

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра «Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических  
систем и электрических сетей»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_      \_\_\_\_\_  
подпись, дата      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО  
ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПРИТОКА К СТОРУ ГАЭС НА ОСНОВЕ  
НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный руководитель	_____ подпись, дата	<u>Инженер 1-й категории</u> <u>ГЭС филиала ПАО</u> <u>«РусГидро» - «Саяно-</u> <u>Шушенская ГЭС имени</u> <u>П.С. Непорожного»</u> должность	<u>Г.С. Шевченко</u> инициалы, фамилия
Выпускник	_____ подпись, дата		<u>А.А. Лопошниченко</u> инициалы, фамилия
Рецензент	_____ подпись, дата	<u>Начальник ОС филиала</u> <u>ПАО «РусГидро» -</u> <u>«Саяно-Шушенская ГЭС</u> <u>имени П.С.</u> <u>Непорожного»</u> должность	<u>И.Ю. Погоняйченко</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролёр	_____ подпись, дата		<u>А.А. Чабанова</u> инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2020

## АННОТАЦИЯ

Ввиду неравномерности речного стока спрогнозировать его крайне сложно. Это требует обработки большого количества исходных данных многолетних наблюдений (гидрологические, морфометрические, метеорологические и др.). Существующие методы прогнозирования речного стока требуют большого количества трудозатрат на обработку этих данных, определение весов параметров, определение зависимостей между входными параметрами и др. В связи с этим возникает вопрос о доработке существующих методов прогнозирования.

С развитием вычислительных технологий и появлением методов нейросетевой обработки информации, процесс прогнозирования притока к створу ГЭС возможно усовершенствовать. Главным преимуществом при таком подходе к планированию водно-энергетических режимов ГЭС будет являться то, что при использовании нейронной сети отпадает необходимость в сборе большого числа исходных данных, в большинстве случаев зависимых друг от друга, в анализе этих зависимостей, непосредственном определении степени влияния каждого фактора на конечный результат прогноза.

## АВТОРЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Повышение эффективности решения задач по прогнозированию притока к створу ГЭС на основе нейросетевых методов обработки информации».

### **Цель работы:**

Разработка методики прогноза полезного притока к створу ГЭС на основании многолетних наблюдений с использованием нейросетевых методов обработки информации.

### **Основные задачи:**

Показать, что с учетом чрезвычайной неравномерности стока по времени эффективное планирование водно-энергетических режимов ГЭС невозможно без прогнозирования речного стока.

Проанализировать исходные данные многолетних наблюдений (гидрологические, морфометрические, метеорологические и др.).

Показать, что с помощью разрабатываемой методики можно осуществлять прогноз полезного притока к створу ГЭС, при относительно небольшом количестве исходных данных, с достаточной точностью.

### **Научная новизна:**

Предложенная методика позволяет получить прогноз полезного притока к створу ГЭС при относительно небольшом количестве исходных данных.

### **Практическая значимость работы:**

Результаты работы могут быть использованы при прогнозировании речного стока, для наиболее эффективного планирования водно-энергетических режимов ГЭС.

### **Личный вклад автора:**

Систематизация собранных данных, разработка программного кода, обучение нейронной сети на представленной выборке данных.

### **Апробация работы:**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- VI Всероссийской научно — практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В XXI ВЕКЕ», Саяногорск р.п. Черемушки, 2019 года.

- VII Всероссийской научно — практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В XXI ВЕКЕ», Саяногорск р.п. Черемушки, 2020 года.

### **Публикации:**

По результатам работы опубликовано 2 статьи, которые включены в перечень реализуемых научных изданий определенных РИНЦ, ISBN.

### **Структура и объём диссертации:**

Диссертация состоит из аннотации, автореферата, введения, трех глав, заключения, списка использованных источников и приложений.

**Ключевые слова:** водохранилища ГЭС, водно-энергетический режим, нейронные сети, речной сток, прогнозирование.

## ABSTRACT

The final qualifying work on the theme " Improving the efficiency of solving problems of predicting the influx of hydroelectric power to the target site based on neural network information processing methods".

### **Purpose of work:**

Development of a methodology for predicting the beneficial influx to the site of a hydropower plant based on long-term observations using neural network information processing methods.

### **Main task:**

To show that taking into account the extreme flow unevenness in time, effective planning of hydropower water and energy regimes is impossible without forecasting river runoff.

To analyze the initial data of long-term observations (hydrological, morphometric, meteorological, etc.).

To show that with the help of the developed methodology it is possible to forecast a useful inflow to the site of a hydroelectric power station, with a relatively small amount of initial data, with sufficient accuracy.

### **Scientific novelty:**

The proposed methodology allows one to obtain a forecast of useful inflow to the HPP site with a relatively small amount of initial data.

### **Practical significance of the work:**

The results of the work can be used in forecasting river flow, for the most effective planning of hydropower water-energy regimes.

### **Personal contribution of the author:**

Systematization of the collected data, development of program code, training of neural networks on the presented data sample.

### **Testing work:**

The results of the dissertation were reported and discussed at the following conferences:

- VI All-Russian scientific and practical conference of young scientists, specialists, graduate students and students "HYDROELECTRIC STATIONS IN THE XXI CENTURY", Sayanogorsk r.p. Cheryomushki, 2019.

- VII All-Russian scientific and practical conference of young scientists, specialists, graduate students and students "HYDROELECTRIC STATIONS IN THE XXI CENTURY", Sayanogorsk r.p. Cheryomushki, 2020.

### **Publications:**

Based on the results of the work, 2 articles were published, which are included in the list of sold scientific publications of certain RSCI, ISBN.

### **The structure and scope of the dissertation:**

The dissertation consists of an abstract, introduction, three chapters, conclusion, list of sources used and applications.

**Key words:** hydroelectric power station reservoirs, water-energy regime, neural networks, river flow, forecasting.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	8
1 Общие сведения о планировании водно-энергетических режимов ГЭС .....	9
1.1 Необходимость планирования водно-энергетических режимов ГЭС .....	9
1.2 Основные участники процесса управления водно-энергетическими режимами ГЭС .....	11
1.3 Необходимые исходные данные для планирования водно-энергетических режимов ГЭС .....	11
1.3.1 Гидрологическая информация .....	12
1.3.2 Морфометрическая информация .....	12
1.3.3 Метеорологическая информация .....	12
1.3.4 Информация о пропускной способности водосбросных сооружений гидроузла .....	13
1.3.5 Водохозяйственная информация .....	13
1.3.6 Водно-энергетическая информация .....	13
1.3.7 Прочие исходные данные .....	14
1.3.8 Плановые водохозяйственные и водно-энергетические показатели режимов ГЭС .....	14
2 Процесс планирования водно-энергетических режимов ГЭС .....	15
2.1 Общая процедура планирования водно-энергетических режимов ГЭС ...	16
2.1.1 Долгосрочное планирование .....	16
2.1.2 Среднесрочное планирование .....	16
2.1.3 Краткосрочное планирование .....	16
2.2 Ограничения, учитываемые при планировании водно-энергетических режимов ГЭС .....	17
2.2.1 Долгосрочное планирование .....	17
2.2.2 Среднесрочное планирование .....	18
2.2.3 Краткосрочное планирование .....	19
2.3 Алгоритм расчета водно-энергетических режимов ГЭС .....	22
2.3.1 Алгоритм расчета водно-энергетических режимов ГЭС в долгосрочной перспективе .....	26
2.3.2 Алгоритм расчета водно-энергетических режимов ГЭС в среднесрочной перспективе .....	27
2.3.3 Алгоритм расчета водно-энергетических режимов ГЭС в краткосрочной перспективе .....	28
2.4 Формирование прогноза полезного притока к створу гидроузла .....	30
2.4.1 Формирование прогноза полезного притока в долгосрочной перспективе .....	30
2.4.2 Формирование прогноза полезного притока в среднесрочной перспективе .....	30
2.4.3 Формирование прогноза полезного притока в краткосрочной перспективе .....	33
3 Прогнозирование притока к створу ГЭС .....	34

3.1 Существующие методы прогнозирования притока к створу ГЭС .....	34
3.2 Разработка метода прогнозирования притока к створу ГЭС на примере Саяно-Шушенской ГЭС .....	37
3.2.1 Анализ исходных данных для прогнозирования притока .....	37
3.2.2 Описание методики прогнозирования притока к створу ГЭС с использованием нейросетевых методов обработки информации .....	38
3.2.3 Выбор архитектуры нейронной сети .....	39
3.2.4 Описание программного кода используемого для прогнозирования притока .....	43
3.2.5 Анализ полученных результатов .....	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	49
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	50
ПРИЛОЖЕНИЕ А Полный код программы для прогнозирования притока к створу ГЭС .....	51

## ВВЕДЕНИЕ

Водные ресурсы водохранилищ ГЭС используются непосредственно для самой работы ГЭС, также для водного транспорта, рыбного хозяйства, промышленного и коммунально-бытового водоснабжения, ирригации, срезки максимальных расходов, а также в целях рекреации.

При эксплуатации гидроэлектростанций должно быть обеспечено наиболее полное использование водных ресурсов и установленной мощности гидроагрегатов при оптимальном для энергосистемы участии гидроэлектростанции в покрытии графика нагрузки.

Для электростанций, имеющих водохранилища, регулирующие сток воды, должны быть составлены и утверждены в установленном порядке основные правила использования водных ресурсов водохранилища и правила эксплуатации водохранилища.

Водные ресурсы являются государственной собственностью. Все воды (водные объекты) составляют единый государственный водный фонд, включающий реки, озера, водохранилища, другие поверхностные водоемы и водные источники, а также воды каналов и прудов, подземные воды и ледники, территориальные воды и др. Государственная собственность на воды создает благоприятные условия для осуществления комплексного использования вод с наибольшим экономическим и хозяйственным эффектом, позволяет обеспечивать наилучшие условия труда, быта, отдыха и охраны здоровья людей. Регулирование водных отношений и порядок использования водных объектов определяются водным законодательством.

В соответствии с водным законодательством водные объекты предоставляются в пользование предприятиям, учреждениям и гражданам для удовлетворения их нужд и потребностей. Разграничены общее водопользование, осуществляемое без применения сооружений и технических средств, влияющих на состояние вод, и специальное водопользование, осуществляемое с применением сооружений и устройств (плотин, насосных станций, причалов, запаней, водоспусков, скважин, передвижных насосных установок и т.п.), влияющих на состояние вод, т.е. влекущих изменения гидрологического, химического и биологического режима водных объектов.

Одним из видов специального водопользования является использование водных объектов в энергетических целях. Специальное водопользование осуществляется на основании разрешений, выдаваемых органами по регулированию использования и охране вод.

Таким образом, для правильной работы ГЭС, т.е. наиболее рационального использования водных ресурсов (повышения выработки электроэнергии) и повышения выручки компании от реализации продукции на рынке электроэнергии и мощности, при этом учитывая интересы других водопользователей необходимо планировать водно-энергетический режим работы ГЭС.



## **1 Общие сведения о планировании водно-энергетических режимов ГЭС**

### **1.1 Необходимость планирования водно-энергетических режимов ГЭС**

ГЭС благодаря специфическим свойствам используемых ими природных водных ресурсов и техническим особенностям их технологического оборудования имеют ряд отличительных черт по сравнению с тепловыми и атомными электростанциями; работа гидроэлектростанций в значительной степени зависит от природных условий (водности реки в данный и предшествующие периоды, наличия наносов и льда и т.п.); режим работы гидроэлектростанции связан с режимом водопотребления и водопользования других отраслей народного хозяйства. Водные ресурсы водохранилищ используются для нужд коммунального, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения, орошения, рыбного хозяйства, водного транспорта, гидроэнергетики и рекреации с учетом выполнения экологических требований.

Системы водоснабжения – заинтересованы в поддержании расхода и уровня воды, при котором в нижнем и верхнем бьефе обеспечивается гарантированный объем водозабора.

Сельское хозяйство – заинтересовано в обеспечении необходимых объемов воды забираемой на орошение и обводнение, а также в специальных попусках через гидроузлы в целях сельского хозяйства.

Рыбное хозяйство – заинтересовано в поддержании уровня воды, скорости сработки и наполнения водохранилища, предотвращающих заморы и гибель рыб, обеспечивающих нерест, возможность уйти из отшнуровываемых участков, а также в специальных попусках в нижний бьеф для обеспечения нереста рыбы ниже гидроузла.

Водный транспорт – заинтересован в обеспечении гарантированных глубин, а также специальных попусках, необходимых для функционирования судоходных трасс, подходов к портам, судоверфей и судоходных шлюзов. Для водного транспорта неблагоприятны резкие колебания уровней воды в верхних и нижних бьефах ГЭС, нарушающие устойчивость судовых прорезей и ухудшающие условия зимнего отстоя судов.

ГЭС – заинтересованы в надежности и безопасности гидротехнических сооружений и оборудования, рациональном использовании водных ресурсов (повышении выработки электроэнергии) и повышении выручки компании от реализации продукции на рынке электроэнергии и мощности.

Субъекты рекреации – заинтересованы в относительно стабильном уровне воды в водохранилище и уровне воды в нижнем бьефе.

Системный оператор – заинтересован в соблюдении установленных параметров надежности функционирования Единой энергетической системы России и качества электроэнергии.

В процессе планирования водно-энергетических режимов ГЭС задачами эксплуатирующей организации являются подготовка предложений по водно-энергетическим режимам, организация их согласования с системным оператором и органом, устанавливающим режимы сработки и наполнения водохранилищ, определение наиболее безопасных и эффективных способов реализации указаний и команд уполномоченных органов в рамках, заданных Правилами использования водохранилищ, нормативной и эксплуатационной документацией.

Для уменьшения ущербов от наводнений необходима обязательная предполоводная сработка водохранилищ, обеспечивающая аккумуляцию как можно большего объема воды в водохранилище, тем самым уменьшая максимальный расход воды в нижний бьеф и превышение нормального подпорного уровня (НПУ).

