На правах рукописи

ИСМАГИЛОВ Тагир Салаватович

ПЛАНИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТКА ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Специальность:
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Уфа – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре электромеханики

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Хайруллин Ирек Ханифович** проф. кафедры электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **Гизатуллин Фарит Абдулганеевич** проф., зав. кафедрой электрооборудования летательных аппаратов и наземного транспорта Уфимского государственного авиационного технического университета

кандидат технических наук, доцент **Фаттахов Касым Мубинович** доц. кафедры электротехники и электрооборудования предприятий Уфимского государственного нефтяного технического университета

Ведущая организация: ГОУ ВПО Южно-Уральский государственный университет

Защита диссертации состоится 28 декабря 2010 года в $10^{\underline{00}}$ часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.02 при Уфимском государственном авиационном техническом университете по адресу:
450000, г.Уфа, ул. К.Маркса, 12

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан «25» ноября 2010 года

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.т.н., проф. Г.Н.Утляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационной работы. Одним из аспектов устойчивого управления любой отраслью, в том числе и энергетикой, является планирование её деятельности с учётом достижения поставленных целей. В основе процесса планирования в явном или неявном виде лежат прогнозы различных значимых факторов. От качества выполнения этих прогнозов существенно зависит и успешность управления.

Особенно важна задача прогнозирования в гидроэнергетике. Поскольку её главным и единственным энергоресурсом является потенциальная энергия масс воды, то ей, помимо всего, присуще значительное влияние природных явлений. Таким образом, гидрологические прогнозы играют существенную роль в осуществлении хозяйственной деятельности гидроэнергетики. В период эксплуатации ГЭС прогнозы используются в целях оптимизации режимов регулирования стока рек, планирования выработки электроэнергии и принятия мер по пропуску паводков через гидроузлы. При управлении речным стоком нельзя ограничиваться только интересами электроэнергетики и экономической выгодой от дополнительной выработки электроэнергии. Следует учитывать также и потребности других потребителей гидроресурсов, которые, как правило, вступают в противоречие с запросами энергетики.

Таким образом, планирование работы гидроэлектростанций является весьма нетривиальной задачей даже при наличии качественных прогнозов режимов рек и зависит от множества противоречивых условий.

Вопросы, касающиеся гидрологических прогнозов, освещены во многих работах отечественных и зарубежных авторов, среди которых следует выделить работы Г.П. Калинина, Ю.Б. Виноградова, В.Д. Комарова, Ю.М. Денисова, В.М. Мухина, А.П. Жидикова, Е.Г. Попова, Ю.М. Георгиевского, Л.С. Кучмента, В.В. Коваленко, Е.Г. Попова и др.

Тем не менее, следует признать, что большинство работ либо не имеют универсального характера и применимы лишь для конкретных ограниченных условий, либо при моделировании требуют учёта большого количества параметров рассматриваемой речной сети, измерение и расчёт которых связан с существенными трудозатратами. Например, при решении конкретных практических задач приходится сталкиваться со слабой гидрологической изученностью бассейнов рек и недостаточностью пунктов постоянного инструментального контроля уровней воды. Эти причины не позволяют применять на практике весь спектр известных методов прогнозирования гидрологических процессов.

Современная гидроэнергетика в этих условиях требует интеграции и автоматизации задач прогнозирования притока, планирования работы гидроэлектростанций и оптимизации графиков работы гидроузлов. Следовательно, возникает научный интерес к разработке численных методов решения этих задач с учётом дальнейшей их практической реализации в виде прикладного программного обеспечения.

Решению этого круга задач традиционно посвящены работы Института систем энергетики им. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН, Московского энергетического института (МЭИ), Научно-исследовательского института Электроэнергетики (Филиал ОАО «НТЦЭ» – ВНИИЭ), Энергосетьпроекта и ряда других организаций. Анализ этих работ позволяет говорить о том, что довольно глубоко изучены вопросы оптимизации режимов гидроэлектростанций по критерию максимизации выработки электроэнергии. Однако вопросам оптимизации, в том числе и с учётом неэнергетических потребителей гидроресурсов, т.е. задаче многокритериальной оптимизации режимов ГЭС, уделено недостаточно внимания.

Целью диссертационной работы является планирование режимов работы гидроэлектростанций на основе прогнозирования притока в водохранилища в условиях недостатка гидрологической информации.

Основные задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

1. Разработка алгоритма прогнозирования приточности рек в водохранилища в условиях недостатка гидрологической информации.
2. Математическое моделирование гидроэлектростанции для решения задачи планирования, обладающей достаточной адекватностью.
3. Разработка алгоритма построения графиков работы гидроэлектростанций в период подготовки к пропуску паводков, оптимизирующего режим ГЭС по критерию минимизации отклонений от заранее заданного режима сработки.
4. Разработка алгоритма построения графиков работы гидроэлектростанций в период пропуска паводков и высоких половодий, оптимизирующего режим ГЭС по критериям максимизации выработки электроэнергии и минимизации колебаний нижнего бьефа.
5. Разработка программного комплекса, реализующего все предложенные положения.
6. Проведение эксперимента с целью подтверждения адекватности полученных прогнозов, моделей и алгоритмов.

Методы исследований. При выполнении работы для решения поставленных задач использовались методы математического анализа, методы математического и имитационного моделирования. При реализации на ЭВМ основных положений работы были широко использованы методы вычислительной математики, методология унифицированного процесса разработки программного обеспечения (Rational Unified Process) на основе унифицированного языка моделирования (Unified Modeling Language), а также методы модульного, объектно-ориентированного и системного программирования.

