

## РАЗРАБОТКА И ОТЛАДКА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА НА ПЭВМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРОТУРБОАГРЕГАТАХ ПОСЛЕ СБРОСА НАГРУЗКИ

Надежность работы турбинных гидроагрегатов в значительной степени зависит от уровня совершенства режимов регулирования, в частности, при аварийных переходных процессах (ПП) после сброса нагрузки (СН) с последующим закрытием лопаток направляющего аппарата. При этом время действия регулирующего органа гидротурбины  $T_3$  определяется, с одной стороны, безопасными давлением и разрежением в проточной части, а с другой — максимально возможной частотой вращения ротора гидроагрегата при разгоне. Расчет оптимального значения  $T_3$  является нелинейной задачей и целью расчета гидромеханических ПП.

Анализ технической литературы показал, что наиболее достоверными являются расчетные методики, разработанные в МИСИ им. В. В. Куйбышева под руководством профессора Г.И. Кривченко и в ЛПИ им. Калинина под руководством профессора Е.В. Гутовского.

Методики используют полные статические характеристики (ПСХ), охватывающие все режимы работы, возможные при эксплуатации гидроагрегатов с сохранением знака напора.

Методика расчета Е.В.Гутовского была базой при разработке компьютерной программы, что являлось основной целью настоящей работы.

В задачи исследования входили следующие:

- освоение методики ЛПИ и расчеты по ней ПП после СН для нескольких вариантов режима работы САР;
- создание компьютерной программы для расчета ПП и ее отладка, основанная на сопоставлении результатов, полученных ручным и машинным расчетом;
- сопоставление результатов расчетов с результатами испытаний ПП после СН, проведенными на натурном турбинном гидроагрегате сотрудниками ПО ЛМЗ.

Для расчета ПП после СН необходимо совместно решить систему уравнений движения регулирующего органа, неустановившегося движения жидкости и движения ротора гидроагрегата. Строгое решение системы представляет собой трудную задачу, так как связи между величинами, входящими в уравнения, не поддаются аналитическому выражению. Однако ПП можно рассматривать как совокупность квазистатических состояний, что позволяет независимо решать уравнение неустановившегося движения, вводя в последующие приближения поправки. Для решения применяется способ замены дифференциальных уравнений уравнениями в конечных разностях. Кроме того, в расчетах используется общепринятый метод приведения неустановившегося движения в реальной проточной части к так называемому эквивалентному трубопроводу постоянного сечения с одномерным потоком в нем.

Для расширения возможностей применения методики в работе рассматривался упругий гидравлический удар. Расчет проводится по ПСХ методом последовательных приближений с получением линии действительного ПП.

Объектом исследования был выбран гидроагрегат Красноярской ГЭС с турбиной РО115/697-В-750, спроектированной и изготовленной на ПО ЛМЗ. На основе предоставленной заводом информации были подготовлены исходные данные для расчетов, в том числе ПСХ, полученные на основе универсальной характеристики и ее экстраполяции.

По результатам расчетов вручную ПП после СН, для программного закрытия НА (вариант «а») и случая выхода в разгон при отказе САР (вариант «б») были построены графики изменения параметров от времени, впоследствии используемые для отладки программы.

Для численного определения величины открытия НА  $a_0$  по заданному закону для соответствующих моментов времени, а также для определения точек пересечения промежуточных линий постоянных открытий и частот вращения на ПСХ в программе использовалось сплайн-интерполирование, т.е. способ приближения таблично заданных функций с помощью составных функций, звеньями которых служат многочлены небольших степеней, допускающие гладкую стыковку.

Сопоставление результатов программных расчетов и расчетов вручную показало:

1) Максимальное расхождение относительного повышения давления  $\delta\zeta$ , полученного ручным и автоматизированным счетом составляет 7 % для варианта «а» и 15 % для варианта «б». Основная причина расхождений заключается в погрешностях графического способа определения  $\zeta$  при ручном счете относительно аналитического способа, используемого в программе.

2) Максимальное расхождение относительного повышения частоты вращения ротора  $\delta\beta$ , полученного ручным и автоматизированным счетом составляет 9 % для варианта «а» и не более 0,1% для варианта «б». Такой уровень расхождений является приемлемым и объясняется разницей в подходах между графической интерполяцией при ручном расчете и сплайн-интерполяцией используемой в программе при определении координат расчетных точек по ПСХ. Это подтверждается ещё и тем, что в варианте «б», где интерполяция идет фактически только по частоте вращения, а открытие НА постоянно, величина расхождения минимальна.

3) Максимальное расхождение величины относительного расхода  $\delta q_{ст}$  составляет 4,5% для варианта «а» и не более 0,6% для варианта «б».

4) Поскольку давление в спиральной камере и разрежение в отсасывающей трубе определяются в основном безразмерным повышением давления  $\zeta$ , то величина расхождения указанных величин для ручного и машинного расчета и причины ее возникновения аналогичны вышеизложенным для  $\zeta$ .

Следует отметить, что программа хорошо зарекомендовала себя при расчете ПП при отказе САР. Впоследствии, с экспериментальными данными сопоставлялись результаты автоматизированного расчета. Благодаря высокой скорости расчета на ПЭВМ была проведена серия программных расчетов, отличающихся исходной характеристикой. При этом ПСХ уточнялась с учетом экспериментальной разгонной характеристики. Графическое сопоставление результатов расчета по уточненной ПСХ на ПЭВМ с экспериментальными данными показало:

1) Максимальное расхождение относительного повышения частоты вращения ротора  $\delta\beta$ , полученного автоматизированным расчетом с экспериментальными данными составляет более 20 %. Однако характер расчетной и экспериментальной зависимости одинаков. Такое расхождение может быть объяснено рядом обстоятельств:

- неточностью приближенной ПСХ;
- тем, что методика ЛПИ изначально разрабатывалась для ПЛ турбин;
- неполнотой экспериментальных данных.

2) Максимальное расхождение величины давления в спиральной камере  $\delta N_{ск}$ , полученного ручным и автоматизированным счетом составляет 5,5 %.

Анализ результатов программного расчета по уточненной ПСХ ПП при отказе САР показывает достаточную сходимость значения времени выхода в разгон (менее 25 с) и величины разгонного относительного повышения частоты вращения ротора  $\beta_{разг} = 0,75$  с экспериментальным значением. Вышеизложенное позволяет рекомендовать данную программу для проведения расчетов переходных процессов в научных и учебных целях.