

Восстановление эксплуатационных характеристик гидроагрегатов по малому числу наблюдений

А.Н. Коварцев¹, А.Н. Назарова¹, В.Е. Захарченко²

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443058

²Сенсоры. Модули. Системы, Галактионовская 7, Самара, Россия, 443020

Аннотация. Эксплуатационная характеристика гидроагрегатов в качестве основной модели описания работы сложного узла очень часто используется в различных системах управления на гидроэлектростанции для регулирования скорости, распределения мощности, для отображения на различных уровнях пирамиды автоматизации: технологии, менеджмент и т. д. Поскольку затраты на создание новых гидроэлектростанций очень высоки, в последние годы инвестиции в этой области чаще связаны с реконструкцией, модернизацией и повышением эффективности существующих гидроэлектростанций. Перед вводом нового или реконструированного гидроагрегата в промышленную эксплуатацию он подвергается комплексу испытаний, направленных на проверку его работоспособности при заданных параметрах в условиях безопасной эксплуатации. В этом случае количество испытаний гидроагрегатов очень ограничено. В связи с этим возникает проблема восстановления эксплуатационных характеристик гидроагрегатов по малому числу наблюдений. В данной работе описан метод восстановления характеристик гидроагрегата, основанный на использовании ограниченного числа экспериментальных данных. Приведены результаты исследования свойств предложенного метода.

1. Введение

Современные тенденции развития гидроэнергетики предполагают концентрировать усилия не на строительстве новых ГЭС, а на модернизации и реконструкции существующего оборудования ГЭС, а также на разработке современных автоматизированных систем управления этим оборудованием [1].

Важнейшими характеристиками, используемыми в автоматизированных системах управления работой гидроэлектростанций, являются эксплуатационные характеристики гидротурбин. Обычно эксплуатационная характеристика гидротурбины представляет собой зависимость коэффициента полезного действия как функции мощности турбины и напора. Характеристики используются в различных системах ГЭС: в регуляторах частоты вращения турбин; в групповом регуляторе активной и реактивной мощности; системе рационального управления составом агрегатов [3, 4, 5] для формирования ограничений мощности; в системах автоматического управления гидроагрегатами для подсчета времени работы агрегата в различных режимах ограниченной и запрещенной зонах работы, а также для визуализации на локальных панелях оператора, диспетчерских АРМ и мнемощитах [2].

С течением времени гидротурбина стареет, а её эксплуатационная характеристика изменяет свой вид. В первую очередь, уменьшается к.п.д. гидротурбины в среднем от одного до трёх процентов, что негативно сказывается на эффективности управления работой гидроэлектростанции, поскольку используется недостоверная информация. В этом случае, до капитального ремонта, часто проводятся тестовые испытания гидроагрегата в сокращенном объеме. Количество полученных данных явно недостаточно для построения эксплуатационной характеристики в соответствии отраслевыми стандартами. Возникает некорректно поставленная задача восстановления изменённой характеристики гидротурбины по малому числу наблюдений.

Задача восстановления зависимостей по малому числу наблюдений имеет большое практическое значение, но изучена недостаточно подробно. К подобного рода задачам относятся: задача параметрической идентификации модели по малому числу наблюдений [6], задача оценки научно-технического уровня проекта авиационного ГТД при нехватке опубликованной информации [7] и т.д.

В данной работе предлагается оригинальный метод восстановления двумерных зависимостей к.п.д. гидротурбины по малому числу наблюдений с помощью функциональных преобразований.