На защиту выносятся:

1. Алгоритмы прогнозирования приточности рек на основе данных об осадках на площади водосбора и на основе данных об уровнях рек с гидропостов, находящихся в верхнем течении от прогнозируемого створа.

2. Математическая модель гидроэлектростанции для решения задачи планирования.

3. Алгоритм построения графиков предпаводковых сработок водохранилищ, оптимизирующих режимы ГЭС с учётом ограничений по критерию минимизации отклонений от заданного режима сработки.

4. Алгоритм построения графиков пропуска паводков водохранилищами, оптимизирующих режимы ГЭС с учётом ограничений по критерию максимизации выработки электроэнергии и критерию минимизации колебаний уровня нижнего бьефа.

5. Программный комплекс, реализующий разработанную модель режимов работы гидроэлектростанций, алгоритмы прогнозирования приточности и построения графиков работы ГЭС.

Научная новизна:

1. Разработаны алгоритмы прогнозирования приточности рек на основе данных об осадках на площади водосбора и данных о режиме рек в верхнем течении от прогнозируемого створа. В отличие от существующих аналогов предложенные алгоритмы позволяют выполнять прогноз в условиях недостатка гидрологической информации, слабой изученности речной сети и недостаточной её оснащённости наблюдательными постами.

2. Разработана общая математическая модель гидроэлектростанции для решения задачи планирования и на её основе впервые получены частные модели Павловского, Юмагузинского и Нугушского гидроузлов.

3. Алгоритмы построения графиков работы гидроэлектростанций, предлагаемые в диссертационной работе, в отличие от большинства существующих позволяют выполнять многокритериальную оптимизацию режимов ГЭС.

4. Новизна программной реализация основных положений диссертации подтверждена свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ №2010612801, №2010612803, №2010614902.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

Алгоритмы прогнозирования, разработанные в диссертации, позволяют решать важную практическую задачу прогнозирования приточности рек, что приводит как к повышению качества планирования роли гидроэлектростанции в энергосистеме региона, так и позволяет избегать негативных последствий от наводнений и засух для объектов народного хозяйства.

Разработанная математическая модель гидроэлектростанции может быть использована для решения задач планирования работы ГЭС, прогнозирования режимов рек в нижнем течении, имитационного моделирования работы гидроузла.

Предложенные в работе алгоритмы планирования позволяют строить графики работы, оптимизированные по критериям максимизации выработки электроэнергии, минимизации колебаний нижнего бьефа, минимизации отклонений от заданного режима работы. Детальное планирование пропуска паводков позволяет срезать пик паводка и защитить население, объекты

инфраструктуры, промышленности и сельского хозяйства от разрушительных последствий весенних паводков. Планирование графиков предпаводковых сработок водохранилищ необходимо для своевременной сработки водохранилища в период подготовки к пропуску паводков, а также в засушливые периоды года для расчёта долгосрочной работы гидроузла в режиме сработки с целью поддержания уровней рек в границах минимально допустимых значений.

Результаты работы в виде «Программно-технического комплекса прогнозирования приточности рек Белая, Уфа, Нугуш и совместного регулирования стока Юмагузинского, Павловского и Нугушского водохранилищ» успешно внедрены в промышленную эксплуатацию в ОАО «Башкирэнерго».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на международных, всероссийских и региональных научно-технических конференциях «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2008); «Международная конференция по компьютерным наукам и информационным технологиям (CSIT)» (Крит, Греция, 2009); 5-я Всероссийская зимняя школа семинар аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы науки и техники» (Уфа, 2010); Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодёжи «Научно исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения» (Уфа, 2010).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 10 публикациях, включающих 3 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ, 4 материалов конференций, 3 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав основного материала, заключения, списка литературы и 3 приложений. Работа изложена на 139 страницах машинописного текста, включая 63 рисунка и 7 таблиц. Библиографический список включает 106 наименований и занимает 9 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируется цель и задачи исследования, перечисляются основные методы исследования, отмечается научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведён обзор методов прогнозирования в общем безотносительно к какой-либо прикладной области, а также известных подходов и методов прогнозирования в гидрологии в частности.

Их анализ позволяет говорить о наличии трёх групп методов прогнозирования: методов, основанных на экспертных оценках, детерминированных методах и методах, основанных на вероятностной природе

прогнозируемого процесса. Выполнен их обзор и обозначены их основные достоинства и недостатки.

В гидрологии методы прогнозирования приточности традиционно разделяются на две группы методов.

Первая группа методов для решения задачи прогнозирования использует исследования зависимостей между запасами воды в русловой сети и расходами воды в прогнозируемом створе. Прогноз при этом строится на основе приближённых уравнений водного баланса. Эта группа методов может быть применена для прогнозов на крупных реках при наличии хорошо развитой гидрометрической сети, поэтому делается вывод о невозможности их применения в рамках данного исследования.

Вторая группа основана на исследованиях закономерностей движения речного потока. Эти методы представляют основу для краткосрочных прогнозов расходов и уровней воды. Теоретическую базу для них составляют уравнение водного баланса и различные вариации уравнений неразрывности в условиях неустановившегося потока. В зависимости от этого существуют два подхода: прогнозирование на основе приближённых уравнений трансформации волн паводка и методы соответственных уровней.

Первый подход основан на использовании уравнений Сен-Венана – закономерностей неустановившегося течения воды в открытом русле. Однако учитывая сложность их решения при выполнении практических задач, а также необходимость предварительного определения ряда гидроморфологических параметров речной сети, для достижения цели исследования данный подход применён быт не может.