При планировании водно-энергетических режимов ГЭС и каскадов ГЭС необходимо учитывать их специфику и особенности ограничений, накладываемых на режим их функционирования. [1]

Гидроагрегаты ГЭС являются самым маневренным энергетическим оборудованием, обеспечивающим быстрое повышение и сброс электрической нагрузки в соответствии с потребностями энергосистемы. Перечисленные особенности усложняют организацию рационального использования гидроэлектростанций в энергосистемах в первую очередь из-за невозможности однозначного планирования работы гидроэлектростанций и их водохранилищ вследствие изменчивости гидрологического режима водотока.

Следует иметь в виду, что рациональное использование гидроэлектростанций в энергосистемах улучшает режимы работы тепловых и атомных электростанций, выравнивает график их нагрузки, это ведет к снижению удельных расходов топлива на этих электростанциях и общую экономию топлива в энергосистемах. Пользование водными объектами для нужд гидроэнергетики осуществляется с учетом интересов других отраслей народного хозяйства, а также с соблюдением требований комплексного использования водных ресурсов. Комплексное использование водных ресурсов требует согласованных действий всех водопользователей и водопотребителей.

Наиболее эффективны для гидроэлектростанции быстрое заполнение водохранилищ в половодье, поддержание в них максимально высоких уровней в течение весны и лета и сработка в период осенне-зимнего максимума электропотребления; перед половодьем желательна краткосрочная глубокая сработка водохранилищ.

Из вышесказанного следует, что гидрологические прогнозы чрезвычайно важны в осуществлении экономически выгодной, а также безопасной работы ГЭС. В период эксплуатации ГЭС гидрологические прогнозы используются в целях оптимизации режимов регулирования стоков рек, долгосрочного планирования (годовые, сезонные) выработки электрической энергии и принятия мер по пропуску паводков через гидроузлы.

В этом направлении постоянно ведутся разработки, а также совершенствуются уже существующие методы прогнозов объема речного стока. [2]

## **1.2 Основные участники процесса управления водно-энергетическими режимами ГЭС**

Основными участниками процесса управления водно-энергетическими режимами ГЭС являются следующие организации:

- Уполномоченный орган по диспетчерскому управлению единой энергетической системой – специализированная организация, осуществляющая единоличное управление технологическими режимами работы объектов электроэнергетики и уполномоченная на выдачу оперативных диспетчерских команд и распоряжений, обязательных для всех субъектов оперативно-диспетчерского управления, субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии с управляемой нагрузкой;

- Уполномоченный орган по установлению режимов сработки и наполнения водохранилищ – устанавливает режимы пропуска половодий и паводков, специальных попусков, наполнения и сработки водохранилищ. Орган, устанавливающий режимы сработки и наполнения водохранилищ, обеспечивает удовлетворение требований различных групп водопользователей;

- Эксплуатирующая организация – осуществляет долгосрочное, среднесрочное и краткосрочное планирование водно-энергетических режимов ГЭС и каскадов ГЭС. В эксплуатирующей организации должна быть выделена функция сводного планирования водно-энергетических режимов каскадов ГЭС.

## **1.3 Необходимые исходные данные для планирования водно-энергетических режимов ГЭС**

Для планирования водно-энергетических режимов ГЭС должны быть получены и использованы необходимые исходные данные:

- гидрологическая информация;
- морфометрическая информация;
- метеорологическая информация;
- информация о пропускной способности водосбросных сооружений гидроузла водохранилища;

- водохозяйственная информация;
- водно-энергетическая информация;
- утвержденные правила использования водохранилищ (каскада водохранилищ);

- перечень источников, использованных для формирования системы технологических и режимных ограничений. Для технологических ограничений должны быть указаны даты проведения испытаний или внесения изменений в проектную документацию;

- ограничения или требования к водно-энергетическому режиму со стороны энергосистемы и водохозяйственного комплекса;
- ограничения по требованиям безопасности эксплуатации гидротехнических сооружений на среднеинтервальные и/или максимальные и минимальные значения: уровня верхнего бьефа или скорости его изменения.

### **1.3.1 Гидрологическая информация**

Гидрологическая информация включает в себя следующие данные:

- приток к створу гидроузла;
- данные о наблюдаемом притоке к створу гидроузла;
- цикл регулирования речного стока водохранилищем.

### **1.3.2 Морфометрическая информация**

Морфометрическая информация включает в себя следующие данные:

- зависимость статических площадей зеркала в зависимости от уровня воды в рассматриваемом водохранилище  $F = f(z)$ ;
- зависимость статического объема водохранилища от уровня воды в рассматриваемом водохранилище  $V = f(z)$ ;
- поперечный профиль русла и поймы по характерным створам в пределах каждого водохранилища и кривая связи расхода и уровня воды  $Q = f(z)$ ;
- продольный профиль участков реки, где располагается водохранилище, гидроузел и зона нижнего бьефа, где вероятно заметное влияние режимов работы гидроузла на водный режим;
- параметры модели неустановившегося движения воды в нижнем бьефе или в контролируемом створе (при наличии);
- кривая связи расхода и уровня воды в определенных створах в нижнем бьефе гидроузла;
- кривая модулей пропускной способности участков водохранилища в зависимости от средних уровней воды на расчетном участке;
- зависимость динамических объемов по участкам рассматриваемого водохранилища, представляющая собой зависимость объема воды на расчетном участке водохранилища от среднего расхода воды по нему и уровней воды во входном и выходном створах участка.

### **1.3.3 Метеорологическая информация**

Метеорологическая информация включает в себя следующие данные:

- об осадках на поверхность водохранилища;
- об испарении с поверхности водохранилища;
- о ветровых явлениях в зоне водохранилища;
- о температуре воды в верхнем и нижнем бьефах водохранилища;

- о ледовых явлениях в верхнем и нижнем бьефах гидроузла;
- о запасе воды в снеговом покрове водосбросного бассейна.

### **1.3.4 Информация о пропускной способности водосбросных сооружений гидроузла**

Информация о пропускной способности водосбросных сооружений гидроузла включает в себя следующие данные:

- количество и тип водопропускных сооружений гидроузла(-ов);
- количество водопропускных отверстий на каждом водопропускном сооружении и их характеристики;
- зависимости расхода воды через каждое водопропускное сооружение или отверстие (при частичном и полном открытии затворов) от уровня воды в верхнем бьефе гидроузла или от напора на гребне водослива;
- рекомендуемые, допустимые и запрещенные схемы маневрирования затворами водопропускных сооружений.

### **1.3.5 Водохозяйственная информация**

Водохозяйственная информация включает в себя следующие данные:

- проектные характеристики безвозвратного водопотребления выше створа гидроузла;
- характеристики фактического водопотребления и водоотведения;
- допустимый диапазон и динамика колебаний расхода и уровня воды выше и ниже створа гидроузла;
- характеристики неэнергетических затрат и потерь расхода на шлюзование и др.;
- данные о заявках на водные ресурсы всех основных водопользователей и приоритетности их учета в правилах использования водохранилищ;
- экологические и санитарные требования к расходу и уровню воды в нижнем и верхнем бьефах гидроузла водохранилища.

### **1.3.6 Водно-энергетическая информация**

Водно-энергетическая информация включает в себя следующие данные:

- эксплуатационные характеристики гидроагрегатов (зависимость мощности от напора и КПД);
- характеристики потерь напора (суммарные, на сороудерживающих решетках, в напорных водоводах и др.);
- данные о фактическом режиме ГЭС за расчетный интервал времени, полученные на основе отчетных данных за сутки, месяц, квартал, год;
- типовые графики суточной и недельной мощности ГЭС;
- ограничения на выдачу мощности в электрические сети;
- ограничения по безопасным режимам работы оборудования;

- данные о располагаемой мощности, на планируемый период исходя из сроков плановых ремонтов основного оборудования ГЭС и сетевого оборудования, влияющих на водно-энергетический режим ГЭС.

### **1.3.7 Прочие исходные данные**

А также, для наиболее точного планирования водно-энергетического режима должны быть учтены следующие исходные данные:

- потери расхода воды на льдообразование, фильтрацию (характеристика сооружений/водохранилища);
- правила использования водохранилища;
- прогноз притока на месяц и/или квартал, предоставленный специализированными организациями;
- прогноз цены электроэнергии и мощности по расчетным интервалам задачи планирования;
- ограничения по скорости сработки-наполнения водохранилища.

### **1.3.8 Плановые водохозяйственные и водно-энергетические показатели режимов ГЭС**

При планировании водно-энергетических режимов ГЭС должны быть определены следующие плановые водохозяйственные и водно-энергетические показатели:

- мощность ГЭС;
- выработка электроэнергии ГЭС;
- уровень верхнего бьефа;
- уровень нижнего бьефа;
- расход воды в нижний бьеф (расход воды на шлюзование, расход воды на фильтрацию через тело плотины, расход воды через сооружения ГЭС, расход через гидроагрегаты и водосбросные сооружения).

Приведенный перечень информации является максимальным. Расчеты могут быть произведены при отсутствии некоторой информации. [1]

## 2 Процесс планирования водно-энергетических режимов ГЭС

При планировании водно-энергетических режимов ГЭС необходимо учитывать их специфику и особенности ограничений, накладываемых на режим их функционирования. Специфика планирования водно-энергетических режимов ГЭС обуславливается следующими параметрами:

- указаниями уполномоченных органов;
- климатическими характеристиками района бассейна водосбора водохранилища и нижнего бьефа;
- геологическими и морфометрическими особенностями зоны водохранилища, створа гидроузла и нижнего бьефа;
- безопасностью гидротехнических сооружений;
- структурой генерирующих мощностей энергосистемы и характером режима электропотребления;
- видом регулирования стока водохранилищами;
- требованиями к водному режиму со стороны водопользователей.

Существует три горизонта планирования водно-энергетических режимов ГЭС: долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный.

В рамках долгосрочного планирования осуществляются сценарные расчеты водно-энергетических режимов ГЭС на период от одного года и более на основе статистических данных в условиях отсутствия прогноза притока, с учетом характеристик ГТС и правил использования водохранилищ.

В рамках среднесрочного планирования осуществляются сценарные расчеты водно-энергетических режимов ГЭС на период планирования от одного квартала до декады, учитывающие характеристики сооружений и правила их работы, а также правила использования водохранилищ и водохозяйственных систем, при необходимости осуществляется моделирование движения водных масс в водохранилищах на участках рек или каналов (русловые участки).

В рамках краткосрочного планирования осуществляется расчет водно-энергетических режимов ГЭС на период от одних суток до одной недели с расчетным интервалом времени в 1 час (при необходимости в 30 мин), учитывающий текущее состояние оборудования и сооружений ГЭС, неустановившееся движение воды в нижнем бьефе и базирующийся на показателях среднесрочного планирования. При расчете водно-энергетического режима низконапорных и средненапорных ГЭС должно учитываться неустановившееся движение воды в нижнем бьефе и сгонно-нагонные явления в верхнем бьефе.

## **2.1 Общая процедура планирования водно-энергетических режимов ГЭС**

### **2.1.1 Долгосрочное планирование**

Основной целью долгосрочного планирования водно-энергетических режимов ГЭС является - формирование предложений по оптимальным срокам вывода оборудования в ремонт, режимов сработки и наполнения и формирование плана выработки электроэнергии и балансов электроэнергии и мощности на долгосрочный период.

Основными этапами долгосрочного планирования водно-энергетических режимов ГЭС являются:

- формирование оценки полезного притока к створу гидроузла;
- расчет водно-энергетического режима ГЭС на долгосрочный период;

### **2.1.2 Среднесрочное планирование**

Целями среднесрочного планирования водно-энергетических режимов ГЭС являются:

- расчет допустимых водно-энергетических режимов ГЭС;
- обеспечение максимальной выработки электроэнергии и мощности и, при необходимости, выручки от ее продажи;

Основными этапами среднесрочного планирования водно-энергетических режимов ГЭС являются:

- формирование прогноза полезного притока к створу гидроузла;
- определение совместимости ограничений на водно-энергетические режимы ГЭС и формирование среднесрочных планов;
- оптимизация водно-энергетических режимов ГЭС по критериям максимума выработки электроэнергии или максимизации выручки.

Для формирования среднесрочных планов возможно привлечение специализированных организаций по предоставлению прогноза притока или оценки полезного притока к створу гидроузла.

### **2.1.3 Краткосрочное планирование**

Целями краткосрочного планирования водно-энергетических режимов ГЭС являются:

- обеспечение выполнения требований (ограничений) участников водохозяйственной и энергетической систем к режиму ГЭС;
- обеспечение выполнения требований к водно-энергетическим режимам ГЭС;



- определение оптимального водно-энергетического режима ГЭС по критерию максимума выработки электроэнергии или максимума выручки от продажи электроэнергии.

Основными этапами краткосрочного планирования водно-энергетических режимов ГЭС являются:

- формирование прогноза полезного притока воды к створу ГЭС;
- определение совместимости ограничений на водно-энергетические режимы ГЭС и формирование краткосрочных планов;
- оптимизация водно-энергетических режимов ГЭС и выбор состава генерирующего оборудования.

При проведении расчетов должны учитываться результаты решения задачи среднесрочного планирования водно-энергетических режимов ГЭС в части формирования среднесуточного прогноза полезного притока воды к створу ГЭС. При необходимости уточнения прогноза полезного притока воды к створу ГЭС должны быть проведены повторные расчеты на горизонте среднесрочного планирования. При проведении расчетов должны использоваться актуализированные эксплуатационные характеристики гидроагрегатов. В случае их отсутствия используются данные последних натуральных испытаний или характеристики завода-изготовителя. При проведении расчетов должны использоваться данные о фактическом водно-энергетическом режиме ГЭС за прошедшие сутки. При расчете водно-энергетического режима низконапорных и средненапорных ГЭС должно учитываться неустановившееся движение воды в нижнем бьефе и стонно-нагонные явления в верхнем бьефе.

