

УДК 621.224

А. С. ГОЛЬЦОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»***АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПОВОРОТНО-ЛОПАСТНОЙ ГИДРОТУРБИНОЙ**

На большинстве гидроагрегатов с поворотными лопастными турбинами, установленных на ГЭС Украины и России, нет расходомеров воды. Турбины находятся в эксплуатации много лет, их статические и динамические характеристики существенно изменились, но в штатных системах автоматического управления используют заводскую комбинаторную зависимость (КЗ), так как коррекцию заводской КЗ без измерения расхода воды через турбину выполнить нельзя. В адаптивной САУ с минимальным среднеквадратическим отклонением мощности измерять расход воды не нужно. На Волжской ГЭС при выполнении натурных энергетических испытаний были созданы режимы с оптимальной КЗ турбины и с минимальным СКО мощности. Оказалось, что в этих режимах каждая турбина имеет практически одинаковые значения индексного к. п. д., превышающие индексный к. п. д. штатной САУ на 1–3%.

Ключевые слова: поворотная лопастная гидротурбина, адаптивная система управления, комбинаторная зависимость, индексный коэффициент полезного действия.

1. Описание проблемы

Управляют активной мощностью и частотой электрического тока на шинах генератора гидроагрегата (ГА) с поворотной лопастной турбиной (ПЛТ) за счет изменения величины открытия направляющего аппарата (НА) и угла разворота лопастей рабочего колеса (РК) турбины. В штатных системах автоматического управления (САУ) величину открытия НА изменяют с помощью ПИД-регулятора активной мощности. Для синхронизации углов разворота лопастей РК и лопаток НА турбины применяют комбинаторную зависимость (КЗ) – значения углов разворота лопастей РК при разных величинах открытия НА и разных значениях напора, обеспечивающие максимальный индексный к. п. д. ПЛТ в стационарных режимах работы. САУ с оптимальной КЗ обеспечивает «нормальный выход» потока воды из турбины (вдоль продольной оси отводящей трубы).

Заводскую КЗ определяют на специальном гидродинамическом стенде по результатам экспериментальных исследований макета рабочего колеса гидротурбины. Статические и динамические характеристики гидроагрегатов, оснащенных расходомерами воды, улучшают за счет индивидуальной коррекции заводской КЗ при выполнении натурных энергетических испытаний [1], [2].

Но на многих ГА с ПЛТ, установленных на ГЭС Украины и России, нет расходомеров воды через турбину. А существующие расходомеры переменного перепада давления очень быстро выходят из строя из-за засорения напорных трубок. Гидроагрегаты находятся в эксплуатации много лет, поэто-

му их статические и динамические характеристики существенно изменились. Но в штатных САУ этих ГА используют заводские КЗ, так как коррекцию КЗ без определения расхода воды выполнить нельзя. Штатные САУ предназначены для формирования требуемой величины активной мощности из широкого диапазона допустимых значений (от 20 до 120 МВт). Но ГА со штатными САУ применяют и в системах нормированного первичного и вторичного регулирования активной мощности и частоты электрического тока в энергетических сетях. Для этого индивидуальное задание каждому ГА формирует групповой регулятор активной мощности (ГРАМ). Но условия работы ПЛТ, используемой в системе управления с ГРАМ, существенно изменяются: турбина более 95% времени работает в переходных режимах (рис. 1).

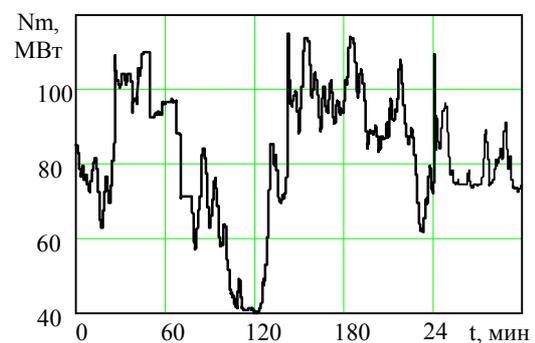


Рис. 1. Требуемые значения активной мощности ГА №8 Волжской ГЭС, сформированные ГРАМ

В таких условиях нагрузка на генератор (см. рис. 1) изменяется автоматически во всем диа-