2. Аппроксимация двумерных зависимостей по малому числу наблюдений с помощью нелинейных преобразований

Аппроксимация нелинейных функциональных зависимостей по малому числу наблюдений без дополнительной информации в общем случае - неразрешимая задача. Однако при определённых условиях её можно успешно решать. Сформулируем следующие предположения:

Предположение 1. Отклонение восстанавливаемой функциональной зависимости $f(x, y)$ от исходной $\varphi(x, y)$ в пространстве непрерывных функций C_0 не превышает заданную величину, т.е.

$$\|f(x, y) - \varphi(x, y)\|_{C_0} < \varepsilon. \quad (1)$$

Предположение 2. Количество данных наблюдений восстанавливаемой функции конечно и недостаточно для аппроксимации функции традиционными методами. Функции в точках эксперимента оцениваются с определенной точностью $|f(x, y)| < \delta$.

Введем следующий набор преобразований:

1. Инкрементирование функции

$$\Phi_1(X): \tilde{f}(x, y) \rightarrow f(x, y) + \Delta f. \quad (2)$$

2. Смещение «фокуса» преобразования

$$\Phi_2(X): \begin{cases} \tilde{x}_0 \rightarrow x_0 + \Delta x, \\ \tilde{y}_0 \rightarrow y_0 + \Delta y. \end{cases} \quad (3)$$

3. Поворот осей координат на угол α

$$\Phi_3(X): \begin{cases} \tilde{x} = x \cos \alpha + y \sin \alpha, \\ \tilde{y} = -x \sin \alpha + y \cos \alpha \end{cases} \quad (4)$$

4. Несимметричное растяжение/сжатие - $\Phi_4(X)$.

Введенные выше преобразования реализуют преобразования пространства независимых переменных с помощью отображений: $\Phi_k(X): X \rightarrow X$, где $X = (x, y, z)^T$. Рассмотрим более подробно последнее преобразование $\Phi_4(X)$.

Операция растяжения/сжатия осуществляется под управлением шаблона, представленного на рисунке 1. Само растяжение/сжатие реализуется по лучам, исходящим из центра несимметричного эллипса. Коэффициент растяжения/сжатия γ определяется следующим

образом. Зная координаты преобразуемой точки $X = (x, y)^T$, можно определить угол луча $\theta = \text{atg}(y/x)$. Точку пересечения луча $y = \text{tg } \theta \cdot x$ и эллипса $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ найдем, решив систему уравнений

$$\begin{cases} x' = \sqrt{1 / \left(\frac{\beta^2}{b^2} + \frac{1}{a^2} \right)}, \\ y' = \beta x. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $\beta = \text{tg } \theta$. В итоге коэффициент растяжения/сжатия вычисляется по формуле $\gamma = \sqrt{x'^2 + y'^2}$. Фактически, шаблон эллипса задаёт закон изменения коэффициента растяжения/сжатия. Новое положение исходной точки X можно найти из выражений

$$\begin{cases} \tilde{x} = \gamma \rho \cos \theta + x_0, \\ \tilde{y} = \gamma \rho \sin \theta + y_0. \end{cases} \quad (6)$$

Представленная выше методика относится к первой четверти системы координат. Аналогичные формулы получаются для остальных четвертей координатной сетки. Здесь $X_0 = (x_0, y_0)^T$ - координаты «фокуса» операции растяжения/сжатия (центра несимметричного эллипса), ρ - расстояние до точки X .

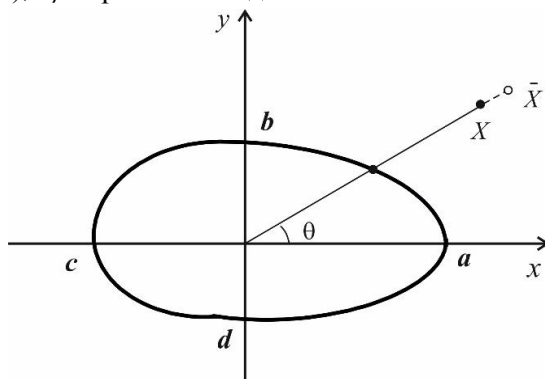


Рисунок 1. Шаблон операции растяжения/сжатия.