## **2.2 Ограничения, учитываемые при планировании водно-энергетических режимов ГЭС**

### **2.2.1 Долгосрочное планирование**

При долгосрочном планировании водно-энергетических режимов ГЭС необходимо учитывать ограничения, накладываемые различными участниками водохозяйственного комплекса, энергосистемы и требованиями безопасности эксплуатации ГЭС на следующие параметры:

- ограничения по величине объема глубины сработки водохранилища за планируемый период;
- ограничения по максимальным и минимальным значениям:
  - уровня воды в верхнем бьефе в характерные периоды года;
  - скорости сработки и наполнения водохранилища в каждом расчетном интервале;
  - уровня воды в нижнем бьефе по расчетным интервалам на весь период планирования;
  - среднеинтервальной мощности ГЭС за весь период планирования;

- расхода воды через турбины ГЭС.
- отсутствие детерминированного прогноза объема притока воды в водохранилище на планируемый период;
- отсутствие информации о фактических запасах воды в водохранилищах на начало планируемого периода;
- ограничения на рабочую мощность, связанные с вводом или выводом оборудования;
- ограничения по выдаче мощности ГЭС в электрическую сеть.

## 2.2.2 Среднесрочное планирование

При среднесрочном планировании водно-энергетических режимов ГЭС необходимо учитывать требования, накладываемые различными участниками водохозяйственного комплекса, энергосистемы и требования безопасности эксплуатации гидротехнических сооружений на следующие параметры:

- расход воды в нижнем бьефе;
- скорость сработки и наполнения водохранилища;
- уровень нижнего бьефа;
- уровень верхнего бьефа;
- уровень воды в контролируемых створах;
- колебание уровня нижнего бьефа;
- мощность ГЭС.

При среднесрочном планировании водно-энергетических режимов ГЭС производится поиск области допустимых значений для каждого из режимных параметров (проверка совместимости) при выполнении заданной системы ограничений и определение планового водно-энергетического режима ГЭС.

Система ограничений на водно-энергетические режимы ГЭС определяется на основании следующих групп критериев:

- управления водохозяйственной и энергетической системами;
- безопасности и надежности эксплуатации гидротехнических сооружений и гидроэнергетического оборудования;
- требования по уровням и расходам воды (согласно экологическим условиям).

Определение совместимости системы ограничений, задаваемой критериями управления водохозяйственной и энергетической системами, безопасности и надежности эксплуатации гидротехнических сооружений и гидроэнергетического оборудования, условиями экологии, производится на основании следующих входных данных:

- эксплуатационные характеристики гидроагрегатов ГЭС с актуализированными зонами нежелательной и недопустимой работы;
- гидрологические и морфометрические характеристики водохранилища (по данным последних натуральных испытаний или по проектным данным);

- мощность и состав гидроагрегатов, выведенных в ремонт (время начала и окончания, состав гидроагрегатов);
- мощность и номера гидроагрегатов (если заданы), включенных в резерв (оперативный, аварийный);
- требования по расходу отбора и возврата воды водопотребителями, имеющими водозаборы и водосбросы в водохранилище и нижнем бьефе ГЭС;
- требования по максимальному и минимальному уровню воды в водохранилище и нижнем бьефе ГЭС, а также в заданных контролируемых створах, определяемых расположением водозаборов водопотребителей, условиями обеспечения судоходства и условиями безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений для каждого расчетного интервала времени;
- требования по значениям максимальной и минимальной рабочей мощности по группам оборудования.

Алгоритм поиска области допустимых значений для каждого из режимных параметров (проверка совместимости) при выполнении заданной системы ограничений и определения планового водно-энергетического режима ГЭС состоит из следующих шагов:

- проведение серии водно-энергетических расчетов для определения системы ограничений на основании групп критериев, описанных ранее;
- определение зоны допустимых водно-энергетических режимов ГЭС при выполнении заданной системы ограничений производится путём определения области допустимых значений режимных параметров, удовлетворяющей всем ограничениям одновременно. В случае отсутствия области допустимого водно-энергетического режима ГЭС осуществляют корректировку системы ограничений.

Результатами поиска области допустимых значений для каждого из режимных параметров (проверка совместимости) при выполнении заданной системы ограничений и определения планового водно-энергетического режима ГЭС является уведомительная информация о наличии или отсутствии допустимых водно-энергетических режимов ГЭС для дальнейшей оптимизации по заданному критерию.

### **2.2.3 Краткосрочное планирование**

Цель проверки совместимости ограничений заключается в подтверждении факта существования и оценки зоны допустимых значений параметров водно-энергетического режима ГЭС. При обнаружении несовместимых ограничений, заданных двумя или более участниками энерговодохозяйственного комплекса, устанавливается, какие участники задали несовместные ограничения для проверки ошибочности задания или выявления противоречивых требований, требующих согласования.

При краткосрочном планировании водно-энергетических режимов ГЭС ограничения могут накладываться на следующие режимные параметры:

- расход воды в нижний бьеф;
- скорость сработки и наполнения водохранилища;
- уровень нижнего бьефа;
- уровень верхнего бьефа;
- уровень воды в контролируемых створах;
- колебание уровня воды в нижнем бьефе и контролируемых створах;
- активная мощность ГЭС.

При краткосрочном планировании водно-энергетических режимов ГЭС производится поиск области допустимых значений для каждого из режимных параметров (проверка совместимости) при выполнении заданной системы ограничений и определение планового водно-энергетического режима ГЭС.

Система ограничений на водно-энергетические режимы ГЭС определяется на основании результатов среднесрочного планирования и следующих групп критериев:

- управления водохозяйственной и энергетической системами;
- безопасности и надежности эксплуатации ГЭС и гидроэнергетического оборудования;
- охраны природы в зоне водохранилища и нижнего бьефа ГЭС.

Входные данные для определения совместимости ограничений:

- эксплуатационные характеристики гидроагрегатов ГЭС с актуализированными зонами нежелательной и недопустимой работы;
- гидрологические и морфометрические характеристики водохранилища (по данным последних натуральных исследований или по проектным данным);
- значения максимальной и минимальной допустимой скорости набора и сброса нагрузки гидроагрегата в нормальном режиме;
- мощность и номера гидроагрегатов, выведенных в ремонт;
- мощность и номера гидроагрегатов (если заданы), включенных в резерв (оперативный, аварийный);
- среднесуточный расход притока воды в водохранилище ГЭС с учетом отбора и возврата воды в водохранилище ГЭС;
- требования по максимальному и минимальному среднесуточному объему отбора и возврата воды водопотребителями, имеющими водозаборы и водосбросы в водохранилище и нижнем бьефе ГЭС;
- требования по максимальному и минимальному уровню воды в водохранилище и нижнем бьефе ГЭС, а также в заданных контролируемых створах, определяемых расположением водозаборов потребителей, условиями обеспечения судоходства и рыбного хозяйства для каждого расчетного интервала времени;

- требования по значениям максимальной и минимальной рабочей мощности по группам оборудования (работающего на разные группы точек поставки) для расчетных интервалов времени;
- разрешенные заявки на вывод оборудования в ремонт (время начала и окончания, номер гидроагрегата);
- ограничения по среднесуточному (мгновенному) расходу воды на холостой сброс по эксплуатационному состоянию водосбросных сооружений, русла реки или иным эксплуатационным условиям;
- ограничения по скорости набора и сброса нагрузки гидроагрегата ГЭС (по активной мощности);
- требования по максимальной скорости сработки-наполнения водохранилища для снижения риска переработки берегов;
- требования к колебаниям уровня воды в нижнем бьефе ГЭС для снижения риска переформирования берегов.

Алгоритм поиска области допустимых значений для каждого из режимных параметров (проверка совместимости) при выполнении заданной системы ограничений и определении планового водно-энергетического режима ГЭС состоит из следующих шагов:

а) проведение серии водно-энергетических расчетов с использованием ограничений, наложенных различными участниками энергосистемы в соответствии с критериями, сформулированными ранее;

б) определение зоны допустимых водно-энергетических режимов ГЭС при выполнении заданной системы ограничений и формирование краткосрочных планов производится путём определения области допустимых значений режимных параметров, удовлетворяющих всем ограничениям одновременно. В случае отсутствия области допустимого водно-энергетического режима ГЭС, производится корректировка системы ограничений;

в) проверка соответствия краткосрочных планов результатам среднесрочного планирования. В случае выявления несоответствия, производится корректировка среднесрочных планов;

г) прогноз динамики изменения уровня нижнего бьефа. Прогноз производится методами построения статистических зависимостей с самообучением, например:

- методами регрессионного анализа и самоорганизации;
- методами нейронных сетей.

Результатами поиска области допустимых значений для каждого из режимных параметров (проверка совместимости) при выполнении заданной системы ограничений и определения планового водно-энергетического режима ГЭС являются:

- режим ГЭС по мощности, уровню верхнего бьефа, уровню нижнего бьефа, расходу воды в нижний бьеф, расходу притока к створу ГЭС, расходу

воды из водохранилища, распределению рабочей и резервной мощности между гидроагрегатами (включая гидроагрегаты, выведенные в ремонт), значение нарушения ограничений по расходу или уровню воды;

- уведомительная информация о наличии или отсутствии допустимых водно-энергетических режимов ГЭС для дальнейшей оптимизации по заданному критерию.

### **2.3 Алгоритм расчета водно-энергетических режимов ГЭС**

В общем виде алгоритм нахождения оптимального результата водно-энергетического расчета, а также блок-схема данного алгоритма, представленная на рисунке 1, приведены ниже.

Расчет хода уровня воды водохранилища ГЭС ведется на заданный режим среднемесячных мощностей гидроэлектростанций при известной приточности расчетного года. Расчет начинается с момента времени, для которого известен уровень воды в водохранилище, а именно:

- перед началом весеннего половодья, когда водохранилище бывает, сработано до мертвого объема и, следовательно, уровень его может быть задан;

- после окончания весеннего половодья, когда водохранилище заполнено и, следовательно, уровень воды в нем равен отметке НПУ.

Для водно-энергетических расчетов, результат которых является наиболее оптимальным, обязательным условием является равенство уровней воды в водохранилище в начале и в конце расчетного периода регулирования. Это условие обусловлено необходимостью использования всей полезной емкости водохранилища. Расчет регулирования стока при заданных условиях проводится методом последовательного приближения, исходя из требования использования всего полезного объема водохранилища в расчетном году. Так как потери определяются по среднему уровню воды за расчетный интервал времени (испарение), или по напору (потери на фильтрацию), или по падению уровня за расчетный интервал (потери на оседание льда на бортах водохранилища) более подробный расчет потерь описан в [4], расчет по каждому интервалу времени также проводится методом последовательного приближения.

После окончания расчета режима работы ГЭС в данном интервале времени и определения гарантированной мощности последняя сравнивается со значением мощности, полученным в результате покрытия графика нагрузки. Если с принятой точностью они совпадают, проверяется правильность оценки потерь, и при необходимости уточнения потерь, расчет данного интервала повторяется. Если же разница между расчетной и заданной гарантированной мощностью превышает принятую допустимую погрешность, режим работы ГЭС уточняется путем изменения расхода ГЭС в ту или иную сторону. [4]

Расчет режима работы ГЭС для заданной гарантированной мощности считается законченным и оптимальным, если установлено, что полезный объем

водохранилища полностью использован, т. е. в период опорожнения достигнута отметка УМО, и водохранилище заполнено после прохождения половодья до отметки НПУ. Если уровень воды в водохранилище к концу расчетного периода ниже, чем в начале, то гарантированная мощность ГЭС должна быть уменьшена, так как используемый на ГЭС объем стока в этом случае больше, чем он может быть в расчетном году. Если же в условиях расчетного года (при годовом цикле регулирования стока) уровень воды в конце цикла превышает начальный, то гарантированная мощность должна быть увеличена. [10]

Описание элементов блок-схемы:

1) Блок ввода исходных данных. На данном этапе вводятся основные исходные данные для расчета, такие как: бытовой расход реки (берется из гидрологических данных); потери расхода на испарение, потери на фильтрацию, потери на оседание льда на бортах водохранилища, а также потери на шлюзование; полезный объем водохранилища, гарантированная мощность ГЭС (снимается с баланса энергии).

2) Расчет полезного бытового притока. Расчет данного параметра ведется по следующей формуле:

$$Q_{\text{пол.быт.}i} = Q_{\text{би}} - (Q_{\text{ил}i} + Q_{\text{фи}} + Q_{\text{осн}i} + Q_{\text{л}i}) \quad (2.1)$$

3) Блок ввода  $Q_{\text{вдхр}}$ . Это тот расход с которым будет осуществлена сработка или наполнение водохранилища ГЭС. Данный расход подбирается таким образом, чтобы обеспечить гарантированную мощность ГЭС в месяцы регулирования.

4) Расчет приращения объема водохранилища ведется по следующей формуле:

$$\pm \Delta V_{\text{ei}} = \pm Q_{\text{вдхр.}i} \Delta t_i \quad (2.2)$$

где  $\Delta t_i$  - число секунд в месяце.

5) Расчет конечного объема водохранилища. Это полезный объем воды в водохранилище на конец расчетного интервала:

$$V_{\text{в.к}i} = V_{\text{в.}(i-1)} \pm \Delta V_{\text{ei}} \quad (2.3)$$

Пункты 6, 11, 15 являются проверкой выполнения условия  $V_{\text{к}} = V_{\text{нач}}$ .

7) Проверка выполнения условия  $V_{\text{к}} < V_{\text{нач}}$ .

8) Увеличение значения  $Q_{\text{вдхр}}$ .

Пункты 9, 10, 13, 14 рассчитываются аналогично пунктам 4 и 5, но при новых значениях  $Q_{\text{вдхр}}$ .

12) Уменьшение значения  $Q_{\text{вдхр}}$ .

16) Блок вывода полученных значений  $Q_{\text{вдхр}}$  и  $V_{\text{к}}$ .

17) Блок ввода исходных данных. На данном этапе вводятся дополнительные исходные данные для проведения дальнейшего расчета, такие как: отметки НПУ и УМО, кривая зависимости объема водохранилища от уровня верхнего бьефа, кривая зависимости расхода от уровня нижнего бьефа.

18) Уровень воды в водохранилище, соответствующий объему верхнего бьефа, определяется по кривой зависимости  $Z_{вб.к.} = Z_{вб.}(V_k)$  из полинома 6 степени.