Основное содержание второго подхода заключается в установлении эмпирических связей между соответственными уровнями (расходами) воды в верхнем и нижнем створах. Несмотря на эмпирический подход, эти методы могут успешно применяться для краткосрочных прогнозов приточности, особенно в контексте задач данной работы, поэтому имеется научный интерес к исследованиям в этой области.

В главе также уделено внимание вопросам регулирования речного стока водохранилищами. Обозначены виды регулирования в зависимости от длительности протекающих процессов. Выявлены их цели, задачи и факторы, затрудняющие решение задачи. К ним можно отнести взаимно противоречивые задачи максимизации выработки электрической энергии гидроэлектростанциями, обеспечения нужд неэнергетических потребителей гидроресурсов, и также защиты населения от неблагоприятных природных явлений, связанных с изменчивостью стока рек.

Выполнен обзор видов моделирования, их классификации согласно различным критериям, обозначены общие требования к моделям. Показаны математические модели гидроузлов, предлагаемые различными авторами. Обозначены основные параметры модели гидроэлектростанции и их взаимосвязи. Сделан вывод о том, что предлагаемые модели требуют

дополнений и уточнений для их применения при решении задач построения графиков работы ГЭС.

Вторая глава посвящена решению задачи прогнозирования приточности рек. Выполнена её формализация и общая постановка. Для описания процесса притока в водохранилище предложено использовать модель дискретных временных рядов:

$$Q = \{q_1, q_2, q_3, ...\}, \quad (1)$$

где q – средняя приточность в водохранилище за интервал от предыдущего наблюдения до текущего момента времени. Интервал между наблюдениями равен одним суткам.

Данные об осадках на площади водосбора реки, ограниченных прогнозируемым створом, были формализованы множеством временных рядов:

$$D^j = \{d_1^j, d_2^j, d_3^j, ...\}, \quad (2)$$

где j – индекс метеопоста, находящегося на площади водосбора реки; d^j – величина выпавших осадков, зафиксированных на j-ом метеопосте за время после предыдущего наблюдения.

Уровни рек на гидрометрических постах в верхнем течении реки характеризуются рядом:

$$L^k = \{l_1^k, l_2^k, l_3^k, ...\}, \quad (3)$$

где k – индекс гидрометрического поста; l^k – средний уровень реки на k-ом гидропосте, за время после предыдущего наблюдения.

Таким образом, имея на момент времени t архивы приточностей $Q = \{q_1, ..., q_t\}$, данные по величинам осадков $D^j = \{d_1^j, ..., d_t^j\}$ и данные об уровнях рек $L^k = \{l_1^k, ..., l_t^k\}$, необходимо получить прогноз приточности с заблаговременностью T:

$$Q = \{q_{t+1}, ..., q_{t+T}\}. \quad (4)$$

На практике, зачастую, данные по уровням рек L^k имеются только в периоды весенних паводков, поскольку круглогодичное поддержание работы гидрометрических постов бывает экономически накладно. В связи с этим необходимо рассмотреть две частные постановки задачи прогнозирования.

Первый случай предполагает отсутствие ряда L^k. Структуру прогнозируемого ряда $Q = \{q_{t+1}, ..., q_{t+T}\}$ при этом предложено рассматривать в виде декомпозиции:

$$Q(t) = S(t) + O(t). \quad (5)$$

где $S(t)$ – временной ряд, отражающий сезонную компоненту; $O(t)$ – ряд, отражающий колебания приточности, вызванные осадками в бассейне реки.

Для расчёта $S(t)$ был использован принцип подобия. Он предполагает выборку из архива данных приточностей m сезонов, наиболее близких к текущему сезону с последующим расчётом среднего арифметического соответственных элементов ряда:

$$S(t)=\frac{\sum_{p=1}^{m}Q^{p}(t)}{m} \quad \text{или} \quad s_i=\frac{\sum_{p=1}^{m}q_i^p}{m}, \tag{6}$$

где $Q^{p}(t)$ – выборка в m сезонов из архива наблюдений, наиболее близких к текущему.

Выборка при этом осуществлялась согласно критерию:

1. Расчёт для каждого сезона архива величины k, представляющей собой функцию расстояния между текущим и рассматриваемым сезоном:

$$k=\sqrt{\frac{\sum_{t=t_0-g}^{t_0}\left(q_t^0-q_t^i\right)^2}{g}}\ . \tag{7}$$

2. Выборка m сезонов с минимальными расстояниями k.

Расчёт компоненты $O(t)$ был выполнен согласно выражению:

$$o_t=\sum_j c^j d_{t-n_j}^j\ , \tag{8}$$

где c^j – интегральный коэффициент, отражающий меру увлажнённости почвы в бассейне реки; d^j – элемент ряда (2), т.е. величина выпавших осадков на j-ом метеопосте; n_j – время добегания осадков от j-го метеопоста до прогнозируемого створа реки.

С учётом (5), (6), (8) имеем общий вид выражения для прогнозирования приточности по осадкам на площади водосбора реки и без учёта данных о режиме рек:

$$q_t=\frac{\sum_{p=1}^{m}q_i^p}{m}+\sum_j c^j d_{t-n_j}^j\ . \tag{9}$$

Второй частный случай общей задачи прогнозирования предполагает наличие ряда L^k. При этой постановке для прогнозируемого ряда $Q(t)$ была выбрана структура:

$$q_t=q_{t-1}+\Delta q_t\ , \tag{10}$$

где q_t – член прогнозируемого ряда (1), Δq_t – величина приращения притока за период $[t-1;t]$.