Концептуальная основа предлагаемого метода восстановления функциональной зависимости по малому числу наблюдений заключается в следующей идее. Предлагается исходную, известную нам, зависимость подвергнуть суперпозиции предложенных нелинейных преобразований до тех пор, пока не выполняются условия прохождения новой деформированной зависимости, по крайней мере, через небольшое количество новых наблюдений с заданной точностью.

В данной работе использовалась следующая суперпозиция области определения функциональной зависимости

$$\Phi_{\Sigma}(X) = \Phi_1(\Phi_2(\Phi_3(\Phi_4(X)))) \quad (7)$$

а задача восстановления функциональной зависимости по малому числу наблюдений рассматривалась как задача условной оптимизации.

Множество данных наблюдений, полученных в результате тестирования восстанавливаемой зависимости, представим матрицей

$$F = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & f_1 \\ x_2 & y_2 & f_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_N & y_N & f_N \end{pmatrix} \quad (8)$$

Результатирующее преобразование $\Phi_{\Sigma}(X)$, как нетрудно видеть, зависит от 8 параметров:

$p = (\Delta f, \Delta x, \Delta y, a, b, c, d, \alpha)^T$, изменяя которые, мы «подгоняем» исходную зависимость под формируемую, тогда задачу восстановления функциональной зависимости можно представить как задачу условной оптимизации

$$\min_p \left| p - (0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0)^T \right|, \quad (9)$$

$$\left| \varphi(\Phi_{\Sigma}(X_k)) - f_k \right| - \delta \leq 0, \quad k = \overline{1, N}.$$

В данной постановке задачи восстановления функции используются предположения 1 и 2. Действительно, поскольку восстанавливаемая зависимость в линейной метрике (1) находится «недалеко» от исходной, то представляется вполне возможным приблизиться к искомой зависимости за счет нелинейных преобразований системы координат. Во всяком случае, это должно происходить в окрестностях дополнительных данных (8).

3. Модель испытательного стенда

Для исследования предложенного метода восстановления характеристики гидротурбины по малому числу наблюдений была разработана модель искажения исходной характеристики, эмитирующая старение гидроагрегата, которое приводит к снижению уровня к.п.д. гидротурбины. В качестве исходной характеристики была выбрана эксплуатационная характеристика гидроагрегата ПЛ-586-ВБ-930 Волжской ГЭС, построенная с помощью оптимального кубического Эрмитого сплайна [8]. С учетом предположений 1-2 оценка качества восстановления искаженной зависимости $\eta_T(N, H)$ производилась в рабочей области характеристики, фактически в окрестностях точек (8) испытаний гидроагрегата F . В качестве критерия близости, восстановленной и искаженной характеристик, будем использовать среднеквадратическое отклонение

$$CKO_{Vos} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (\eta_k^{Is} - \eta_k^{Vos})^2} \quad (10)$$

одной характеристики от другой, вычисленное в рабочей области функции.

Меру искажения исходной характеристики можно оценить с помощью аналогичного показателя

$$CKO_{Is} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (\eta_T(X_k) - \eta_k^{Is})^2}. \quad (11)$$

Модель испытательного стенда для проверки предлагаемого метода восстановления эксплуатационной характеристики гидроагрегата представлена на рисунке 2.

Согласно структурно-функциональной схеме первоначально вводятся: исходная характеристика, а также уровень отклонения искаженной характеристики от исходной $\Delta\eta$ и диапазон изменения угла поворота искаженной характеристики $\pm \Delta\alpha$ (блок 1 рисунка 2). В блоке 2 случайно разыгрывается угол поворота исходной характеристики.

Основное искажение исходной характеристики происходит в блоках 3 и 4 за счет инкрементирования уровня к.п.д. на величину $\Delta\eta$ и поворота большой оси характеристики на угол α_i . Причем, как показали эксперименты, 75-80% искажений приходится на $\Delta\eta$, а 15-20% искажений формируется за счет её поворота.