пазоне (от минимального значения до максимального) и существенно отклоняется от расчетного стационарного значения, для которого были определены КЗ и параметры ПИД-регуляторов штатной САУ. Поэтому статические и динамические характеристики штатной САУ существенно ухудшаются и не соответствуют требованиям стандартов Украины, России и МЭК 60041. Так, например, динамическая погрешность регулирования мощности штатной САУ ГА № 8 Волжской ГЭС с турбиной ПЛ-30/877-В-930 при работе с ГРАМ достигала $10 \div 15$ МВт. Динамическая погрешность регулирования частоты достигала $\pm 1,5$ Гц. Восстановление требуемого уровня частоты ($50 \pm 0,2$ Гц) происходит в течение $15 \div 18$ минут. Поэтому при реализации заданий ГРАМ турбина работает с повышенными динамическими нагрузками, повышенной вибрацией, низким к. п. д. и большой вероятностью возникновения кавитации. В результате существенно уменьшаются период безотказной работы и ресурс турбины.

Статические и динамические характеристики гидроагрегатов с ПЛТ можно улучшить и без измерения расхода воды за счет применения в САУ адаптивных ПИ-регуляторов открытия НА и разворота лопастей РК. В способе адаптивного управления режим течения воды, близкий к режиму «нормальный выход», определяют минимизацией среднеквадратического отклонения (СКО) мощности турбины. Текущие значения параметров ПИ-регуляторов определяют минимизацией функционала обобщенной работы (ФОР) с помощью принципа максимума с использованием нелинейной модели гидроагрегата с ПЛТ в пространстве состояний. В ФОР включают в виде отдельного слагаемого квадрат СКО мощности ПЛТ [3].

В статье выполнен сравнительный анализ показателей эффективности штатной САУ ПЛТ, САУ с оптимальной КЗ (с максимальным индексным к. п. д.) и адаптивной системы управления, обеспечивающей минимальные СКО мощности турбины. В качестве показателей эффективности использовались значения индексного к. п. д., СКО мощности турбины, биения вала турбины и вибрационных перемещений корпуса генераторного подшипника и диска подпятника.

2. Статические характеристики ПЛТ

При определении статических характеристик были использованы результаты натурных энергетических испытаний ГА №№ 3, 5, 8, 9 и 16 Волжской ГЭС, оснащенных напорными трубками для подключения датчика перепада давления в расходомерном створе спиральной камеры ПЛТ. Испытания каждого ГА выполнены при трех напорах. При каж-

дом напоре с помощью ручного управления были созданы пропеллерные режимы работы ПЛТ с разными фиксированными углами разворота лопастей РК турбины. Каждый пропеллерный режим формировали варьированием величины открытия направляющего аппарата ПЛТ.

Статические характеристики ПЛТ были определены методом регрессионного анализа. Каждая точка каждой статической характеристики получена усреднением $150 \div 300$ мгновенных значений переменных, измеренных штатными датчиками ГА в стационарных режимах с шагом 1 с. Идентификация параметров уравнений линий регрессий выполнена методом наименьших квадратов (МНК).

Для каждой турбины, работающей с заводской (штатной) КЗ, с оптимальной КЗ и в режимах с минимальными СКО мощности, были определены (при 3-х напорах) следующие статические характеристики:

- зависимость мощности турбины от величины открытия НА и угла разворота лопастей РК;
- зависимость индексного расхода воды через турбину от величины открытия НА и угла разворота лопастей РК;
- зависимость СКО мощности от мощности турбины и угла разворота лопастей РК;
- зависимость вибрационных перемещений корпуса генераторного подшипника и диска подпятника от мощности турбины и угла разворота лопастей РК;
- зависимость биения вала турбины от мощности турбины и угла разворота лопастей РК.

На рисунках 2÷7 приведены графики пропеллерных и рабочих статических характеристик ГА № 8, полученные при напоре 23,7 м. Точками на этих графиках изображены экспериментальные данные.