19) Средний уровень верхнего бьефа, определяется как:

$$\bar{z}_{вбi} = (z_{вбi}^к - z_{вбi}^н) / 2 \quad (2.4)$$

20) Данный параметр определяется как:

$$Q_{ГЭСi} = Q_{пол.быт.i} + Q_{водхр.i} \quad (2.5)$$

21) Расход в нижнем бьефе рассчитывается следующим образом:

$$Q_{НБi} = Q_{ГЭСi} + Q_{ф.i} + Q_{шл.i} \quad (2.6)$$

22) Уровень нижнего бьефа, соответствующий расходу в нижний бьеф гидроузла, определяется по кривой зависимости  $Z_{нб.} = Z_{нб.}(Q_{нб.})$  из полинома 6 степени.

23) Напор нетто рассчитывается как:

$$\bar{H}_i = \bar{z}_{вбi} - z_{нбi} - \Delta H_i \quad (2.7)$$

где  $\Delta H_i$  - суммарные потери напора на решетках и в водоподводящих сооружениях.

24) Далее рассчитывается среднеинтервальная мощность ГЭС:

$$\bar{N}_{ГЭСi} = k_N \cdot Q_{ГЭСi} \cdot \bar{H}_i \quad (2.8)$$

где  $k_N$  - коэффициент мощности с учетом средневзвешенного КПД гидроагрегата.

25) Расчет выработки ГЭС:

$$\mathcal{E}_{ГЭСi} = \bar{N}_{ГЭСi} \cdot 24 \cdot 31 \quad (2.9)$$

где 24 и 31 – это число часов в сутках и число дней в месяце соответственно.



## 26) Блок вывода полученных значений $\mathcal{E}_{ГЭС}$ .

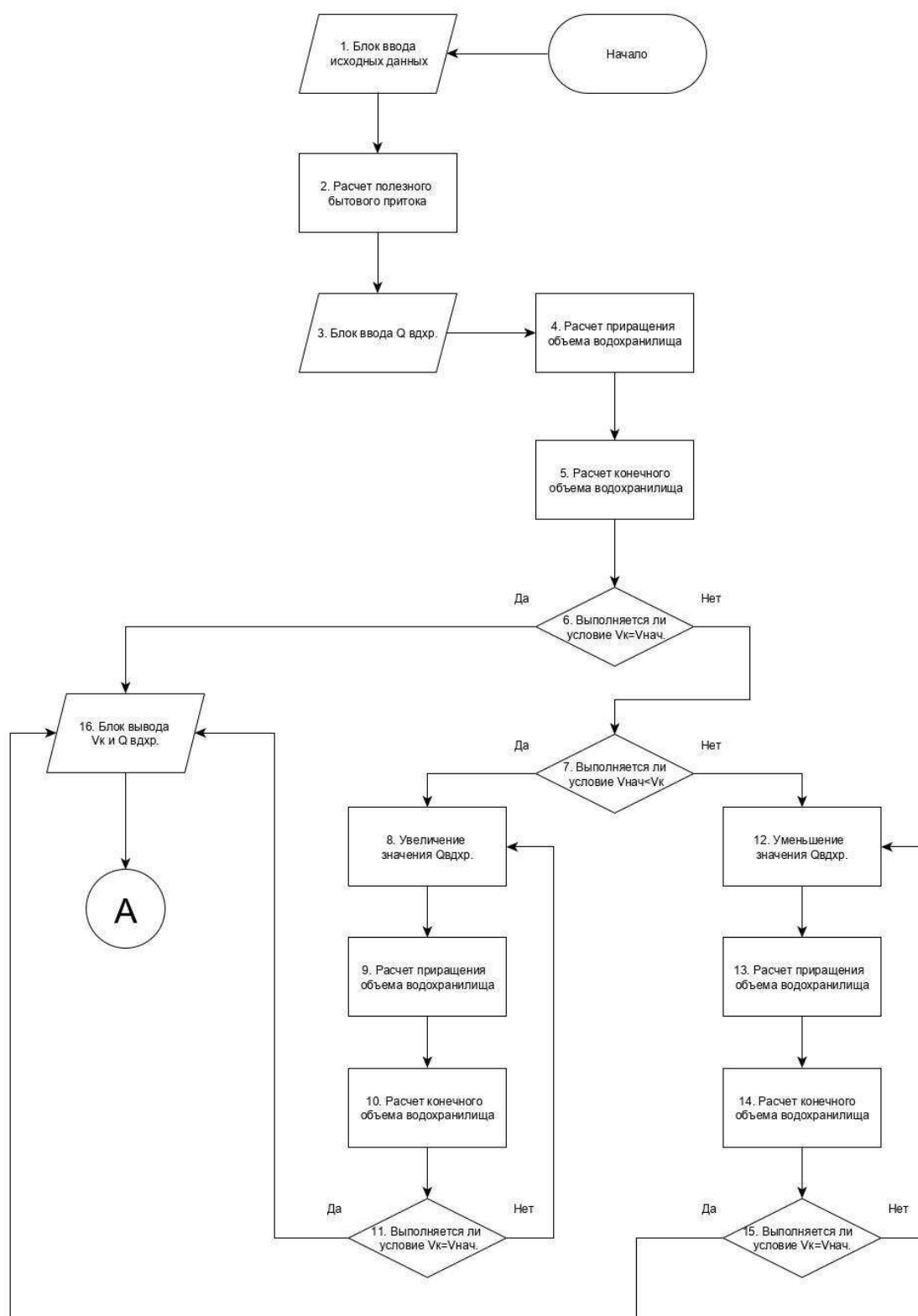


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма нахождения оптимального результата водно-энергетического расчета, лист 1

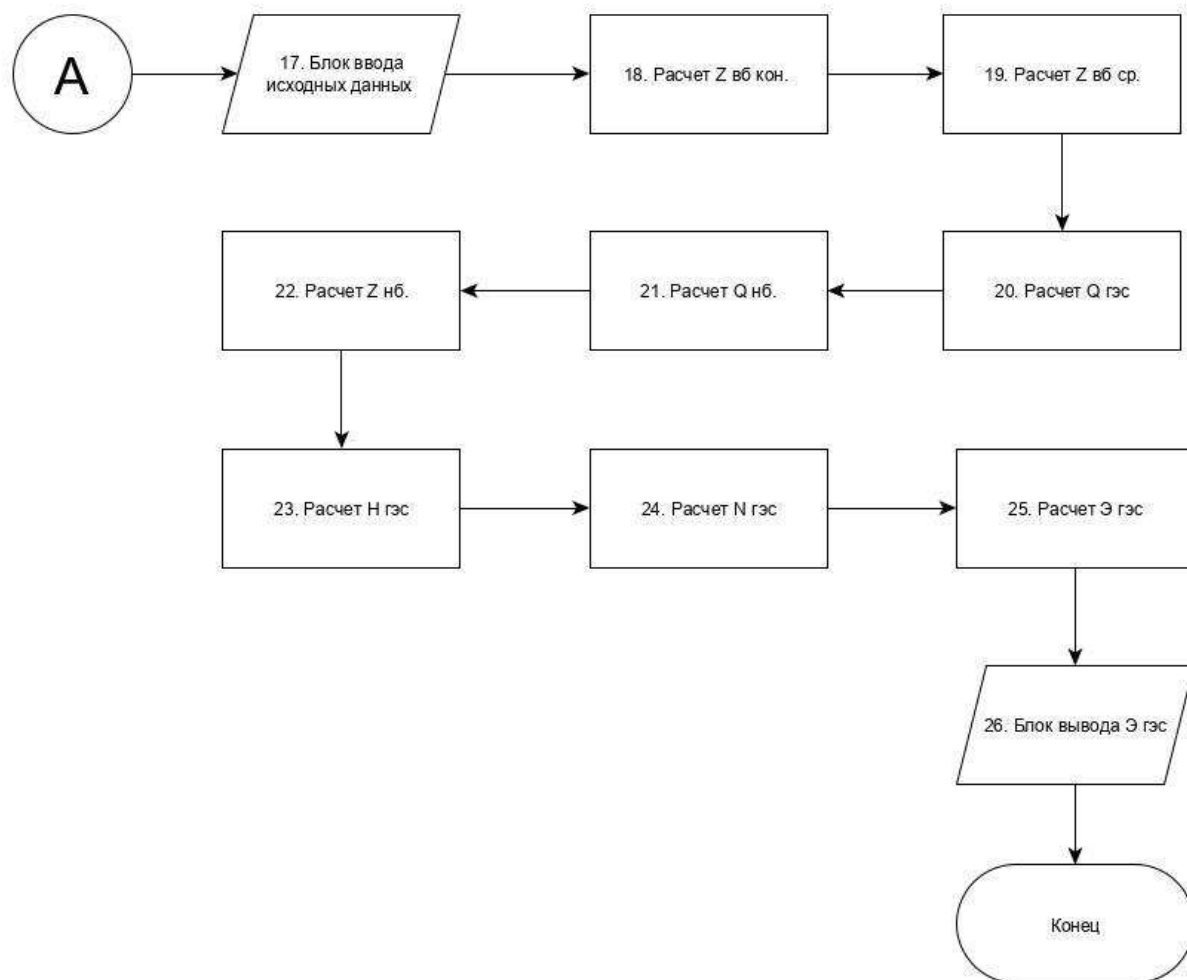


Рисунок 1, лист 2

### 2.3.1 Алгоритм расчета водно-энергетических режимов ГЭС в долгосрочной перспективе

Долгосрочное планирование предполагает проведение водно-энергетических расчетов режимов ГЭС с использованием правил использования водохранилищ, наблюдаемых гидрологических рядов притока и/или данных технического проекта гидроузла. При долгосрочном планировании выработки ГЭС с периодом более одного года используются проектные показатели выработки электроэнергии, подсчитанные с использованием всего наблюдаемого гидрологического ряда притока и исходной информации, приведенной в п.1.3.8. Расчет выполняется по уравнению водного баланса, формула 2.1, и принятого диспетчерского графика работы водохранилища.

Расчетный интервал времени определяется в зависимости от следующих параметров:

- степень неравномерности притока в водохранилище;
- глубина регулирования стока водохранилищем;
- требования водопользователей к водному режиму речного стока или водному режиму изъятия воды из водохранилища (забор воды на орошение,

рыбохозяйственные, санитарные и судоходные попуски в нижние бьефы нижних ступеней каскадов ГЭС);

- энергетический режим ГЭС, требования к выработке электроэнергии за расчетный интервал времени (среднеинтервальная мощность).

Ввиду неопределенности гидрологической информации на прогнозный период, плановая выработка электроэнергии определяется с заданной величиной вероятности. Формирование долгосрочных планов водно-энергетических режимов ГЭС осуществляется на основе входных данных, приведенных в 1.3. Общий подход к формированию долгосрочных планов состоит из следующих шагов:

- задается уровень верхнего бьефа на начало расчета;
- производится водно-энергетический расчет по алгоритму описанному ранее п.2.3;
- по результатам расчета строятся эмпирические кривые обеспеченности плановых показателей водно-энергетического режима ГЭС, в соответствии с п.1.3.8.

Результатами расчета долгосрочного планирования водно-энергетических режимов ГЭС являются плановые показатели водно-энергетического режима ГЭС на долгосрочный период планирования, в соответствии с 1.3.8.

### **2.3.2 Алгоритм расчета водно-энергетических режимов ГЭС в среднесрочной перспективе**

В основе расчета лежит решение уравнения водного баланса в каждый расчетный интервал времени, продолжительность которого определяется требуемой точностью расчетов, интенсивностью изменения притока воды и водопотребления, располагаемой гидрологической и водохозяйственной информацией, характером решаемой задачи и др. Формирование среднесрочных планов водно-энергетических режимов ГЭС осуществляется на основании входных данных, приведенных в 1.3. При выполнении вычислений по расчетным интервалам времени принимается, что приток и расход воды из водохранилища в течение каждого расчетного интервала времени постоянны и соответствуют некоторому среднему по времени за этот интервал уровню воды в водохранилище. Поскольку значение среднего уровня воды в водохранилище зависит от его конечного (за интервал) наполнения, расчеты режимов водохранилища проводят методом последовательного приближения:

- задают предполагаемое конечное наполнение водохранилища, характеризующееся уровнем верхнего бьефа на конец расчетного интервала регулирования;
- определяют средний за расчетный интервал уровень воды в нем и зависящие от него расходные статьи водного баланса;
- производят водно-энергетический расчет;

- проверяют соотношение между рассчитанным и принятым в соответствии с заданным диспетчерским графиком работы водохранилища на конец расчетного интервала уровнем наполнения водохранилища.

В случае несоответствия друг другу, вносят необходимые коррективы и расчет выполняют заново. Объем производства электрической энергии на вновь вводимых ГЭС определяют с учетом сроков ввода в действие гидроагрегатов, а также графиков начального наполнения водохранилищ. Результатами среднесрочного планирования водно-энергетических режимов ГЭС являются плановые показатели водно-энергетического режима ГЭС на среднесрочный период планирования.

### **2.3.3 Алгоритм расчета водно-энергетических режимов ГЭС в краткосрочной перспективе**

Расчет краткосрочного режима ГЭС проводится на основе часовых (при необходимости – 30 минутных) значений параметров режима и основывается на прогнозных значениях притока воды и граничных условиях сработки или наполнения водохранилища в суточном (недельном) интервале, получаемых в результате среднесрочного планирования режима. Незначительное изменение притока воды в течение суток для рек со снеговым питанием позволяет считать приток воды в течение суток постоянным, что снижает неопределенность этого параметра. В то же время в течение суток наблюдаются значительные колебания уровня воды в бьефах, особенно в нижнем (для ГЭС с водохранилищами сезонного и более регулирования стока рек). Для определения параметров неустановившегося движения воды в бьефах могут использоваться аналитические методы, такие как расчет движения воды на основе решения уравнения Сен-Венана, приближенные методы расчета, такие как метод экспоненты со скачком, а также методы статистического прогнозирования. При отсутствии возможности использования моделей неустановившегося движения (отсутствие статистических данных нужной длины выборки, отсутствие достоверных параметров живого сечения потока воды в створе гидроузла, отсутствие актуальных зависимостей расхода и уровня воды в створе, полученных на основе измерений) в расчетах используются статические характеристики верхнего и нижнего бьефа, причем в виде, приведенном в проектной документации ГЭС. Уточнение этих характеристик возможно при проведении регулярных натурных измерений расхода и уровня воды в заданном створе, а также при получении реальных параметров живого сечения в контролируемом створе. Расчет параметров режима ГЭС при краткосрочном планировании опирается на уравнения водно-энергетического баланса (баланса расхода и напора в створе).