В блоке 5 предварительно искаженная характеристика обрабатывается с помощью радиально-базисной нейронной сетью. В данном случае аппроксимация функции по дискретному ограниченному множеству точек вносит нелинейные искажения в обрабатываемый объект. И, наконец, процесс деформации исходной характеристики завершается аппроксимацией искаженной функции с помощью оптимального Эрмитого кубического сплайна [8]. Последняя операция также вносит незначительные нелинейные искажения в образ формируемой характеристики, но необходима для повышения

быстродействия испытательного стенда, поскольку быстродействие кубического сплайна в 67 раз выше, чем у модели нейронной сети [8].

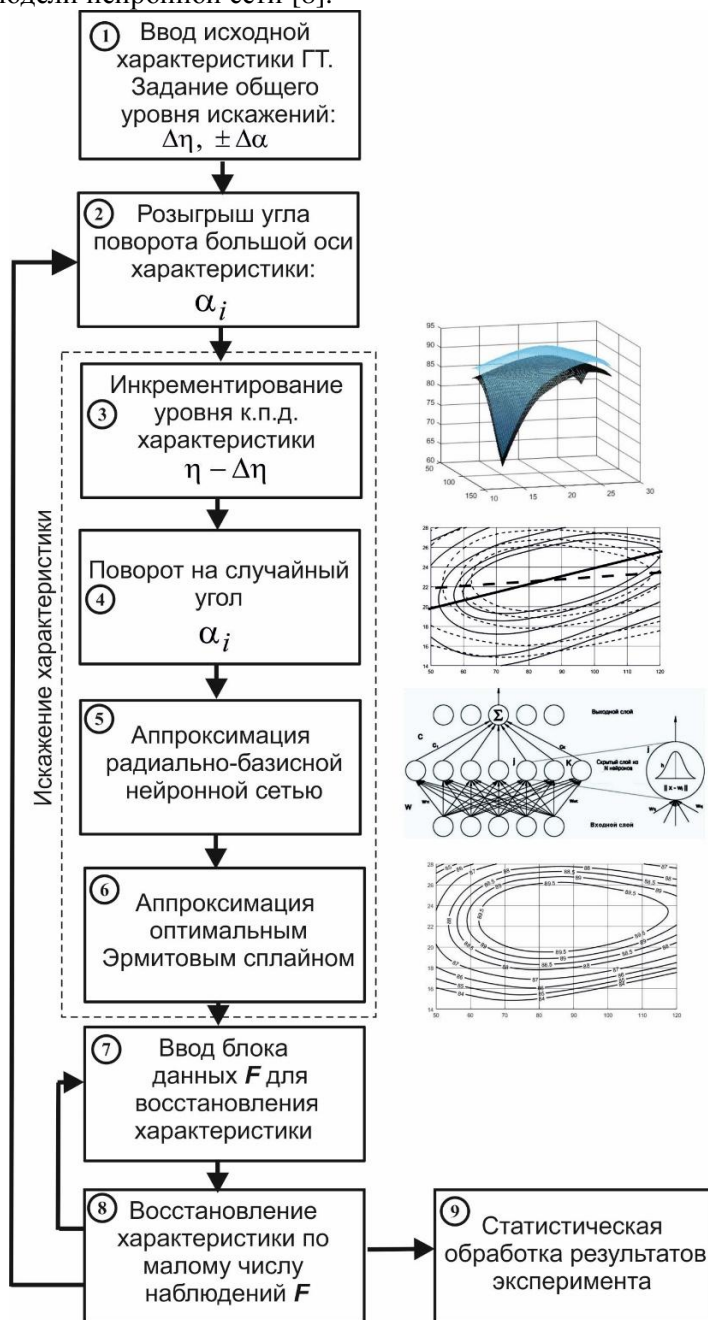


Рисунок 2. Структурно-функциональная схема виртуального испытательного стенда.