Для установления количественной связи между притоком воды в водохранилище и уровнями рек выше по течению от прогнозируемого створа предлагается использовать модель линейной регрессии:

$$\Delta q_t=b_0+b_1\Delta l_{t-n_1}^1+b_2\Delta l_{t-n_2}^2+\ldots+b_k\Delta l_{t-n_k}^k\ , \tag{11}$$

где l^k – уровень реки на k-ом гидропосте; n_k – время добегания со створа k-го гидропоста до прогнозируемого створа реки; b_k – коэффициенты регрессии.

Применение (11) предполагает предварительную настройку модели с подбором оценок коэффициентов регрессии $b_1,\ldots,\ b_n$. Для решения этой задачи был использован известный метод наименьших квадратов (МНК).

Определив оценки коэффициентов регрессии, окончательный расчёт прогнозного ряда был выполнен по выражению:

$$q_t = q_{t-1} + (b_0 + b_1(l^1_{t-n_1} - l^1_{t-n_1+1}) + b_2(l^2_{t-n_2} - l^2_{t-n_2+1}) + ... + b_k(l^k_{t-n_k} - l^k_{t-n_k+1})), \quad (14)$$

Таким образом, в главе были получены выражения (9) и (14) для выполнения прогноза притока рек в водохранилище по осадкам в бассейне реки и по данным о режиме рек в верхнем течении.

Третья глава диссертации посвящена решению задач моделирования гидроэлектростанции и планирования её работы.

При эксплуатации гидроэлектростанций на основе полученных прогнозов приточности выполняются водноэнергетические расчёты. Под этим понимается совокупность операций, выполняемых для определения выработки электроэнергии на ГЭС в условиях разной водности потока применительно к различным параметрам гидроузлов и водохранилищ и правилам пользования водных ресурсов. Водноэнергетические расчёты являются основой планирования работы ГЭС и выполняются с целью определения основных режимных параметров ГЭС на период планирования.

Для выполнения этих расчётов требуется математическое моделирование гидроэлектростанции для решения задачи планирования. При этом модель должна:

1. Содержать все значимые параметры ГЭС и водохранилища;
2. По возможности наиболее полно описывать взаимосвязь параметров;
3. Обеспечивать возможность построения различных (посуточных, почасовых) графиков работы ГЭС, т.е. расчёта характеристик модели на заданный промежуток времени с заданным интервалом;
4. Быть построена с учётом её дальнейшей практической реализации.

С учётом этих требований были определены параметры модели:

1. *USL* – уровень верхнего бьефа (УВБ). Уровень водоёма, непосредственно примыкающего к плотине и находящегося по течению выше от неё. Во всём диапазоне изменения УВБ располагаются следующие важные отметки: нормальный подпорный уровень (НПУ) USL_{NWL}; форсированный подпорный уровень (ФПУ) USL_{HWL}; уровень мёртвого объёма USL_{DWL}.
2. *DSL* – уровень нижнего бьефа (УНБ). Уровень водоёма, непосредственно примыкающего к плотине и находящегося в нижнем течении.
3. *Press* – напор гидроэлектростанции. Принято различать напор брутто $H_T^{брутто}$ и напор нетто H_T. В данной работе использован напор брутто, равный геометрическому напору ГЭС, поскольку его расчёт более прост, а погрешность расчёта для средне и высоконапорных ГЭС незначительна.
4. *W* – объём воды в водохранилище.
5. *Affx* – приток в створ водохранилища. Один из основных параметров модели, определяющий водный баланс гидроузла.
6. Расходы через створ водохранилища: $disch_{DS}$ – суммарный расход в нижний бьеф, включающий в себя все далее перечисленные виды; $disch_{SHU}$ – суммарный расход через все гидроагрегаты ГЭС; $disch_F$ – расход на

фильтрацию; $disch_{SP}$ – расходы на холостой сброс через водосливные сооружения; S_{MIN}, S_{MAX} – ограничения на максимальные и минимальные суммарные расходы в нижний бьеф. Набор этих ограничений индивидуален для каждой ГЭС и может складываться из эксплуатационных интервалов работы гидроагрегатов, допустимых величин пропусков через водосбросы, ограничений на скорости изменения УВБ и т.д.

7. P_{HU} – мощность гидроагрегата. Расчёт мощности может быть выполнен по эксплуатационной характеристике гидроагрегата при заданных параметрах расхода и напора.

8. Периоды сезона: T_S – множество летних дней (дней, режим рек при которых характеризуется отсутствием ледяного покрова); T_W– множество зимних дней (дней, режим рек при которых характеризуется присутствием ледяного покрова); T_N – множество дней, при которых осуществляется навигация; T_D – множество дней, соответствующих режиму сработки водохранилища; T_U – множество дней, соответствующих режиму наполнения водохранилища.

Эти параметры связаны следующими отношениями и зависимостями:

1. $disch_{DS} = disch_{HU} + disch_{SP} + disch_f$ – баланс расходов через створ ГЭС.

2. $disch_{DS} = affx + accum$ – выражение, характеризующее общий водный баланс водохранилища, где $accum$ – аккумуляция воды в водохранилище.

3. $disch_{MIN} \le disch_{DS} \le disch_{MAX}$ – ограничения на расходы.

4. $USL^t \ge USL_{DWL}$ и $USL^t \le USL_{HWL}$ при любых t и $USL^t \le USL_{NWL}$ при $t \ne T_D$. Эти неравенства означают, что УВБ всегда не ниже УМО и не выше НПУ для всех периодов, кроме периода пропуска паводков (наполнения), когда можно кратковременно форсировать уровень до ФПУ.