Рассмотрим два подхода к проведению водно-энергетического расчета:

- расчет по заданным значениям уровня верхнего бьефа;

- расчет по заданным значениям расхода воды в нижний бьеф или мощности.

Алгоритм проведения водно-энергетического расчета по заданным значениям уровня верхнего бьефа, состоит из следующих шагов:

- по заданным значениям уровня верхнего бьефа с использованием кривой объема водохранилища и зависимости между объёмом и расходом воды из водохранилища определяют значения расхода воды из водохранилища для каждого расчетного интервала времени;

- с использованием уравнения водного баланса определяют значения расхода воды в нижний бьеф для каждого расчетного интервала времени и проверяют принадлежность найденных значений области допустимых значений расхода воды;

- с использованием зависимостей уровней воды в нижнем бьефе и контролируемых створах от расхода воды в нижний бьеф определяют значения уровней воды в нижнем бьефе и контролируемых створах для каждого расчетного интервала времени и проверяют принадлежность найденных значений к области допустимых значений уровня нижнего бьефа;

- с использованием зависимостей от уровней верхнего и нижнего бьефов определяются значения напора ГЭС для каждого расчетного интервала времени;

- в зависимости от расхода воды и напора определяют значения мощности и выработки ГЭС для каждого расчетного интервала времени и проверяют принадлежность найденных значений к области допустимых значений мощности ГЭС;

- в случае отсутствия решения, удовлетворяющего заданным ограничениям, необходимо произвести коррекцию системы ограничений.

В случае проведения водно-энергетического расчета по заданным значениям расхода воды в нижний бьеф или мощности, значения расхода воды через ГЭС и напора вычисляют методом последовательных приближений, так как не могут быть найдены непосредственным расчетом. Алгоритм проведения водно-энергетического расчета по заданным значениям расхода воды в нижний бьеф или мощности состоит из следующих шагов:

- по заданным значениям расхода воды в нижний бьеф и притока к створу ГЭС определяют значения расхода воды из водохранилища и уровня нижнего бьефа;

- определяют значения изменения объема водохранилища для каждого расчетного интервала времени;

- определяют значения уровня верхнего бьефа на конец каждого из расчетных интервалов;

- если расход воды в нижний бьеф при полученном напоре превышает максимальную пропускную способность турбин ГЭС, вычисляют расход воды на холостой сброс;

- определяют значения мощности ГЭС для каждого расчетного интервала времени;
- в случае если мощность ГЭС не совпадает с расчетным значением мощности, рассчитывают новые значения расхода воды через ГЭС и напора.

## **2.4 Формирование прогноза полезного притока к створу гидроузла**

Приток воды в водохранилище является одной из ключевых характеристик, влияющих на режим эксплуатации ГЭС. Точный расчет притока, а также его своевременный прогноз создают предпосылку для принятия наиболее рациональной схемы регулирования водохранилища, а значит, повышают экономическую эффективность и безопасное использование сооружения. Задача расчета и прогноза притока воды в водохранилища особо остро стоит в горных районах, где горный характер водосбора водохранилища, метеорологические условия способствует высокой изменчивость притока речных вод, как в течение года, так и в межгодовой перспективе. [5]

### **2.4.1 Формирование прогноза полезного притока в долгосрочной перспективе**

Полезный приток к створу гидроузла задается на основе гидрологических данных наблюдений. Статистические гидрологические данные представляют собой календарные ряды, составленные на основании наблюдений за стоком в бассейне реки. При недостаточности статистической информации о стоке производится удлинение гидрологических рядов методом Монте-Карло, т.е. процесс описывается математической моделью с использованием генератора случайных величин, модель многократно обчисляется, на основе полученных данных вычисляются вероятностные характеристики рассматриваемого процесса. [3]

Используемая гидрологическая информация зависит от целей планирования и может быть взята в виде:

- многолетнего наблюденного гидрологического ряда;
- расчетного гидрографа, определяемого по заданной обеспеченности планируемого года;
- расчетного гидрографа заданного календарного года-аналога;
- гидрологического ряда заданной длины.

### **2.4.2 Формирование прогноза полезного притока в среднесрочной перспективе**

Существуют следующие подходы к прогнозированию полезного притока к створу гидроузла:

- прогнозирование притока к створу гидроузла на основе прогнозных данных федерального органа исполнительной власти, осуществляющего

функции по управлению государственным имуществом и оказанию государственных услуг в области гидрометеорологии и смежных с ней областях и накопленных архивных данных о притоке к створу гидроузла за предыдущие годы;

- оценка притока к створу гидроузла на основе моделирования водного стока с использованием фактических (архивных) данных о метеорологической обстановке (осадки, температура, водонасыщенность снега, влажность и др.)

Прогнозирование притока к створу гидроузла на основе данных организации по метеорологии и мониторингу окружающей среды и накопленной статистики по развитию притока к створу гидроузла за предыдущие годы осуществляется на основе следующих входных данных:

- статистика по развитию притока к створу гидроузла за период эксплуатации ГЭС (архивные данные о среднесуточном расходе притока);

- прогноз притока на месяц и/или квартал, предоставленный организацией по метеорологии и мониторингу окружающей среды (прогноз притока предоставляется ежеквартально в виде интервала наиболее вероятных значений среднего расхода притока или объема стока за месяц/квартал; по мере развития гидрометеорологической обстановки прогноз может уточняться).

Алгоритм прогнозирования притока к створу гидроузла на основе прогнозных данных организации по метеорологии и мониторингу окружающей среды и накопленных архивных данных о притоке к створу гидроузла за предыдущие годы:

1) Из архива выбирается информация о притоке воды к водохранилищу за несколько лет-аналогов (от трех до пяти). Годы-аналоги выбираются с объемом стока за предыдущие один-два квартала близкими к объему стока текущего года за тот же период. Из выбранных лет выбирается год, форма гидрографа которого за предыдущий месяц наиболее близка к форме гидрографа фактического притока. В качестве дополнительных критериев выбора года-аналога могут использоваться: данные о слое осадков, сумме температур за предыдущий месяц, запасе воды в снеге на начало интервала планирования;

2) Объем притока, прогнозируемый организацией по метеорологии и мониторингу окружающей среды, распределяется пропорционально гидрографу выбранного года-аналога;

3) В зависимости от складывающейся водохозяйственной и гидрометеорологической обстановки может приниматься как средняя величина прогнозного притока, так и его верхняя или нижняя граница. В большинстве случаев рекомендуется брать среднее значение. Выбор величины притока по верхней или нижней границе прогнозного интервала должен быть дополнительно обоснован. Например, при наличии предпосылок прохождения высокого половодья рекомендуется брать верхнюю границу, а в случае затяжной маловодной межени – нижнюю границу и т.д.

Результатом прогнозирования притока к створу гидроузла на основании прогнозных данных организации по метеорологии и мониторингу окружающей среды являются варианты гидрографов притока воды к створу гидроузла.

Оценка притока к створу гидроузла на среднесрочный период планирования на основе моделирования формирования речного стока с использованием фактических данных о метеорологической обстановке осуществляется на основе входных данных, приведенных в пункте 1.3.

Алгоритм оценки притока к створу гидроузла на основе моделирования стока с использованием фактических данных о метеорологической обстановке составляют в определенной последовательности.

Сначала строят модель формирования водного стока с заданными начальными условиями, моделирующая развитие притока к створу гидроузла. Модель должна имитировать процессы гидрологического цикла суши (инфильтрацию, испарение, термический и водный режимы почв, формирование снежного покрова и снеготаяние, формирование поверхностного внутрипочвенного, грунтового и речного стока) и формирования стока. В летний период модель должна учитывать следующие факторы:

- выпадающие в виде дождя осадки частично проникают в почву;
- избыток воды, не поглощенный почвой, после заполнения депрессий на поверхности бассейна перемещается по уклону поверхности в речную сеть;
- часть влаги, впитавшейся в почву, может перемещаться по уклону по временным относительно непроницаемым водоупорам;
- вода, не попавшая в речную сеть, испаряется в воздух или дренирует в более глубокие горизонты почвы.

В холодный период года модель дополняют факторами, учитывающими гидротермические процессы в снежном покрове и почве (формирование снежного покрова и снеготаяние, промерзание и оттаивание почвы, инфильтрация талых вод в мерзлую почву). Модель должна позволять отображать пространственные неоднородности рельефа, почв, землепользования, а также учитывать пространственные особенности полей внешних гидрометеорологических воздействий.

Далее проводят гидрологические расчеты с использованием модели. Для получения начальных условий, соответствующих дате проведения оценки притока к створу гидроузла, производят предварительный расчет, который должен охватывать период не менее одного года. В качестве входной информации используют поля оперативной фактической метеоинформации.

Следующим шагом проводятся сценарные расчеты, начальными условиями являются параметры модели, полученные в результате предварительного расчета. Расчет ведут по фактическим метеоданным, которые наблюдались в прошлые годы. Результатом являются гидрографы общего или бокового притока в заданных створах, полученные по сценариям прошлых лет.

По итогу выбирают наиболее вероятный погодный сценарий. Сценарий может быть выбран из условий совпадения характера фактического притока,



распределения полей снежного покрова, осадков, значений стока за предыдущие периоды планирования.

Результатом оценки притока к створу гидроузла на основе моделирования водного стока с использованием фактических данных о метеорологической обстановке является прогноз полезного притока к створу гидроузла.

### **2.4.3 Формирование прогноза полезного притока в краткосрочной перспективе**

Прогнозирование объемов полезного притока к створу ГЭС в краткосрочной перспективе осуществляется на основании данных среднесрочного планирования с учетом расхода воды в нижний бьеф вышележащей ГЭС, с использованием результатов измерений расходов воды на водомерных постах на реках, фактических данных о метеорологической обстановке (осадки, температура, водонасыщенность снега, влажность и др.) и накопленной статистики притока к створу гидроузла. При отсутствии этих данных среднесуточный расход притока за рассматриваемые сутки принимается равный расходу воды, определенному в результате среднесрочного планирования.

Алгоритм формирования прогноза полезного притока воды к створу ГЭС в краткосрочной перспективе состоит из следующих шагов:

- задание расчетных значений полезного притока к створу ГЭС для каждого расчетного интервала времени равными среднесуточному значению полезного притока воды, определенного в рамках среднесрочного планирования водно-энергетического режима;

- определение погрешности среднесрочного планирования полезного притока к створу ГЭС. Погрешность вычисляется как разность расчетной и фактической величин полезного притока к створу ГЭС за прошедшие сутки. Расчетная величина определяется в результате среднесрочного планирования водно-энергетических режимов ГЭС. Фактическая величина определяется путём непосредственного измерения притока (при наличии данных) или по балансу воды в водохранилище;

- корректировка полезного притока к створу ГЭС на планируемые сутки на погрешность среднесрочного планирования полезного притока к створу ГЭС за прошедшие сутки.

Результатом моделирования объемов полезного притока к створу ГЭС в краткосрочной перспективе являются значения полезного притока к створу ГЭС для каждого расчетного интервала времени.

### **3 Прогнозирование притока к створу ГЭС**

#### **3.1 Существующие методы прогнозирования притока к створу ГЭС**

Подводя итог сказанного во 2 главе можно сделать вывод, что прогнозирование притока к створу ГЭС является одним из ключевых факторов при планировании водно-энергетического режима ГЭС.

Существует огромное количество методов прогнозирования притока. Например, для краткосрочных прогнозов на равнинных реках могут использоваться следующие гидрометрические и гидрометеорологические методы (отличия заключаются в характере использования исходных данных):

- 1) метод тенденции;
- 2) метод соответственных уровней;
- 3) метод соответственных объемов;
- 4) метод изохрон;
- 5) методы прогноза ледовых явлений, основанные на учете теплообмена потока с окружающей средой.

Первые три метода основаны на использовании материалов гидрометрических наблюдений в русловой сети бассейна, характеризующих закономерность движения паводочной волны. Метод изохрон и методы прогноза ледовых явлений основаны на использовании не только гидрометрических данных, но и метеорологических. [6]

Для долгосрочных прогнозов весеннего стока, могут применяться методы описанные ниже [7]:

- 1) Прямой водобалансовый расчет, в основе которого лежит водный баланс речного бассейна, а именно алгебраическое суммирование его составляющих. Важное практическое значение водобалансового метода заключается в его использовании при количественной оценке изменений его составляющих под влиянием гидротехнических, водохозяйственных, сельскохозяйственных и других антропогенных мероприятий. При всей простоте алгебраического уравнения водного баланса бассейна определение составляющих трудоемко, требует дополнительных наблюдений и содержит ряд неопределенностей и допущений, которые нуждаются в дополнительной проработке и проверке. Возникают трудности реализации метода при недостатке необходимых наблюдений. При этом водобалансовый расчет весеннего стока применим практически только в условиях лесной зоны избыточного увлажнения, где водопоглотительная способность речных бассейнов определяется, главным образом, свободной емкостью верхних слоев почвы, болот и других емкостей, затратой воды на пополнение грунтовых вод и потерями на испарение с заснеженной и водной поверхности в период половодья. Применение уравнений водных балансов наиболее эффективно при достаточно больших интервалах времени (год, сезон) и достаточно больших площадях (речные бассейны).