Сформировав искаженную эксплуатационную характеристику турбины $\eta_T^{Is}(N, H)$ гидроагрегата, мы можем приступить к исследованию эффективности предложенного метода восстановления характеристики по малому числу наблюдений. В данном случае искаженная характеристика служит своеобразным образцом, на который ориентируется восстанавливаемая зависимость. В блоке 7 вводится дополнительная информация (в реальных условиях за счет натуральных испытаний гидроагрегата) порциями с нарастающим итогом по 7, 12, 16, 22, 28 и 33 точек.

На действующей ГЭС не так просто произвести тестовые испытания. Для этого необходимо установить дорогостоящее оборудование, кроме того, напор H зависит от уровня наполнения

водохранилища и не может изменяться в произвольных пределах. Обычно данные группируются в кластеры с одинаковыми напорами. Поэтому первый набор данных состоял из 7 точек при $N=23$.

Восстановление искаженной характеристики реализуется в блоке 8 за счет решения задачи условной оптимизации (9) с использованием метода суперпозиции преобразований (7).

Цикл блок 7 - блок 8 позволяет исследовать зависимость погрешности восстановления искаженной характеристики от количества дополнительных данных (тестовых испытаний).

Цикл блок 2 - блок 8 позволяет оценить эффективность предлагаемого метода на разнообразных вариантах искажения исходной эксплуатационной характеристики в пределах выбранной модели старения гидроагрегата.

В блоке 9 производится статистическая обработка результатов исследования предложенного метода восстановления функциональных зависимостей по неполному набору данных.

4. Вычислительные эксперименты

Исследование предложенного метода восстановления функциональных зависимостей производилось с использованием описанного выше испытательного стенда. Было проведено 4 эксперимента с заданными уровнями уменьшений к.п.д гидротурбины на 1%, 1,5%, 2% и 2,5%, что в рабочей области эксплуатационной характеристики соответствовало среднеквадратическим уровням искажения CKO_{Is} на 1,04; 1,52; 2,03 и 2,51 процентов. Угол поворота большой оси характеристики варьировался в пределах $\pm 3^\circ$. Предполагалось, что результаты натуральных экспериментов в матрице наблюдений F оценены с точностью $\delta = 0,15\%$. На рисунке 3 представлены результаты исследования метода восстановления искаженной характеристики гидротурбины по малому объему наблюдений при различных уровнях искажений исходной характеристики.

Как видно из рисунка, для всех четырех случаев среднеквадратическое отклонение восстановленной характеристики от искаженной CKO_{Vos} находится в пределах 0,3 – 0,4 процента, практически независимо от количества дополнительных точек наблюдений, что говорит о высокой эффективности предлагаемого метода восстановления эксплуатационной характеристики гидроагрегата ГЭС. На рисунке 3 для наглядности приведены верхние (max) и нижние (min) CKO_{Vos} , достигнутые в результате тестовых испытаний. Как видно из рисунка даже наихудшее восстановление характеристики незначительно отличается от среднестатистического случая.

Как видно из рисунка, для всех четырех случаев среднеквадратическое отклонение восстановленной характеристики от искаженной CKO_{Vos} находится в пределах 0,3 – 0,4 процента, практически независимо от количества дополнительных точек наблюдений, что говорит о высокой эффективности предлагаемого метода восстановления эксплуатационной характеристики гидроагрегата ГЭС. На рисунке 3 для наглядности приведены верхние (max) и нижние (min) CKO_{Vos} , достигнутые в результате тестовых испытаний. Как видно из рисунка даже наихудшее восстановление характеристики незначительно отличается от среднестатистического случая.