5. $F_{DSL}(disch_{DS})$ – зависимость УНБ от суммарного расхода в нижний бьеф, так называемая кривая связи уровней и расходов.

6. $press = USL - DSL$ – напор брутто равен геометрическому напору.

7. $W = F_W(USL)$ – функция отражает зависимость объёма водохранилища от УВБ, т.е. кривую статических объёмов водохранилища.

8. $P_{HU} = F_{HU}(disch_{HU}, press)$ – эксплуатационная характеристика гидроагрегатов ГЭС.

Таким образом, в общем виде модель гидроэлектростанции для решения задачи планирования, характеризующая состояние гидроузла на момент времени t, может быть описана следующей системой уравнений и неравенств:

$$\begin{cases} disch_{DS}^t = disch_{HU}^t + disch_{SP}^t + disch_f^t \\ W^{t+1} = W^t + (affx^{t+1} - disch_{DS}^{t+1}) \\ press^t = USL^t - DSL^t \\ P^t = P_{HU}^t \cdot N_{HU}^t \\ USL^t = F_{USL}(W^t) \\ W^t = F_W\left(USL^t\right) \\ DSL^t = F_{DSL}(disch_{DS}^t) \\ P_{HU}^t = F_{HU}(press^t, disch_{HU}^t) \\ S_{MIN}^t \le disch_{DS}^t \le S_{MAX}^t \\ USL_{DWL} \le USL^t \le USL_{HWL} \\ USL^t \le USL_{NWL}, \text{ при } t \in T_U \end{cases} . \quad (15)$$

При построении моделей конкретных гидроэлектростанций система (15) может быть дополнена выражениями, характеризующими какие-либо частные особенности моделируемой ГЭС.

Имея математическую модель гидроэлектростанции, можно приступать к решению задач планирования работы ГЭС. Этим вопросам посвящена остальная часть главы.

Под планированием понимается расчёт многомерного ряда $M_i(t)$ множества состояний модели ГЭС на интервал времени $t \in [T_0; T_1]$, где i – индекс параметра модели, t – время; T_0 , T_1 – время начала и окончания графика.

Постановка задачи планирования на период предпаводковой сработки.

Начальные условия:

1. T_0 и T_1 – даты начала и окончания графика;
2. USL_0 и USL_1 – УВБ на начало и окончание графика;
3. $affx = \{affx^t : t \in [T_0; T_1]\}$ – посуточный прогноз притока;
4. $k = \{k^t : t \in [T_0; T_1]\}$ – посуточные величины коэффициента экономии воды;
5. $S_{\min}^t$, $S_{\max}^t$ – посуточные ограничения на расход в НБ.
6. Оптимальный график работы ГЭС без учёта ограничений:

$$\overline{disch}_{DS}^t = k^t \frac{F_W(USL_{T_0}) - F_W(USL_{T_1}) + \sum_{n=T_0}^{T_1} affx^n}{\sum_{m=T_0}^{T_1} k^m} . \quad (16)$$

Следует пояснить, что выражение (16) характеризует сработку водохранилища при постоянном расходе в НБ. При этом введён коэффициент

экономии воды *k*, учитывающий ограничение расхода воды в выходные дни, связанное с понижением энергопотребления.

Требуется найти такое $M_i(t)$ что:

$$O = \sqrt{\frac{\sum_{t=T_0}^{T_1}\left(disch_{DS}^t - \overline{disch}_{DS}^t\right)^2}{T_1 - T_0 + 1}} \to \min \tag{17}$$

$$\text{при} \quad \begin{cases} \sum_{t=T_0}^{T_1} disch_{DS}^t = F_W\left(USL_{T_0}\right) - F_W\left(USL_{T_1}\right) + \sum_{t=T_0}^{T_1} affx^t \\ S_{\min}^t \le disch_{DS}^t \le S_{\max}^t \end{cases}, \tag{18}$$

$$\text{где} \quad S_{\min}^t = F_{\min}\left(\left\{disch_{DS}^t : t \in [T_0; t]\right\}\right), \; S_{\max}^t = F_{\max}\left(\left\{disch_{DS}^t : t \in [T_0; t]\right\}\right). \tag{19}$$

Задача поставлена как задача многомерной однокритериальной оптимизации при целевой функции (17) и ограничениях (18).

Решение задачи было выполнено в два этапа. Первый этап заключается в поиске численным итерационным методом точки $disch_{DS}^t : t \in [T_0, T_1]$. Второй этап – оптимизация полученного решения известными методами многомерной оптимизации с ограничениями. В качестве последнего был выбран модифицированный метод Хука-Дживса.

Численный поиск решения представляет собой итерационное приближение от графика (16), который, как правило, лежит вне зоны ограничений, к зоне допустимых значений (18) и (19). При этом на каждом шаге вычисляется общая ошибка графика:

$$W_{err} = W_{USL}(USL_1) - W_{USL}(USL_1'), \tag{20}$$

где *USL′* – конечный УВБ, полученный на текущей итерации. Далее рассчитывается величина коррекции для нивелирования ошибки:

$$disch_{corr} = \frac{W_{err}}{T_1 - T_0 - N_{err} + 1}, \tag{21}$$

где N_{err} – количество дней, когда допустима коррекция графика.

Постановка задачи планирования на период пропуска паводков водохранилищем.