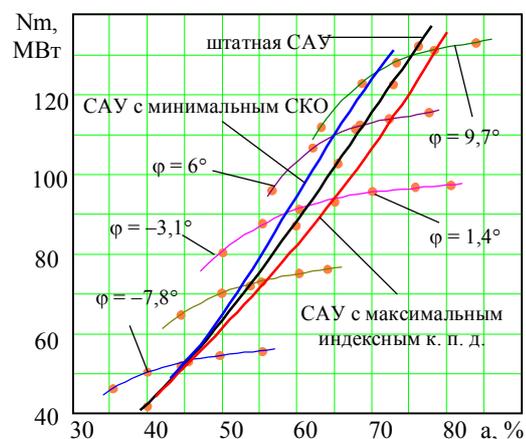


Рис. 2. Графики зависимостей мощности турбины ГА №8 от величины открытия НА

С помощью корреляционного анализа было установлено, что вибрационные перемещения диска подпятника и расход воды через турбину связаны линейными корреляционными зависимостями с мощностью, затраченной на привод генератора, (с коэффициентом корреляции $0,9 \pm 0,95$).

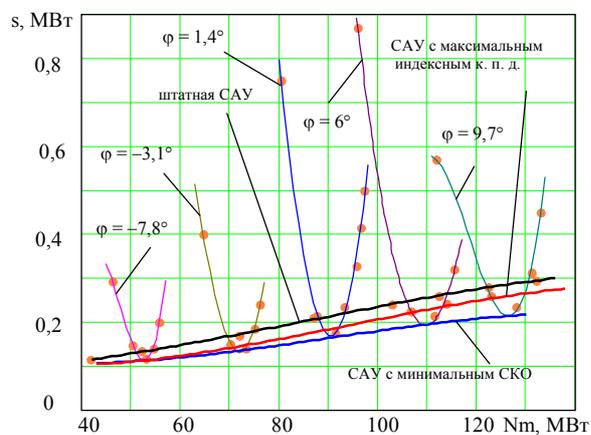


Рис. 3. Графики зависимостей СКО мощности от мощности турбины

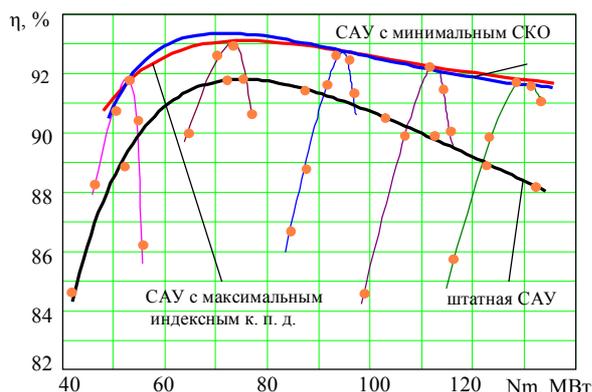


Рис. 4. Графики зависимостей индексного к. п. д. от величины мощности турбины

На рис. 8 приведены графики зависимости мощности турбины ГА № 8 от индексного расхода воды.

Аналогичные результаты были получены и для других гидроагрегатов с поворотными лопастными турбинами Волжской ГЭС, прошедших натурные энергетические испытания.

Выводы

Из сравнительного анализа статических характеристик ПЛТ, полученных при работе с заводской КЗ, с оптимальной КЗ (с максимальным индексным к. п. д.) и в режимах с минимальным СКО мощности, следует:

1. В пропеллерных режимах СКО мощности турбины, индексный к. п. д., биение вала и вибра-