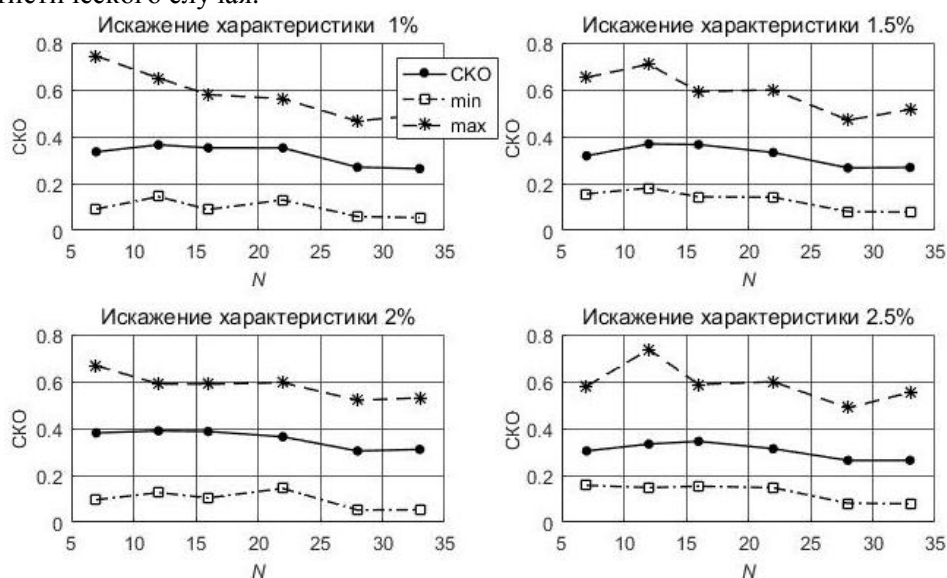


Рисунок 3. Оценки погрешностей восстановления искаженных характеристик к.п.д. гидротурбины для различных уровней искажений исходной характеристики.

На рисунке 4, для примера, представлены исходная и искаженная характеристики, полученные на испытательном стенде при уровне уменьшения к.п.д. $\Delta \eta = 1,5\%$ и $\alpha = -1^\circ$. В рабочей области характеристики среднее квадратическое отклонение CKO_{I_s} исходной характеристики от искаженной составило 1,46%.

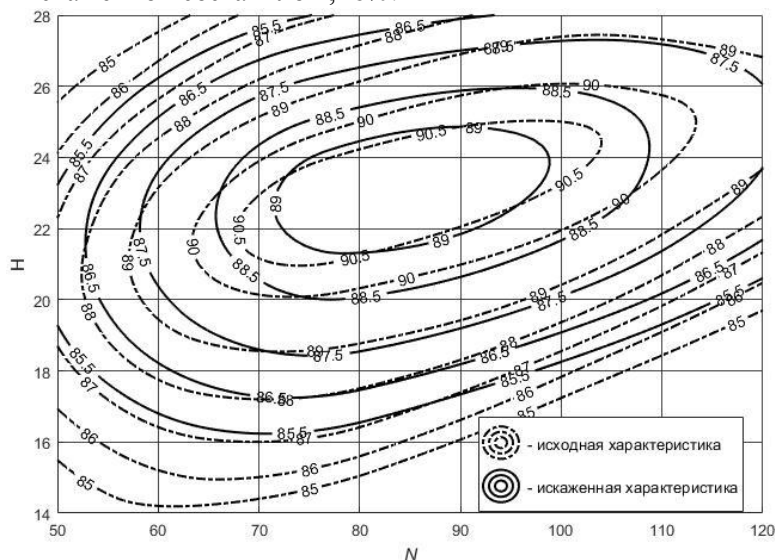


Рисунок 4. Исходная и искаженная эксплуатационные характеристики гидротурбины, сгенерированные на испытательном стенде.

На рисунке 5 приводятся результаты восстановления характеристики гидротурбины по 16 точкам. Как видно из рисунка, отмечается неплохое согласие построенного приближения по малому числу наблюдений с целевой искаженной характеристикой. Во всяком случае, $CKO_{V_{os}} = 0,3\%$.