Начальные условия:

1. T_0 и T_1 – даты начала и окончания графика;
2. USL_0 и USL_1 – УВБ на начало и окончание графика;
3. $affx = \left\{affx^t : t \in [T_0; T_1]\right\}$ – посуточный прогноз притока;
4. Оптимальный для неэнергетических водопользователей график работы ГЭС без учёта ограничений:

$$\overline{disch}_{DS}^t = \frac{F_W(USL_{T_1}) - F_W(USL_{T_0}) + \sum_{n=T_0}^{T_1} affx^n}{T_1 - T_0 + 1}; \tag{22}$$

5. Оптимальный график работы ГЭС без учёта ограничений, максимизирующий выработку электроэнергии:

$$\overline{\overline{disch}}_{HU}^{t} = \begin{cases} affx^t, \text{если } USL^t < USL_{NWL} \text{ и } affx^t < \max \\ \max, \text{если } USL^t < USL_{NWL} \text{ и } affx^t \geq \max \\ \max, \text{если } USL^t \geq USL_{NWL} \text{ и } affx^t \geq \max \\ affx^t, \text{если } USL^t \geq USL_{NWL} \text{ и } affx^t < \max \end{cases}; \quad (23)$$

6. $S_{\min}^{t}, S_{\max}^{t}$ – посуточные ограничения на расход в НБ.

Здесь выражение (22) отражает работу ГЭС на постоянном расходе, т.е. паводок целиком сглаживается, а выражение (23) характеризует работу ГЭС на расходе притока через гидроагрегаты до достижения НПУ с последующим открытием холостых сбросов для поддержания НПУ.

Требуется решить задачу многокритериального математического программирования для критериев:

$$h\left(disch_{HU}^{t}\right) = \sum_{t=T_0}^{T_1} F_{HU}\left(disch_{HU}^{t}\right) \to \max \ , \quad (24)$$

$$g\left(disch_{DS}^{t}\right) = \sqrt{\frac{\sum_{t=T_0}^{T_1}\left(\overline{disch}_{DS}^{t} - disch_{DS}^{t}\right)^2}{T_1 - T_0 + 1}} \to \min \ , \quad (25)$$

целевой функции: $$U(g,h) = (h' - g') \to \max \ , \quad (26)$$

где h' и g' соответственно нормализованные функции h и g, приведённые к безразмерному виду, при ограничениях (18).

Решение задачи было выполнено аналогично графику сработки в два этапа. Первый этап заключается в поиске численным итерационным методом точки $disch_{DS}^{t} : t \in [T_0, T_1]$. Второй этап – оптимизация полученного решения модифицированным методом Хука-Дживса.

Численный поиск решения основывается на итерационном приближении от графика, построенного по (22), который в большинстве случаев не удовлетворяет ограничениям (18), к области допустимых значений. При этом первоначально выполняется приближение к области (18.1) снизу, согласно:

$$V_0 = \sum_{k}\left(disch_{S_d}^{k} - disch_{S_r}^{k}\right), \quad (27)$$

затем сверху согласно: $$V_1 = \sum_{m}\left(disch_{S_r}^{m} - disch_{S_d}^{m}\right), \quad (28)$$

с последующей окончательной корректировкой для удовлетворения всем ограничениям (18).

Наглядная иллюстрация работы алгоритма приведена на рис.1-3. На рис.1 изображён график, построенный с учётом требований неэнергетических водопользователей, на рис.2 – максимизации выработки электроэнергии. Откуда видно что, в первом случае происходит недопустимое падение УВБ ниже УМО в начале графика и превышение НПУ и ФПУ в конце графика. Во втором случае по причине наполнения водохранилища, происходит открытие затворов холостого сброса в период пика паводка, что может привести к

катастрофическим последствиям для населения и объектов промышленности в нижнем бьефе гидроузла. График, построенный алгоритмом (рис.3), обеспечивает как срезку пика паводка, так и оптимизацию выработки электроэнергии.

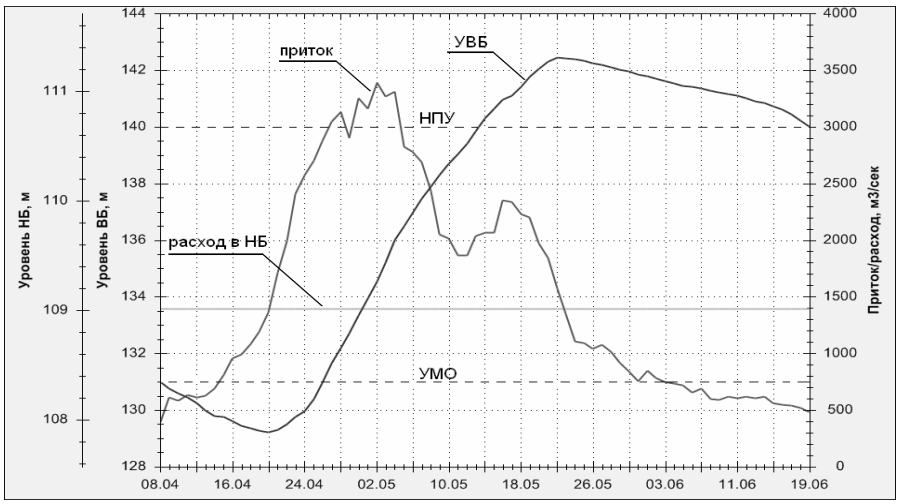


Рисунок 1 – График пропуска паводка, построенный согласно (22)

