 4) более эффективной и безопасной эксплуатации.

Многие из перечисленных вопросов обсуждались в 2018 г. на традиционной IV международной конференции, проводимой совместно компаниями Siemens и СМС (<http://industry-software.ru/conf2018/>).

Авторы статьи не ставят перед собой задачу охватить все сферы цифровизации производств и не ставят сверхцель по единовременному решению всех проблем. Напротив, даже перечисленный круг задач требует внимательного планомерного поступательного движения по направлению к единой цели — созданию цифровой ГЭС.

Результатом цифровизации ГЭС должна стать развивающаяся база знаний, моделей по всем объектам ГЭС, интегрированная со всеми ключевыми системами проектирования, моделирования, оперативного управления, сервисного обслуживания и ремонтов.

Список литературы

1. Власова М. Два в одном: для чего заводу нужен цифровой близнец. РБК. http://digital-russia.rbc.ru/article-page_11.html
2. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Марусева В.М. «Умные» цифровые двойники — основа новой парадигмы цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения // Трамплин к успеху. 2018. №13.
3. Тумаков А.В., Лондер М.И. Пространство как основа создания интегрированной системы управления электрическими сетями России // Естественные и технические науки. 2010. №4.
4. Захарченко В.Е. Основной критерий автоматизированного рационального управления составом агрегатов ГЭС//Автоматизация в промышленности. 2017. № 9.
5. Zakharchenko V.E. Modeling of operating HPP units' state rational control system // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1111. Number 1.

Артём Андреевич Сидоров — технический директор,

Виталий Евгеньевич Захарченко — канд. техн. наук, начальник отдела программирования

ООО НВФ "Сенсоры. Модули. Системы".

Контактный телефон +7 (846) 993-83-83 (1310).

E-mail: vitaliy.zakharchenko@sms-a.ru

[Http://sms.pf](http://sms.pf)