Если добавить ещё 12 точек, то результаты восстановления становятся лучше. На рисунке 6 показаны искаженная и восстановленная характеристика, построенные по 28 реперным точкам. Среднее квадратическое отклонение в рабочей области характеристики для данного случая составило $CKO_{V_{os}} = 0,19\%$.

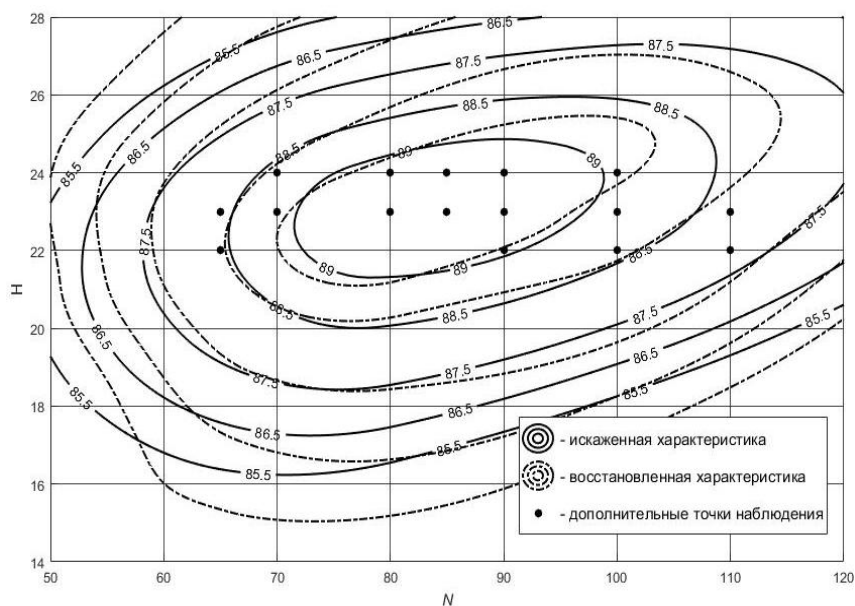


Рисунок 5. Восстановление искаженной характеристики гидротурбины по 16 точкам.

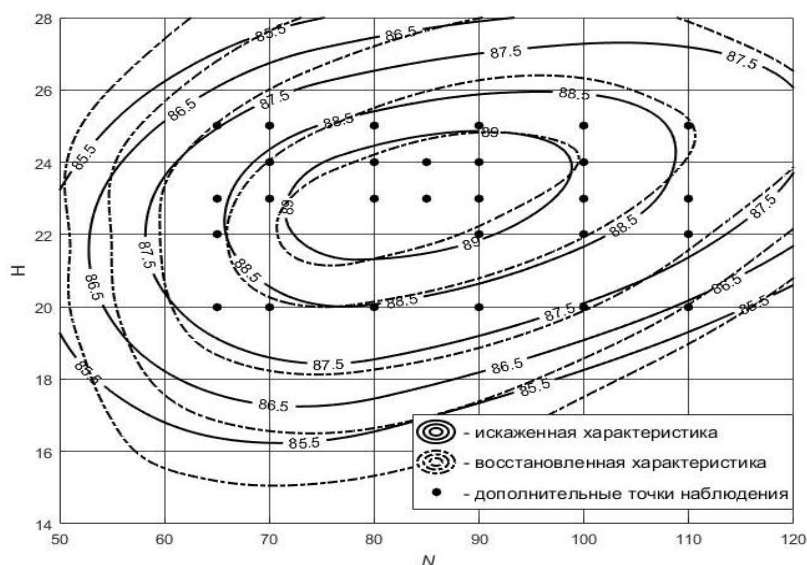


Рисунок 6. Восстановление искаженной характеристики гидротурбины по 18 точкам.