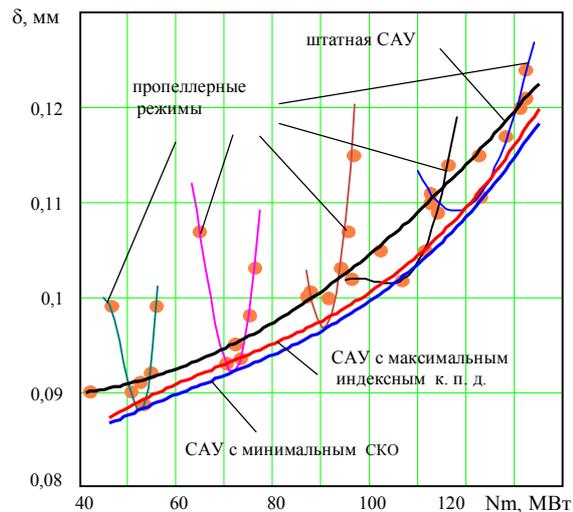


Рис. 5. Графики зависимостей биения вала от мощности турбины

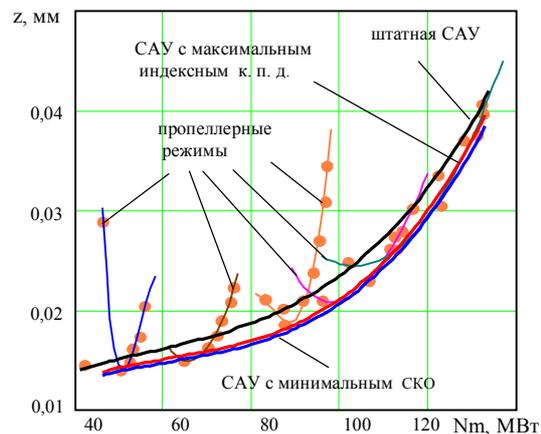


Рис. 6. Графики зависимостей вибрационных перемещений корпуса генераторного подшипника от мощности турбины

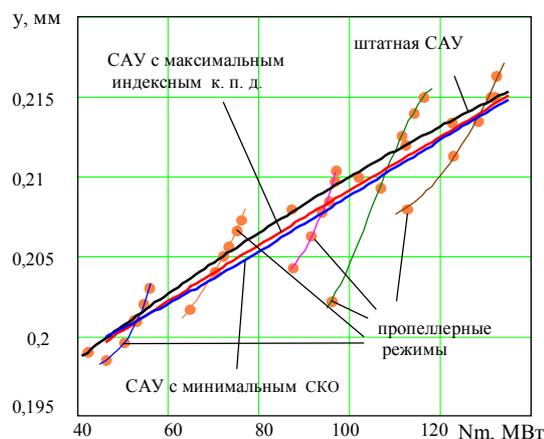


Рис. 7. Графики зависимостей вибрационных перемещений диска подпятника от мощности турбины

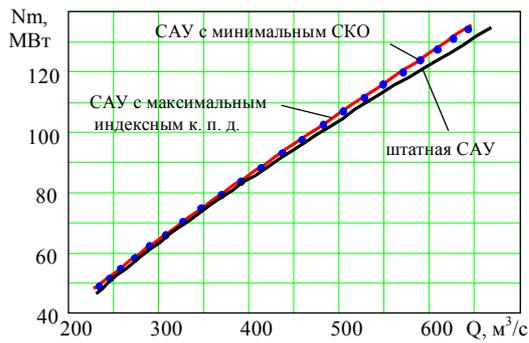


Рис. 8. Графики зависимостей мощности турбины от индексного расхода воды

ционные перемещения корпуса генераторного подшипника принимают оптимальные значения при одних и тех же значениях угла разворота лопастей РК, величины открытия НА и мощности турбины (см. рис. 3÷6).

2. В режимах с минимальным СКО мощности и с максимальным индексным к. п. д. все турбины имеют одинаковые (с точностью до погрешностей вычислений) расход воды (см. рис. 8), индексный к. п. д. (см. рис. 4) и другие статические характеристики (см. рис. 5, 6).

3. Индексный к. п. д. ПЛТ в режимах с минимальным СКО мощности увеличивается на 1,4÷3% по сравнению с индексным к. п. д. этих же турбин, управляемых штатной САУ (см. рис. 4).

4. В режимах с минимальным СКО турбина имеет мощность, равную мощности в штатных режимах работы, при расходах воды меньших на 4÷10% (см. рис. 8).

5. Основные характеристики турбины в режимах с минимальным СКО мощности изменились по сравнению со штатными режимами следующим образом: СКО мощности турбины уменьшилось на 15÷25% (см. рис. 4); биение вала (см. рис. 5) уменьшилось на 3÷6%; вибрационные перемещения корпуса генераторного подшипника уменьшились на 6÷12% (см. рис. 6); вибрация диска подпятника уменьшилась незначительно (на 0,3÷0,8%, см. рис. 7).

Таким образом, за счет реализации алгоритмов адаптивного управления [3] можно существенно улучшить показатели эффективности САУ активной мощности и частоты генерируемого электрического

тока ГА с ПЛТ. При этом с точностью до погрешностей вычислений (обусловленных погрешностями измерений) адаптивная САУ с минимальными СКО мощности турбины и САУ с оптимальной КЗ имеют одинаковые статические характеристики.