2) Физико-статистический водобалансовый метод. В основе данного метода положена достаточно общая детерминистическая модель речного бассейна как системы, с неравномерным распределением емкости и переменной инфильтрационной способностью почвы. При этом метод базируется на условии водного баланса речного бассейна за период половодья, но отличается при этом от водобалансового метода тем, что в основе расчета стока, водопоглощения (потерь) лежит определенная теоретическая модель. Подобная модель позволяет независимо от эмпирических данных получить интегральные уравнения стока для емкостного и инфильтрационно-емкостного типов водопоглощения, которые дают физически объективное представление об общем нелинейном виде зависимости стока, а значит и его потерь, от определяющих их факторов при данных типах водопоглощения. Эти уравнения определяют одновременно и возможность эмпирического решения задачи о прогнозе стока путем графического построения зависимостей или определения соответствующих параметров приближенных уравнений для конкретных бассейнов, пользуясь имеющимися данными многолетних гидрологических наблюдений с учетом особенностей бассейнов в различных физико-географических зонах. Наиболее простой с точки зрения возможностей оценки емкостной тип водопоглощения идентичен поверхностному задержанию, поскольку просачивание воды в почву происходит в этом случае с той же интенсивностью, с какой она поступает, а сток становится возможным только с тех площадей на которых заполнилась свободная емкость почвенных пор и емкость депрессий микрорельефа. Полностью поглощающие воду пески, например, идентичны очагам неограниченной емкости. Интенсивность поступления воды на поверхность бассейна не может при этом оказывать влияние на водопоглощение, которое зависит только от наличия свободной емкости и величины бессточной площади при данном количестве поступившей воды. Все это делает более сложным решение задачи прогнозов, поскольку в настоящее время нет еще достаточно надежных способов заблаговременной оценки ни интенсивности снеготаяния, ни интенсивности инфильтрации воды в мерзлую почву. При этом в естественных речных бассейнах на разных площадях часто могут иметь место оба типа водопоглощения. В связи с этим для обоих типов водопоглощения особенно важно знать общий вид зависимостей стока от определяющих его факторов.

3) Статистические методы. Статистические методы в гидрологических исследованиях находят применение при решении многих задач, так как часто они являются единственным путем решения количественной оценки различных сторон гидрологических явлений. Указанное вытекает из многофакторной сущности гидрологических процессов. Многие гидрологические явления представляют собой результат действия большого числа факторов, степень влияния каждого из которых на формирование рассматриваемого явления учесть в полной мере не представляется возможным. Поэтому математическое описание подобных явлений возможно лишь методами статистического анализа. Статистические методы прогнозирования включают в себя главным

образом корреляцию, в том числе множественную, с отбором независимых переменных (или предикторов) методами просеивания. Корреляция – один из приемов, который получил широкое применение еще на ранней стадии развития гидрологического анализа и прогнозов. Это обуславливалось не только крайней ограниченностью ряда наблюдений, но и ограниченностью знаний в отношении закономерностей формирования талого стока. Ведутся попытки разработки чисто статистическими методами долгосрочных и сверхдолгосрочных территориальных прогнозов стока для определения среднего в данном районе стока и перехода от него к стоку в отдельных бассейнах, а в дальнейшем и выработке электрической энергии, а также более сложных приемов расчета стока по заданному полю запаса воды в снеге и с учетом иных факторов стока. [8] К примеру, большинство разрабатываемых и используемых в оперативной практике методов долгосрочных прогнозов ледовых явлений основаны на зависимости сроков замерзания и вскрытия рек от особенностей развития атмосферных процессов и температурного режима поверхности океанов в переходные сезоны года. Такие особенности могут быть различными для рек различных климатических зон. Поэтому разработки прогностических методов носят локальный характер и привязываются к конкретным участкам рек. [9]

В общем случае определение притока воды по уравнению водного баланса водохранилища является более простым и в ряде случаев единственно возможным методом, например, если на реках, впадающих в водохранилище, не ведутся наблюдения за стоком. В случае наличия наблюдений за стоком рек-притоков в водохранилище, данный метод является менее предпочтительным для расчета притока, нежели гидрометрический метод по ряду причин. При использовании водно-балансового способа, в вычисленную через уравнение водного баланса величину притока в неявном виде входят все неучтенные элементы водного баланса (испарение, осадки, грунтовый приток и сток и т. д.), а также ошибки расчета. Кроме того, по мере уменьшения интервала, за который рассчитывается приток, точность гидрометрического метода падает значительно медленнее, чем водно-балансового в связи с погрешностями учета аккумуляции воды в водохранилище из-за денивилиции водной поверхности водохранилища. Чем больше доля аккумуляции в водном балансе водохранилища, тем больше ошибки расчета суточного притока можно получить, например, она может превышать в десятки раз ошибку за месяц. В связи с этим, при небольшой длительности интервала (в первую очередь – одни сутки) рекомендуется рассчитывать приток с помощью гидрометрического метода. [5]

Из вышесказанного можно сделать вывод, что в основе любого научно обоснованного метода прогнозирования должны лежать вполне определенные физические предпосылки или определяющие их основу положения. Это может быть в разной степени приближения закономерная модель, прямо описывающая процесс формирования интересующего явления, а в менее определенных случаях – достаточно обоснованная модель, отражающая

причинно-следственную взаимосвязь факторов. Особенностью прогнозов является весьма существенная роль, которую играет в них элемент неопределенности, связанный как с недостатками исходной информации, что лишает проведение прогнозирования достаточно глубокого физического анализа, так и незнание будущих условий за период заблаговременности прогноза, непосредственно влияющих на результат значения предсказываемой величины. Еще одной особенностью гидрологических прогнозов, в частности прогноза стока, состоит в их эмпирическом, основанном на практических наблюдениях, и в большей мере дискретном характере. [9]

## 3.2 Разработка метода прогнозирования притока к створу ГЭС на примере Саяно-Шушенской ГЭС

### 3.2.1 Анализ исходных данных для прогнозирования притока

Для прогнозирования притока к створу Саяно-Шушенской ГЭС были взяты данные притока к створу СШГЭС по дням за 2016, 2017, 2018 года. Данные были структурированы и для удобства сведены в таблицу. Пример исходных данных за январь представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Данные по притоку за январь 2016, 2017, 2018 г.

Дата	Приток, м <sup>3</sup> /с		
	2016 г.	2017 г.	2018 г.
01.январь	470	570	490
02.январь	470	560	490
03.январь	470	560	480
04.январь	470	550	480
05.январь	470	540	480
06.январь	470	520	470
07.январь	470	520	470
08.январь	470	520	460
09.январь	470	500	460
10.январь	460	500	460
11.январь	460	500	460
12.январь	460	490	460
13.январь	460	480	450
14.январь	450	480	440
15.январь	450	460	440
16.январь	450	460	430
17.январь	450	460	430
18.январь	440	460	430
19.январь	440	450	430
20.январь	440	450	430
21.январь	440	450	430

Окончание таблицы 1

Дата	Приток, м <sup>3</sup> /с		
	2016 г.	2017 г.	2018 г.
22.янв	440	440	420
23.янв	440	440	420
24.янв	430	440	410
25.янв	410	440	410
26.янв	400	420	400
27.янв	380	420	400
28.янв	380	420	390
29.янв	380	420	390
30.янв	380	420	390
31.янв	380	420	380

Входные данные являются одним из важнейших, если не самым важным фактором оказывающим влияние на конечный прогноз, поэтому их правильному подбору и подготовке следует уделять особое внимание.

### **3.2.2 Описание методики прогнозирования притока к створу ГЭС с использованием нейросетевых методов обработки информации**

Метод нейросетевой обработки информации подразумевает под собой использование искусственных нейронных сетей (ИНС) для получения прогноза притока к створу ГЭС на основе некоторых входных данных.

Нейронная сеть - математическая модель, а также её программное или аппаратное представление. Это понятие возникло при изучении процессов, протекающих в мозге, и при попытке смоделировать эти процессы. После разработки алгоритмов обучения получаемые модели стали использовать в практических целях: в задачах прогнозирования, для распознавания образов, в задачах управления и др.

ИНС представляет собой систему соединённых и взаимодействующих между собой искусственных нейронов. Такие нейроны обычно довольно просты. Каждый нейрон подобной сети имеет дело только с сигналами, которые он периодически получает, и сигналами, которые он периодически посылает другим нейронам. И, тем не менее, будучи соединёнными в достаточно большую сеть с управляемым взаимодействием, такие по отдельности простые нейроны вместе способны выполнять довольно сложные задачи.

Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения — одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что в случае успешного обучения сеть сможет вернуть верный

результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных и/или «зашумленных», частично искажённых данных.

Примером наиболее успешного применения нейронных сетей пока является анализ изображений, однако нейросетевые технологии коренным образом изменили и работу с текстовыми и числовыми данными.

Способности нейронной сети к прогнозированию напрямую следуют из её способности к обобщению и выделению скрытых зависимостей между входными и выходными данными. После обучения ИНС способна предсказать будущее значение некой последовательности на основе нескольких предыдущих значений и (или) каких-то существующих в настоящий момент факторов. Следует отметить, что прогнозирование возможно только тогда, когда предыдущие изменения действительно в какой-то степени определяют будущее.

Процесс прогнозирования с помощью нейронных сетей, состоит из следующих основных этапов:

- 1) Необходим правильный подбор архитектуры нейронной сети для решения конкретной задачи;
- 2) Для обучения нейронной сети необходимо произвести выбор обучающих данных;
- 3) Постоянное обучение нейронной сети, её тестирование и проверка полученных данных;
- 4) Непосредственное использование нейронной сети для прогнозирования водотока, а также корректировка работы сети по результатам ее использования.

Главным преимуществом при таком подходе к прогнозированию притока к створу ГЭС является то, что при использовании нейронной сети отпадает необходимость в сборе большого числа исходных данных, в большинстве случаев зависящих друг от друга, в анализе этих зависимостей, непосредственном определении степени влияния каждого фактора на конечный результат прогноза.

### **3.2.3 Выбор архитектуры нейронной сети**

Существуют разные виды нейронных сетей, но при работе с текстовыми и числовыми данными чаще всего используются два из них: сверточные и рекуррентные нейронные сети.

Для прогнозирования числовых данных существующих в некоторых временных рядах, а приток к створу ГЭС как раз и является таковым, наиболее подходят рекуррентные нейронные сети.

Рекуррентные нейронные сети (РНС, англ. Recurrent neural network; RNN) — вид нейронных сетей, где связи между элементами образуют направленную последовательность. Благодаря этому появляется возможность обрабатывать серии событий во времени или последовательные пространственные цепочки. В отличие от многослойных перцептронов, рекуррентные сети могут

использовать свою внутреннюю память для обработки последовательностей произвольной длины. Схема данной нейронной сети представлена на рисунке 2. На схеме представлен фрагмент нейронной сети  $A$ , она принимает входное значение  $x_t$  и возвращает значение  $h_t$ . Наличие обратной связи позволяет передавать информацию от одного шага сети к другому.

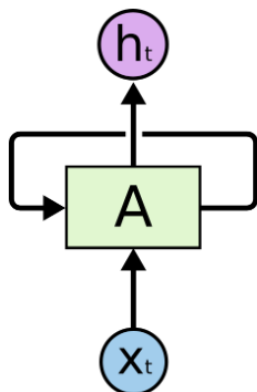


Рисунок 2 – Схема рекуррентной нейронной сети

Обратные связи придают рекуррентным нейронным сетям некую сложность по сравнению с обычными нейронными сетями. Однако на самом деле они не так уж сильно отличаются от обычных нейронных сетей.

Рекуррентную сеть можно рассматривать, как несколько копий одной и той же сети, каждая из которых передает информацию последующей копии. При развороте обратной связи, схема рекуррентной нейросети примет следующий вид представленный на рисунке 3.

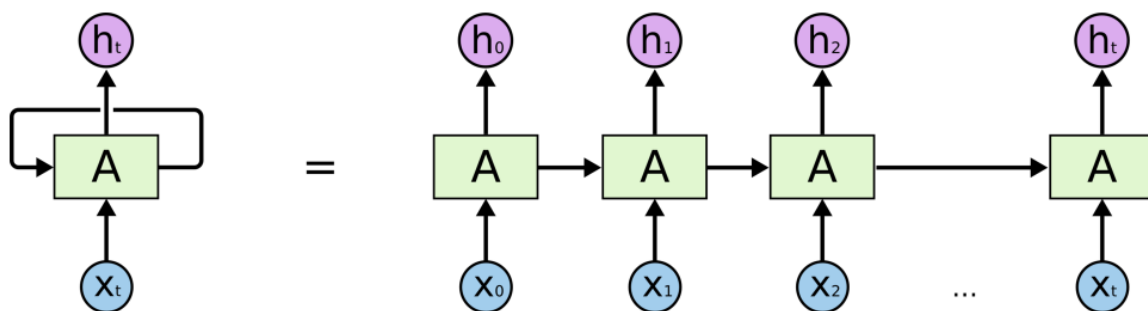


Рисунок 3 – Рекуррентная нейронная сеть в развертке

Рекуррентные нейронные сети используются для решения большого числа задач, включая задачи прогнозирования, из-за их способности учитывать предыдущую информацию из последовательности для расчёта текущего выхода. Однако, несмотря на теоретическую возможность изучать долгосрочную зависимость, на практике модели рекуррентных нейронных сетей не выполняют ожидаемого и страдают от проблем с градиентным спуском. По этой причине была разработана специальная архитектура



нейронной сети под названием Long Short-Term Memory (LSTM) для решения проблемы затухания градиента.

LSTM – необычная модификация рекуррентной нейронной сети, которая на многих задачах значительно превосходит стандартную версию.

Долгая краткосрочная память (Long short-term memory; LSTM) – особая разновидность архитектуры рекуррентных нейронных сетей, способная к обучению долговременным зависимостям. Они прекрасно решают целый ряд разнообразных задач и в настоящее время широко используются. LSTM разработаны специально, чтобы избежать проблемы долговременной зависимости. Запоминание информации на долгие периоды времени – это их обычное поведение, а не что-то, чему они с трудом пытаются обучиться. [12]

Любая рекуррентная нейронная сеть имеет форму цепочки повторяющихся модулей нейронной сети. В обычной RNN структура одного такого модуля очень проста, например, он может представлять собой один слой с функцией активации  $\tanh$  (гиперболический тангенс), данная схема представлена на рисунке 4.