5. Заключение

В представленной работе предложен новый метод восстановления эксплуатационных характеристик гидротурбины по малому числу наблюдений. Сложность рассматриваемой задачи заключается в отсутствии необходимого объема информации для корректного приближения эксплуатационной характеристики гидроагрегата с помощью традиционных методов аппроксимации функций. Для решения поставленной задачи по малому объему наблюдений требуется дополнительная информация. В качестве таковой предлагается использовать модель исходной эксплуатационной характеристики, построенной в заводских условиях в соответствии с отраслевыми стандартами. В предположении, что «состарившаяся» характеристика не сильно отличается от исходной, предлагается методом нелинейных искажений (растяжений/сжатий) области независимых переменных исходной характеристики добиться удовлетворительного прохождения новой аппроксимации через точки тестовых испытаний.

Исследование предлагаемого метода с помощью виртуального испытательного стенда показали принципиальную возможность использования метода нелинейных преобразований аппроксимируемой зависимости для решения задачи восстановления эксплуатационной характеристики гидроагрегата по малому числу наблюдений. Дальнейшее усовершенствование данного метода планируется за счет введения новых нелинейных преобразований и совершенствования модели старения турбины гидроагрегата.

6. Благодарности

Работа выполнена при государственной поддержке Министерства образования и науки РФ, а также гранта РФФИ №16-41-630637.

7. Литература

- [1] Li, F.-F. An Effective Approach to Long-Term Optimal Operation of Large-Scale Reservoir Systems: Case Study of the Three Gorges System / F.F. Li, J.H. Wei, X.D. Fu, X.Y. Wan // *Water Resources Management*. – 2012. – Vol. 26(14). – P. 4073-4090.
- [2] РусГидро «Организация автоматической регистрации технологических показателей режима работы гидроагрегатов, ОУ-8-2014, 2014.
- [3] Zakharchenko, V.E. Modeling of operating HPP units' state rational control system // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1111(1).
- [4] Zakharchenko, V.E. The model of joint control system for HPP featuring the function of active power distribution in proportional equality of control ranges // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1111(1).

- [5] Захарченко, В.Е. Особенности реализации системы рационального управления составом агрегатов гидроэлектростанций и перспективы ее развития // Вестник МЭИ. – 2019. – № 1. – С. 98-107.
- [6] Фурсов, В.А. Идентификация систем по малому числу наблюдений – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2007. – 80 с.
- [7] Маслов, В.Г. Теория и методы начальных этапов проектирования авиационных ГТД / В.Г. Маслов, В.С. Кузьмичев, А.Н. Коварцев, В.А. Григорьев – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 1996. – 147 с.
- [8] Коварцев, А.Н. Представление в ЭВМ эксплуатационных характеристик гидротурбины с помощью оптимальных сплайнов / А.Н. Коварцев, А.А. Назарова // V междунар. конф. и молодеж. шк. «Информ. технологии и нанотехнологий» (ИТНТ): сборник трудов – Самара, 2019.

Restoration of hydraulic turbine performance characteristics on a small number of observation

A.N. Kovartsev¹, A.A. Nazarova¹, V.E. Zakharchenko²

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Sensors.Modules.Systems, Galactionovskaya str. 7, Samara, Russia, 443020

Abstract. The performance characteristic of hydrounits is used very often in various control systems on hydro power plant for velocity control, power distribution, for displaying at different levels of automation pyramid: technicians, technologists, management and so on. As the costs of hydroelectric setups are high, in recent years, investments are more often associated with the refurbishment, modernization and efficiency enhancement of the existing hydroelectric power plants. Before putting a new or refurbished hydro unit into industrial exploitation, it is subjected to a set of tests meant to verify that it operates at the designed parameters in conditions of safe exploitation. In this case, the number of tests of hydrounits are very limited. In this connection, the problem of restoration of performance characteristic of hydrounits on a small number of observations arises. This paper describes a method for restoring the characteristics of a hydrounit based on the use of a limited number of experimental data. The results of the study of the properties of the proposed method are given