Это можно объяснить тем, что при изменении величины открытия НА (при каждом фиксированном угле разворота лопастей) скорость потока воды на выходе из РК будет изменяться и по величине, и по направлению (из-за вращения РК). Турбулентный поток воды, ударяясь о стенки отсасывающей трубы, будет создавать вибрацию отсасывающей трубы и других деталей ГА. Отраженная от стенок струя воды, перемещаясь с завихрениями, уменьшает реальное проходное сечение отсасывающей трубы, уменьшает расход воды через турбину при той же величине открытия НА и увеличивает турбулентные пульсации давления и расхода воды. В свою очередь, при увеличении турбулентных пульсаций давления и расхода воды будут увеличиваться вибрация и амплитуда колебаний мощности турбины. Поэтому СКО мощности и уровни вибрации будут принимать минимальные значения при направлении потока воды на выходе из РК вдоль осевой линии отводящей трубы.

Литература

1. Линник, А. В. Современный уровень и основные направления развития гидротурбостроения в Украине [Текст] / А. В. Линник, В. Д. Хаитов // Проблемы машиностроения. – 2010. – Т. 13, № 1. – С. 11 – 18.
2. Проведение натурных энергетических испытаний гидроагрегатов Волжской ГЭС [Текст] : техн. отчет. – М. : ОАО НИИЭС, 2013. – 31 с.
3. Пат. 2531068 Российская Федерация, МПК F03B 15/16. Способ адаптивного управления активной мощностью и частотой гидроагрегата с поворотно-лопастной турбиной [Электронный ресурс] / А. С. Гольцов, С. А. Гольцов ; заявитель и патентообладатель А. С. Гольцов, С. А. Гольцов. – № 2013108645/06 ; заявл. 26.02.2013 ; опубл. 20.10.2014, Бюл. № 9 (116). – 4 с. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=3497&DocNumber=2531068&TypeFile=html. – 2.06.2015.

Поступила в редакцию 2.06.2015, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Д. Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПОВОРОТНО-ЛОПАТНОЮ ГІДРОТУРБИНОЮ

А. С. Гольцов

На більшості гідроагрегатів з поворотно-лопатними гідротурбінами, встановленими на ГЕС України та Росії, немає витратомірів води. Турбіни знаходяться у експлуатації довгі роки, їх статичні та динамічні характеристики значно змінилися, але у штатних системах автоматичного керування застосовують заводську комбінаторну залежність (КЗ), тому що корекція заводської КЗ без вимірювання витрат води через турбіну виконати нема як. У адаптивній системі автоматичного керування з мінімальним середньоквадратичним відхиленням потужності вимірювати витрати води не потрібно. На Волзький ГЕС при виконанні натурних енергетичних випробувань були створені режими з оптимальною КЗ турбіни та з мінімальним середньоквадратичним відхиленням потужності. Виявилось, що на цих режимах кожна турбіна має практично рівні значення індексного коефіцієнту корисної дії, що перевищують індексний коефіцієнт корисної дії штатної системи керування на 1÷3%.

Ключові слова: поворотно-лопатова гідротурбіна, адаптивна система управління, комбінаторна залежність, індексний коефіцієнт корисної дії.

ANALYSIS OF THE POWER CONTROL ALGORITHM AND METHOD OF COMBINATORIAL DEPENDENCE OF KAPLAN TURBINE

A. S. Goltsov

On most hydraulic units with Kaplan turbines installed in hydropower in Ukraine and Russia, there is no water meter. The turbines have been in operation for many years, their static and dynamic characteristics have changed significantly, but regular automatic control systems use the original combinatorial correction (CP) as a factory combinatorial correction without measuring the flow of water through the turbine cannot be performed. In the adaptive automatic control system with minimum standard deviation of power to measure power consumption of water is not necessary. On the Volga Hydroelectric Power Station in the performance of actual power tests were created with the best combinatorial correction mode of the turbine and the minimum standard deviation of power. It was found that in these modes, each turbine is virtually identical to the value of the index. N. G., greater than the index factor of efficiency of factory combinatorial correction standard on 1 ÷ 3%.

Keywords: kaplan turbines, adaptive control system, combinatorial correction, index efficiency.

Гольцов Анатолий Сергеевич – д-р техн. наук, доц., доц. каф. систем управління летательними апаратами, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: Goltsov43@gmail.com.