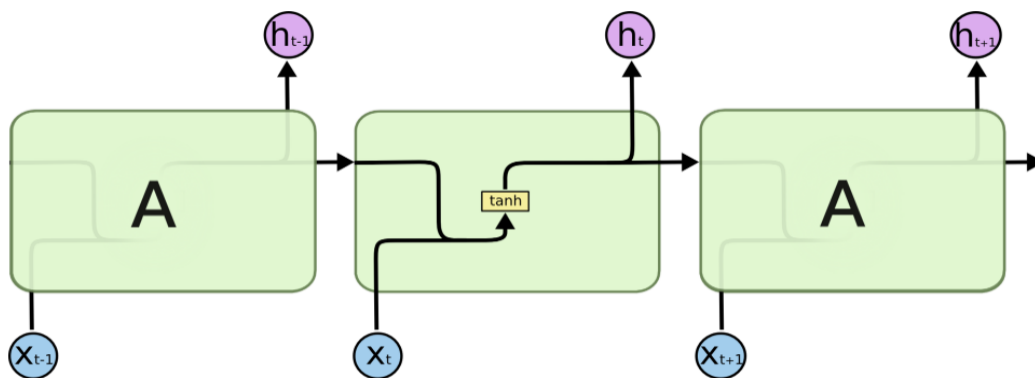


Рисунок 4 – Повторяющийся модуль в стандартной RNN состоит из одного слоя

Структура LSTM также напоминает цепочку, но модули выглядят иначе. Вместо одного слоя нейронной сети они содержат четыре, и эти слои взаимодействуют особенным образом, схема данной сети представлена на рисунке 5.

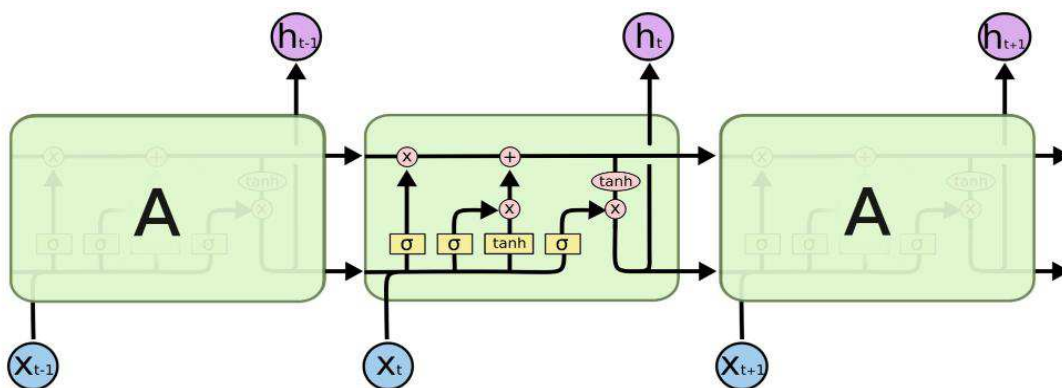


Рисунок 5 – Повторяющийся модель в LSTM сети состоит из четырех взаимодействующих слоев

Ключевой компонент LSTM – это состояние ячейки (cell state) – горизонтальная линия, проходящая по верхней части схемы. Состояние ячейки напоминает конвейерную ленту. Она проходит напрямую через всю цепочку, участвуя лишь в нескольких линейных преобразованиях. Информация может легко течь по ней, не подвергаясь изменениям, схема данного процесса представлена на рисунке 6.

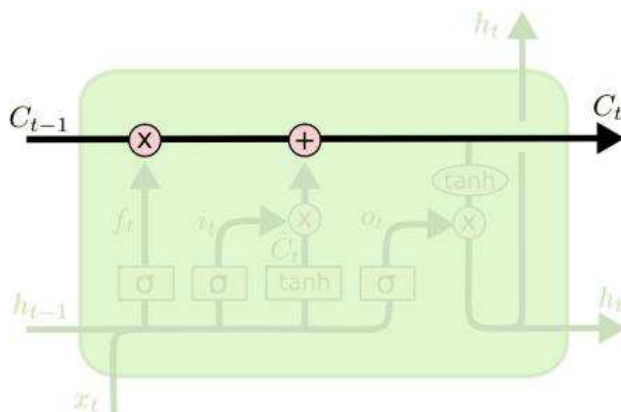


Рисунок 6 – Состояние ячейки

Тем не менее, LSTM может удалять информацию из состояния ячейки, этот процесс регулируется структурами, называемыми фильтрами (gates). Фильтры позволяют пропускать информацию на основании некоторых условий. Они состоят из слоя сигмоидальной нейронной сети и операции поточечного умножения. Сигмоидальный слой возвращает числа от нуля до единицы, которые обозначают, какую долю каждого блока информации следует пропустить дальше по сети. Ноль в данном случае означает “не пропускать ничего”, единица – “пропустить все”. В LSTM три таких фильтра, позволяющих защищать и контролировать состояние ячейки. Таким образом, при реализации LSTM удастся обойти проблему исчезновения градиентов в процессе обучения методом обратного распространения ошибки. Сеть LSTM обычно модерируется с помощью фильтров (gates) «забывания». Ошибки распространяются назад по времени через потенциально неограниченное количество виртуальных слоёв. По такому алгоритму и происходит обучение в LSTM, при этом сохраняя память о тысячах и даже миллионах временных интервалов в прошлом. Топологии сетей типа LSTM могут развиваться в соответствии со спецификой процесса. В сети LSTM даже большие задержки между значимыми событиями могут учитываться, и тем самым высокочастотные и низкочастотные компоненты могут смешиваться.

Таким образом, среди множества существующих видов ИНС в качестве наиболее подходящей для прогнозирования притока к створу ГЭС выбрана рекуррентная нейронная сеть LSTM.

### 3.2.4 Описание программного кода используемого для прогнозирования притока

Разработка метода прогнозирования притока к створу ГЭС будет выполнена на языке программирования Python.

1) На первом этапе происходит импортирование библиотек в программу, необходимых для дальнейшей работы, фрагмент данного программного кода представлен на рисунке 7.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import seaborn as sns
%matplotlib inline
import tensorflow as tf
import keras
from keras.models import Sequential
from keras.layers import Dense
from keras.layers import LSTM
from keras.layers import Dropout
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
from sklearn.metrics import mean_squared_error
from sklearn.metrics import mean_absolute_error
from keras.callbacks import EarlyStopping
```

Рисунок 7 – Фрагмент кода программы на 1 этапе

2) На втором этапе загружаются исходные данные, в данном случае это гидрологические данные (данные о притоке) за 2016, 2017 и 2018 года, фрагмент данного программного кода представлен на рисунке 8.

```
df = pd.read_csv('Исходные данные.csv')
```

Рисунок 8 – Фрагмент кода программы на 2 этапе

3) На третьем этапе происходит работа с исходными данными (более подробное описание строк кода представлено на рисунке 9), фрагмент данного программного кода представлен на рисунке 9.

```
dataset = df['Приток'].values # преобразование столбца с данными по притоку в массив
dataset = dataset.astype('float32') # задается формат данных, программа воспринимает данные как вещественные числа
dataset = np.reshape(dataset, (-1, 1)) # массив данных транспонируется
scaler = MinMaxScaler(feature_range=(0, 1)) # все исходные значения приводятся в диапазон от 0 до 1
dataset = scaler.fit_transform(dataset)

train_size = int(len(dataset) * 0.80) # исходная выборка данных делится на данные для обучения и теста
test_size = len(dataset) - train_size # (80 % данных для обучения, остальные для теста)
train, test = dataset[0:train_size,:], dataset[train_size:len(dataset),:]
```

Рисунок 9 – Фрагмент кода программы на 3 этапе

4) На четвертом этапе происходит работа с данными (более подробное описание строк кода представлено на рисунке 10), фрагмент данного программного кода представлен на рисунке 10.

```
def create_dataset(dataset, look_back=1): # данной функцией массив исходных значений преобразуется в матрицу
    X, Y = [], []
    for i in range(len(dataset)-look_back-1):
        a = dataset[i:(i+look_back), 0]
        X.append(a) # значения, на основании которых, осуществляется прогноз Y
        Y.append(dataset[i + look_back, 0]) # прогнозируемые значения
    return np.array(X), np.array(Y)
```

Рисунок 10 – Фрагмент кода программы на 4 этапе

5) На пятом этапе также происходит работа с данными (более подробное описание строк кода представлено на рисунке 11), фрагмент данного программного кода представлен на рисунке 11.

```
look_back = 7 # количество предыдущих значений, необходимых для предсказания последующего
X_train, Y_train = create_dataset(train, look_back) # вызов функции create_dataset
X_test, Y_test = create_dataset(test, look_back)
```

Рисунок 11 – Фрагмент кода программы на 5 этапе

6) На шестом этапе матрица данных приводится к виду [количество данных, шаг, количество признаков], фрагмент данного программного кода представлен на рисунке 12.

```
X_train = np.reshape(X_train, (X_train.shape[0], 1, X_train.shape[1]))
X_test = np.reshape(X_test, (X_test.shape[0], 1, X_test.shape[1]))
```

Рисунок 12 – Фрагмент кода программы на 6 этапе

7) На седьмом этапе происходит построение архитектуры модели (более подробное описание строк кода представлено на рисунке 13), фрагмент данного программного кода представлен на рисунке 13.

```
model = Sequential()
model.add(LSTM(64, input_shape=(X_train.shape[1], X_train.shape[2]))) # 1 слой LSTM сети с 64 нейронами
model.add(Dropout(0.2)) # слой регуляризации, предназначенный для уменьшения переобучения сети за счет
# предотвращения сложных коадаптаций отдельных нейронов на тренировочных данных во время обучения.
model.add(Dense(1)) # выходной слой
model.compile(loss='mean_squared_error', optimizer='adam') # настраивается модель с функцией потерь, loss функция потерь,
# optimizer - минимизирует loss за счет изменения параметров нейронной сети
history = model.fit(X_train, Y_train, epochs=300, batch_size=64, validation_data=(X_test, Y_test),
                    callbacks=[EarlyStopping(monitor='val_loss', patience=10)], verbose=1, shuffle=False) # обучение модели,
# epochs - количество раз которое модель будет анализировать данные, EarlyStopping - нужно для того чтобы модель не переобучилась
model.summary() # показывает архитектуру цепи
```

Рисунок 13 – Фрагмент кода программы на 7 этапе

8) На восьмом этапе происходит прогнозирование значения тестовой выборки (более подробное описание строк кода представлено на рисунке 14), фрагмент данного программного кода представлен на рисунке 14. Абсолютная погрешность прогнозируемого значения относительно всех известных данных равна 104,784 м<sup>3</sup>/с, относительная погрешность равна 164,094 м<sup>3</sup>/с.

```
test_predict = model.predict(X_test) # прогнозирование значения тестовой выборки
test_predict = scaler.inverse_transform(test_predict) # возврат данных из диапазона от 0 до 1 в метры кубические на секунду
Y_test = scaler.inverse_transform([Y_test])
print('Test Mean Absolute Error:', mean_absolute_error(Y_test[0], test_predict[:,0])) # абсолютная погрешность тестовых данных
print('Test Root Mean Squared Error:', np.sqrt(mean_squared_error(Y_test[0], test_predict[:,0]))) # относительная погрешность тестовых данных

Test Mean Absolute Error: 104.76371384926297
Test Root Mean Squared Error: 164.09387322351753
```

Рисунок 14 – Фрагмент кода программы на 8 этапе

9) На девятом этапе выводятся прогнозируемые и истинные данные, фрагмент данного программного кода представлен на рисунке 15.

```
true_labels = Y_test.reshape(212).tolist() # Показывает прогнозируемое и истинное значение
predicted_labels = test_predict.reshape(212).tolist()
for i in range(len(true_labels)-1):
    print(f'Предсказание: {predicted_labels[i]}\nИстинное: {true_labels[i]}\n\n')
Истинное: 2099.9999192551075
```

Предсказание: 2078.781982421875  
Истинное: 1999.9999930290505

Предсказание: 1993.489013671875  
Истинное: 1999.9999930290505

Предсказание: 1967.6976318359375  
Истинное: 1899.9999180913424

Предсказание: 1857.9967041015625  
Истинное: 1899.9999180913424

Рисунок 15 – Фрагмент кода программы на 9 этапе

10) На десятом этапе полученные данные представляются в графическом виде, фрагмент данного программного кода представлен на рисунке 16.