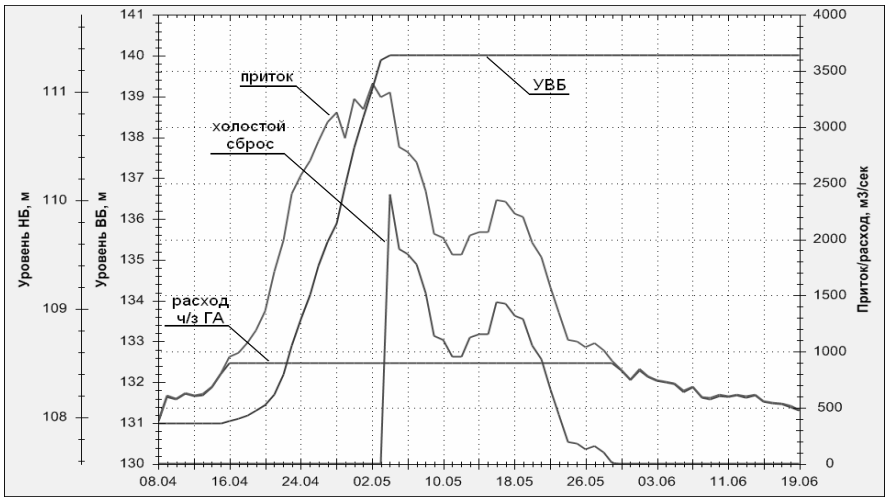
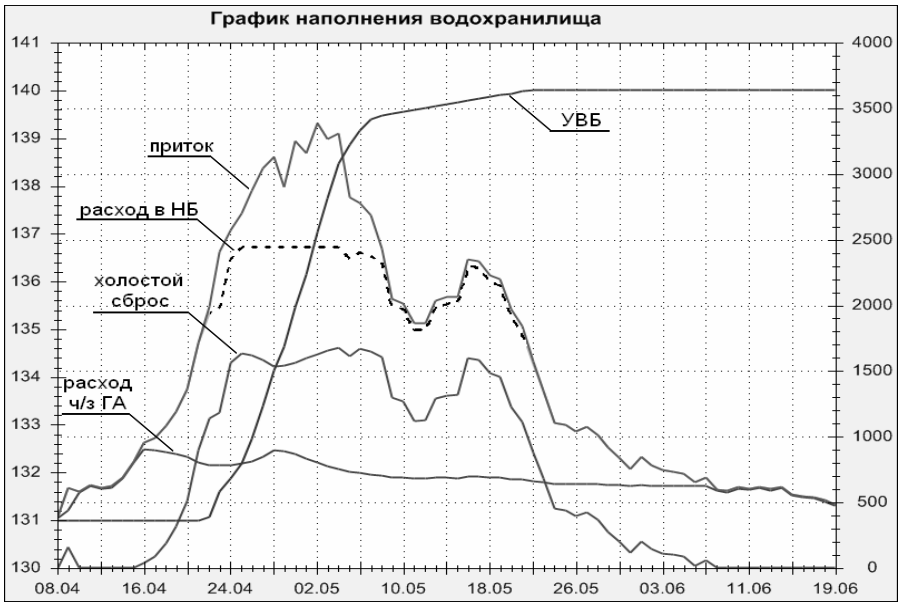


Рисунок 2 – График пропуска паводка, построенный согласно (23)



Русунок 3 – График пропуска паводка, построенный алгоритмом

Четвёртая глава посвящена практической части работы – реализации предложенных в предыдущих главах моделей и алгоритмов в виде программного обеспечения, который разрабатывался с целью выполнения расчётов для Павловской, Юмагузинской и Нугушской ГЭС. Уделено внимание общему описанию перечисленных гидроузлов, проведён эксперимент с целью оценки точности и адекватности разработанных моделей и алгоритмов.

Программный комплекс разработан по модульному принципу и структурно состоит из сервера вычислений, хранилища данных под управлением СУБД, web-сервера и web-интерфейса. Такая структура обладает рядом преимуществ. Во-первых, имеется возможность отдельно разрабатывать, модифицировать и тестировать разные структурные части комплекса. Во-вторых, размещение отдельных модулей на разных физических серверах не представляет какой-либо сложности.

Многопоточная схема функционирования программы, несмотря на несколько большие трудозатраты на разработку и отладку, позволяет существенно повысить эффективность использования аппаратного обеспечения, а также реализует возможность многопользовательского режима работы.

Для подтверждения адекватности разработанных алгоритмов прогноза были поставлены эксперименты. В течение заданного календарного периода ежесуточно строились прогнозы приточности на краткосрочный период (на 8 суток). После окончания периода полученные прогнозные величины сравнивались с фактическими значениями среднесуточных величин притоков и рассчитывались величины ошибок прогноза.

Критерием качества (точности) выполненных прогнозов могут быть использованы значения абсолютных и относительных величин среднеквадратичных ошибок прогноза:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(disch_i^{прогноз} - disch_i^{факт}\right)^2}\ , \qquad (29)$$

$$S' = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{disch_i^{прогноз}}{disch_i^{факт}} - 1\right)^2}\ , \qquad (30)$$

где S – абсолютная среднеквадратичная ошибка прогноза; S' - относительная среднеквадратичная величина ошибки прогноза; N – количество суточных прогнозов приточности; $disch_i^{прогноз}$ – прогноз притока; $disch_i^{факт}$ – фактический приток на соответствующие сутки.

Для алгоритма прогнозирования на основе данных об осадках в бассейне реки, были получены СКО от 13 м^3/с (9%) в маловодные годы до 62 м^3/с (25%) в многоводные годы. Для алгоритма прогнозирования на основе данных об уровнях рек, для ПГЭС на данных 2009 г. был получен СКО = 153 м^3/с (23%). Стоит пояснить, что эксперименты с использованием второго алгоритма были проведены в период весеннего паводка, для которого прогнозирование приточности является особенно трудной задачей.

В главе также описаны эксперименты по подтверждению адекватности разработанных моделей гидроэлектростанций для решения задачи планирования. Согласно их результатам для Павловской ГЭС по параметру УВБ получена СКО 27 см (5.6 %) в период весеннего паводка и в 3 см (18 %) в период межени; для Юмагузинской ГЭС соответственно 2 см (3 %) и 21 см (3.3 %).

Адекватность алгоритмов построения графиков работы ГЭС была подтверждена при проведении многократных экспериментов, а также во время опытной и промышленной эксплуатации программного комплекса в ОАО «Башкирэнерго».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан алгоритм прогнозирования приточности в створ водохранилища по данным об осадках на площади водосбора реки. Особенностью алгоритма является возможность её применения в условиях отсутствия гидроморфологической информации о речной сети и гидрометрических данных о режимах рек. Проведённые экспериментальные исследования позволяют говорить о величине среднеквадратичного отклонения (СКО) прогноза от факта в период межени от 9% до 25%.
2. Разработан алгоритм прогнозирования приточности в створ водохранилища по данным об уровнях рек выше по течению. По результатам экспериментов СКО прогноза от факта в период паводка составила 22%.
3. Разработана модель режимов гидроэлектростанции, которая позволяет выполнять водохозяйственные и водноэнергетические расчёты при решении задачи планирования работы ГЭС. Имитационное моделирование показало СКО расчётного параметра УВБ для ПГЭС в среднем по всем экспериментам 13 см (2.3 %), в период паводка 24 см (5.6 %), для ЮГЭС в среднем по всем экспериментам 12 см (2.3 %), в период паводка 18 см (3.3 %).
4. Предложен алгоритм построения графиков работы ГЭС, в период предпаводковой сработки. Алгоритм оптимизирует режимы ГЭС по критерию минимизации отклонения от целевого расхода в нижний бьеф с учётом всех эксплуатационных ограничений и требований неэнергетических пользователей водных ресурсов.
5. Разработан алгоритм построения графиков работы ГЭС в период пропуска паводков и высоких половодий. Алгоритм оптимизирует режимы ГЭС по критерию максимизации выработки электроэнергии и минимизации колебаний уровня нижнего бьефа. Последнее обеспечивает условия противопаводковой защиты населения и срезки пика паводка.
6. Разработано программное обеспечение, реализующее основные теоретические положения работы. Программный продукт внедрён в промышленную эксплуатацию в ОАО «Башкирэнерго». Получены свидетельства о Государственной регистрации программ ЭВМ №2010612801, №2010612803 и №2010614902.

ОСНОВЫНЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Хайруллин, И.Х. Алгоритм построения графиков предпаводковых сработок водохранилищ / И.Х. Хайруллин, Т.С. Исмагилов // Вестник ВГТУ. – 2010. – Т. 6, № 11. – С.85 – 89.
2. Исмагилов, Т.С. Метод прогнозирования приточности рек в условиях их недостаточной изученности на примере рек Уфа, Белая, Нугуш / Т.С. Исмагилов // Естественные и технические науки. – 2010. – № 5. – С. 501 – 505.
3. Исмагилов, Т.С. Методы решения задачи прогнозирования в энергетике / Т.С. Исмагилов // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14, № 4 (39). – С. 93 – 96.

В других изданиях

1. Исмагилов, Т.С. Проблема прогнозирования в энергетике / Т.С. Исмагилов // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской конференции молодых учёных. – Новосибирск: НГТУ, 2008. – Ч. 3. – С. 163 – 165.
2. Ismagilov, F.R. Hydropower station’s seasonal scheduling. The algorithm of the pre-flood drawdown / F.R. Ismagilov, I.H. Khairullin, T.S. Ismagilov // CSIT’2009: proceedings of the 11-th International Workshop on Computer Science and Information Technologies (Crete, Greece October 5-8, 2009). – Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2009. – Vol. 2. – P. 50 – 53.
3. Исмагилов, Т.С. Статистический метод прогнозирования приточности рек в гидроэнергетике / Т.С. Исмагилов // Актуальные проблемы науки и техники: сборник трудов 5-й всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых. – Уфа: УГАТУ, 2010. – С. 193 – 197.
4. Исмагилов, Т.С. Моделирование гидроэлектростанций, для решения задач их планирования / Т.С. Исмагилов // Научно исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: сборник трудов. – Уфа: УГАТУ, 2010. – С. 65 – 67.
5. Модель Павловской, Юмагузинской и Нугушской ГЭС: св-во об официальной регистрации программ для ЭВМ №2010614902 от 28.06.2010 / Исмагилов Т.С., Хайруллин И.Х., Коротков А.Б.
6. Построение графиков работы Павловской, Юмагузинской и Нугушской ГЭС: св-во об официальной регистрации программ для ЭВМ №2010612803 от 23.04.2010 / Исмагилов Т.С., Крайнов А.П., Гришин А.П. //
7. Прогнозирование приточности рек Уфа, Белая, Нугуш: св-во об официальной регистрации программ для ЭВМ №2010611086 от 23.04.2010 / Исмагилов Т.С., Исмагилов Ф.Р., Шахмаев И.З.

Диссертант Т.С. Исмагилов

ИСМАГИЛОВ Тагир Салаватович

ПЛАНИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТКА ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Специальность 05.09.03 –
Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 24.11.2010. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отт. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 483

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный
технический университет
Центр оперативной полиграфии УГАТУ
450000, Уфа-центр, ул.К.Маркса, 12