```

indx = [x for x in range(150)]
plt.figure(figsize=(8,4))
plt.plot(indx, Y_test[0][:150], marker='.', label="Факт")
plt.plot(indx, test_predict[:,0][:150], 'r', label="Прогноз")
plt.tight_layout()
sns.despine(top=True)
plt.subplots_adjust(left=0.07)
plt.ylabel('Значение притока', size=15)
plt.xlabel('Временной интервал', size=15)
plt.legend(fontsize=15)
plt.show();

```

Рисунок 16 – Фрагмент кода программы на 10 этапе

Полный код программы представлен в приложении А.

### 3.2.5 Анализ полученных результатов

Первоначально прогнозирование притока было выполнено только на основании гидрологических данных о притоке к створу СШГЭС за 2018 год. При таком количестве входных данных прогноз получился следующим:

- абсолютная погрешность равна 522,493 м<sup>3</sup>/с;
- относительная погрешность равна 526,906 м<sup>3</sup>/с.

На рисунке 17 представлено сравнение фактических значений притока за ноябрь и декабрь 2018 года с прогнозируемыми.

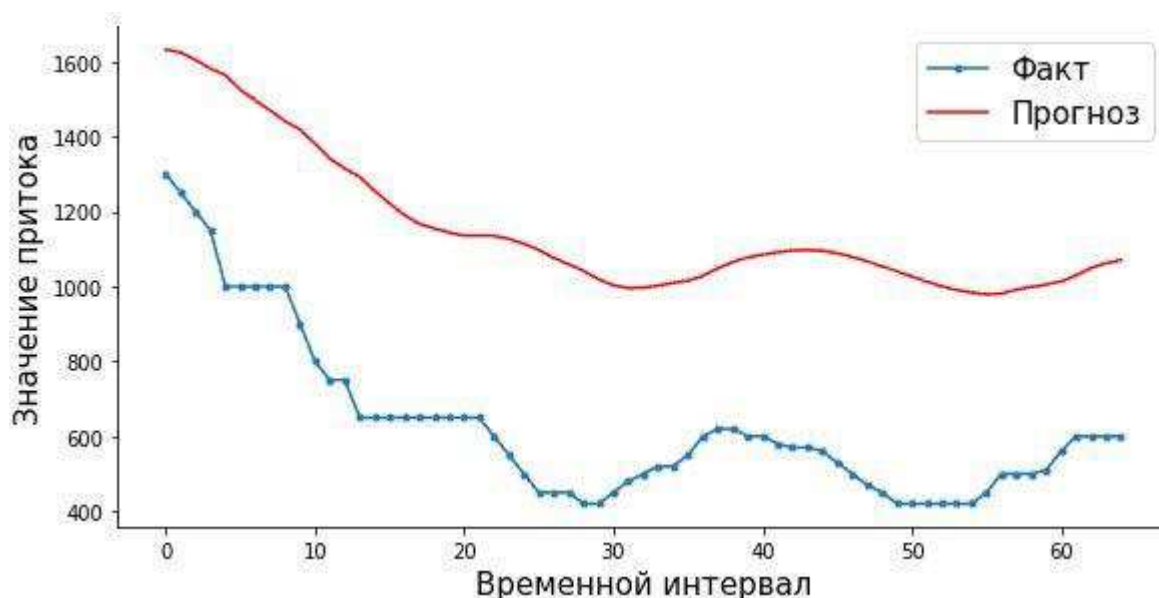


Рисунок 17 – Сравнение фактических значений притока за 2018 год с прогнозируемыми

Из полученных значений видно, что погрешность при таком количестве исходных данных довольно велика, соответственно для получения более точного прогноза необходимо увеличивать число входных данных.

Для улучшения качества прогнозирования были взяты гидрологические данные за 2016, 2017 и 2018 года. Для удобства эти данные представлены в графическом виде на рисунке 18.

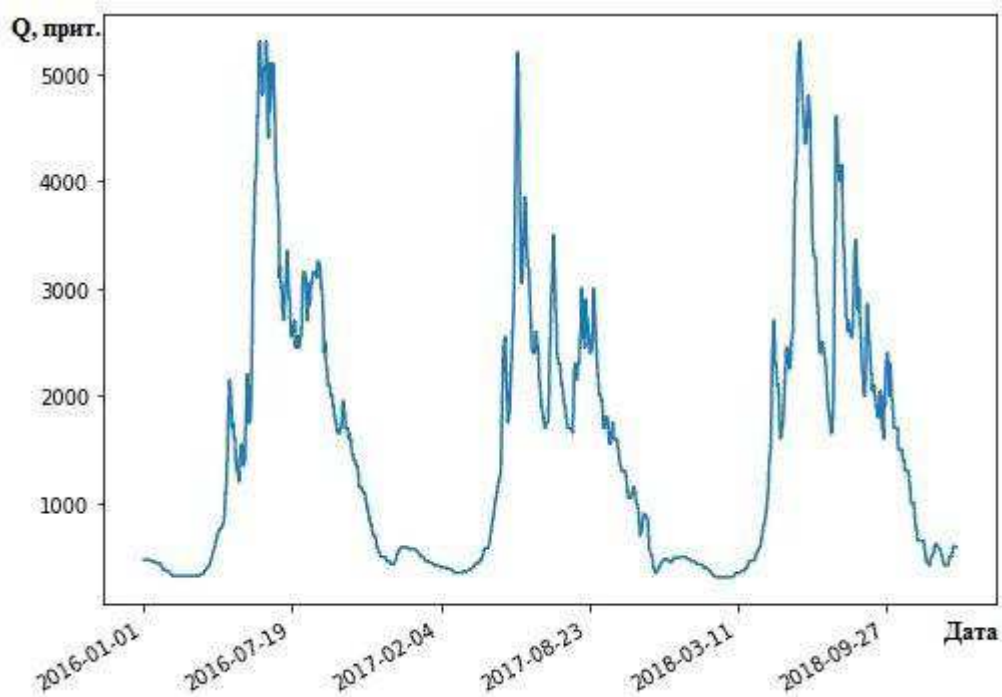


Рисунок 18 – Данные о притоке к створу СШГЭС за 2016, 2017 и 2018 года

Далее было выполнено прогнозирование притока к створу СШГЭС на основании гидрологических данных за 3 года. Результаты представлены ниже:

- абсолютная погрешность равна  $104,784 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- относительная погрешность равна  $164,094 \text{ м}^3/\text{с}$ .

На рисунке 19 представлено сравнение фактических значений притока за период с июля по декабрь 2018 года с прогнозируемыми.

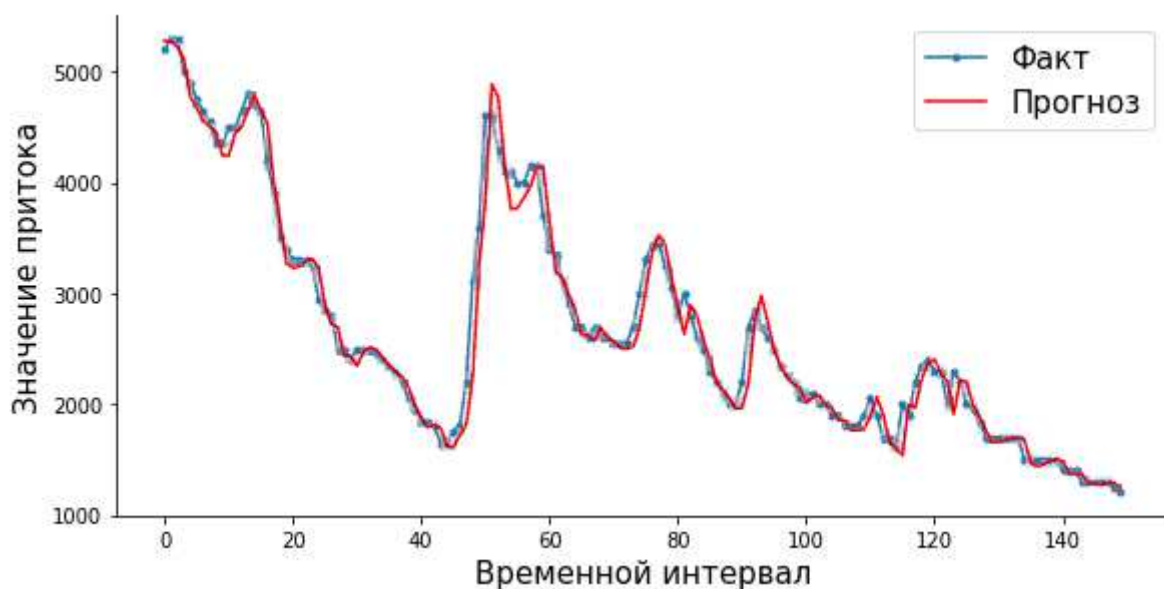


Рисунок 19 – Сравнение фактических значений притока за 2018 год с прогнозируемыми

Анализируя полученный результат можно сделать вывод, что погрешность в процессе корректировки исходных данных уменьшается. Таким образом, добавляя большее количество данных для обучения нейронной сети, на выходе будет получаться более достоверный результат прогноза.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования были изучены существующие методы прогнозирования притока к створу ГЭС, проанализированы данные необходимые для получения прогноза.

Также была разработана методика прогнозирования с применением искусственной нейронной сети. В качестве архитектуры сети была выбрана рекуррентная нейронная сеть LSTM.

В представленном виде данная методика не способна заменить уже существующие методики расчета, так как она учитывает лишь гидрологические данные прошлых лет, а для более точного и качественного прогноза она должна учитывать и другую информацию влияющую на приток (метеорологическую, морфометрическую и др.). Однако при дальнейшей доработке, внесении некоторых изменений в архитектуру сети, с помощью данной модели и методики в целом, появится возможность дополнить и уточнить уже существующие методы прогнозирования.

Главным преимуществом данной методики является то, что при использовании нейронной сети отпадает необходимость в сборе большого числа исходных данных, в большинстве случаев зависимых друг от друга, в анализе этих зависимостей, непосредственном определении степени влияния каждого фактора на конечный результат прогноза, все это нейронная сеть способна делать сама.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СТО РусГидро 06.01.84-2013 - Гидроэлектростанции. Планирование водноэнергетических режимов. Методические указания. 2013. – 54 с.
2. В.Н. Шарифуллин, А.Х. Мардиханов, А.В. Шарифуллин. Оперативное моделирование и оптимальное планирование краткосрочных режимов гидроэлектростанции: монография / В.Н. Шарифуллин, А.Х. Мардиханов, А.В. Шарифуллин. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – 103 с.
3. И.М. Соболев. Метод Монте - Карло. – Москва: Наука, 1968. – 64 с.
4. А.Ю. Александровский, Е.Ю.Затеева, Б.И.Силаев. Выбор параметров ГЭС: учебно-методическое пособие к курсовому и дипломному проектированию гидротехнических объектов - СШФ КГТУ.- Саяногорск, 2005. – 114 с.
5. С.В. Борщ, Д.А. Бураков, Ю.А. Симонов. Методика оперативного расчета и прогноза суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС: статья в журнале - научная статья / С.В. Борщ, Д.А. Бураков, Ю.А. Симонов – Москва: Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, 2016. – 106-127 с.
6. Ю.М. Георгиевский. Краткосрочные гидрологические прогнозы: учебное пособие – Москва: Изд. ЛПИ, 1982. – 100 с.
7. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып.1 Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ: практическое пособие – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 359 с.
8. А.В. Рождественский, А.И. Чеботарев. Статистические методы в гидрологии: учебное пособие – Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. – 425с.
9. П.С. Борщ. Методика планирования выработки электроэнергии каскада ГЭС с учетом стокообразующих и атмосферных факторов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/ П.С. Борщ, А.Ю. Александровский – Москва: ОАО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений», 2013. – 135 с.
10. А.А. Лопошниченко. Повышение эффективности решения режимных задач оперативного управления ГЭС на основе оптимизационных алгоритмов и визуализации информации: статья в сборнике трудов конференции – Саяногорск: СШФ СФУ, 2019. – 74-79 с.
11. В.Г Курбацкий, Н.В. Томин. Применение новых информационных технологий в решении электроэнергетических задач, 2008. – 113-119 с .
12. Hochreiter, Sepp; Schmidhuber, Jürgen. Long Short-Term Memory // Neural Computation. — 1997. — 1 November (vol. 9, no. 8). — P. 1735—1780.
13. Е.В.Цветков, Т.М. Алябышева, Л.Г. Парфенов. Оптимальные режимы гидроэлектростанций в энергетических системах/ Под ред. Цветкова Е.В. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 304с

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Полный код программы для прогнозирования притока к створу ГЭС

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import seaborn as sns
%matplotlib inline
import tensorflow as tf
import keras
from keras.models import Sequential
from keras.layers import Dense
from keras.layers import LSTM
from keras.layers import Dropout
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
from sklearn.metrics import mean_squared_error
from sklearn.metrics import mean_absolute_error
from keras.callbacks import EarlyStopping
tf.random.set_seed(6)
df = pd.read_csv('Исходные данные.csv')
dataset = df['Приток'].values
dataset = dataset.astype('float32')
dataset = np.reshape(dataset, (-1, 1))
scaler = MinMaxScaler(feature_range=(0, 1))
dataset = scaler.fit_transform(dataset)
train_size = int(len(dataset) * 0.80)
test_size = len(dataset) - train_size
train, test = dataset[0:train_size,:], dataset[train_size:len(dataset),:]
def create_dataset(dataset, look_back=1):
    X, Y = [], []
    for i in range(len(dataset)-look_back-1):
        a = dataset[i:(i+look_back), 0]
        X.append(a)
        Y.append(dataset[i + look_back, 0])
    return np.array(X), np.array(Y)
look_back = 7
X_train, Y_train = create_dataset(train, look_back)
X_test, Y_test = create_dataset(test, look_back)
X_train = np.reshape(X_train, (X_train.shape[0], 1, X_train.shape[1]))
X_test = np.reshape(X_test, (X_test.shape[0], 1, X_test.shape[1]))
model = Sequential()
model.add(LSTM(64, input_shape=(X_train.shape[1], X_train.shape[2])))
model.add(Dropout(0.2))
```

```

model.add(Dense(1))
model.compile(loss='mean_squared_error', optimizer='adam')
history = model.fit(X_train, Y_train, epochs=300, batch_size=64,
validation_data=(X_test, Y_test), callbacks=[EarlyStopping(monitor='val_loss',
patience=10)], verbose=1, shuffle=False)
model.summary()
test_predict = model.predict(X_test)
test_predict = scaler.inverse_transform(test_predict)
Y_test = scaler.inverse_transform([Y_test])
print('Test Mean Absolute Error:', mean_absolute_error(Y_test[0], test_predict[:,0]))
print('Test Root Mean Squared Error:', np.sqrt(mean_squared_error(Y_test[0],
test_predict[:,0])))
true_labels = Y_test.reshape(212).tolist()
predicted_labels = test_predict.reshape(212).tolist()
for i in range(len(true_labels)-1):
print(f'Предсказание: {predicted_labels[i]}\nИстинное: {true_labels[i]}\n\n')
indx = [x for x in range(150)]
plt.figure(figsize=(8,4))
plt.plot(indx, Y_test[0][:150], marker='.', label="Факт")
plt.plot(indx, test_predict[:,0][:150], 'r', label="Прогноз")
plt.tight_layout()
sns.despine(top=True)
plt.subplots_adjust(left=0.07)
plt.ylabel('Значение притока', size=15)
plt.xlabel('Временной интервал', size=15)
plt.legend(fontsize=15)
plt.show();


```

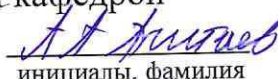
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра «Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических  
систем и электрических сетей»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

  
подпись, дата

  
инициалы, фамилия





«2» 07 2020 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО  
ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПРИТОКА К СТОРУ ГЭС НА ОСНОВЕ  
НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный руководитель	 подпись, дата	<u>Инженер 1-й категории</u> <u>ГСЭ филиала ПАО</u> <u>«РусГидро» - «Саяно-</u> <u>Шушенская ГЭС имени</u> <u>П.С. Непорожного»</u> должность	<u>Г.С. Шевченко</u> инициалы, фамилия
Выпускник	 подпись, дата		<u>А.А. Лопошниченко</u> инициалы, фамилия
Рецензент	 подпись, дата	<u>Начальник ОС филиала</u> <u>ПАО «РусГидро» -</u> <u>«Саяно-Шушенская ГЭС</u> <u>имени П.С.</u> <u>Непорожного»</u> должность	<u>И.Ю. Погоняйченко</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролёр	 подпись, дата		<u>А.А. Чабанова</u> инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2020