



ГРУБОЙ А.П., гл. конструктор,
ДЬЯКОВ В.И., канд. техн. наук,
КУБАНОВ В.Г., зам. гл. конструктора
САЛТОВСКАЯ Д.А., инж.-программист,
 ГП завод "Электротяжмаш", г. Харьков.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ

Процесс автоматизации проектно-конструкторских работ на предприятии "Электротяжмаш" в своем развитии прошел несколько стадий. Первоначально были автоматизированы задачи, имеющие расчетный характер – были созданы программы вентиляционного, электромагнитного и механического расчетов гидрогенераторов. В то время мощность ЭВМ не позволяла автоматизировать более сложные задачи.

Появление персональных компьютеров с большой памятью и быстродействием вывело автоматизацию проектирования электрических машин на новый уровень. В настоящее время конструкторская документация разрабатывается с применением системы "Компас", позволяющей создавать трехмерные модели деталей и сборочных узлов и связанные с ними двухмерные чертежи.

В последнее время на предприятии приступили к созданию автоматизированной системы проектирования подпятника – одного из сложных и ответственных узлов вертикального гидрогенератора. Была проработана общая концепция проекта и определена структура его отдельных подсистем. Автоматизированная система проектирования подпятника должна состоять из трех частей – расчетной, графической и экспертной.

В расчетной подсистеме вычисляются все необходимые параметры деталей, графическая подсистема формирует трехмерные модели и чертежи. Экспертная подсистема будет содержать всю необходимую конструктору информацию, весь опыт, накопленный по проектированию и работе подпятника не только на нашем предприятии, но и заимствованный из книг и статей, международный опыт эксплуатации подпятников, что сэкономит время и усилия конструктора. В нее будет помещен анализ существующих конструктивных решений подпятника, проблемных мест, способов их решения и т. д. Это уменьшит вероятность непрофессиональных решений, связанных с недостаточным производственным опытом проектанта. Кроме того, система будет открыта для пополнения следующими поколениями конструкторов.

На первом этапе был разработан алгоритм расчета для определения размеров и геометрии сегментов подпятника при заданной мощности гидрогенератора (N), частоте вращения (n), полной нагрузке на подпятник (W) и типа гидроагрегата (подвесной или зонтичный). Гидрогенера-

торы зонтичного типа выполняются с частотой вращения ротора до 150 об/мин. При частоте вращения более 250 об/мин используются гидрогенераторы подвесного типа. В диапазоне 150÷250 об/мин выполняются гидрогенераторы обоих типов. Но предпочтение отдается гидрогенераторам зонтичного типа.

При определении внутреннего диаметра сегмента необходимо знать наружный диаметр кольцевого сечения вала и расстояние от вала до сегмента.

Наружный диаметр вала для зонтичного типа исполнения определяем по формуле

$$D_{нв.з} = 78,7 \cdot (N / (n \cdot (1 - \alpha^4) \cdot [\tau]))^{1/3}, \text{ см,}$$

где N – мощность, передаваемая валом, кВт, n – скорость вращения вала, об/мин, $[\tau]$ – допускаемые касательные напряжения; α – отношение внутреннего и наружного диаметров кольцевого сечения вала, $\alpha = 0,6 \div 0,7$.

Для подвесного типа исполнения наружный диаметр вала равен

$$D_{нв.п} = K \cdot D_{нв.з}$$

Коэффициент $K = 0,75 \div 0,85$ учитывает конструктивные особенности вала гидрогенератора подвесного типа.

Внутренний диаметр кольцевого сечения вала равен $d_{вн.в} = \alpha \cdot D_{нв}$. Принимаем нормализованные размеры валов и диаметры соединительных фланцев вала турбины с валом генератора D_{ϕ} по [2, таблица IV.38].

Внутренний диаметр сегментов подпятника гидрогенераторов зонтичного типа должен быть больше наружного диаметра соединительного фланца.

При фланцевом соединении вала гидрогенератора с валом турбины

$$D_{вн.сег.} \approx D_{нв.} + L'$$

При соединении вала гидрогенератора с валом турбины с помощью промежуточной втулки с фланцем внутренний диаметр сегментов подпятника равен

$$D_{вн.сег.} \approx D_{\phi.втулки} + L'$$

Для гидрогенератора подвесного типа внутренний диаметр сегмента равен

$$D_{вн.сег.} = D_{нв.п.} + L',$$



где L' – расстояние от (фланца, вала) до выгородки ванны подпятника ($25 \div 30$ мм) + толщина выгородки ($15 \div 25$ мм) + толщина успокоителя масла ($30 \div 50$ мм) + расстояние от успокоителя масла до внутреннего диаметра зеркала пяты (20 мм) + расстояние на перекрытие зеркала пяты сегментов ($10 \div 15$ мм) + расстояние от рабочей поверхности ЭМП-слоя сегментов до кромки корпуса сегмента (10 мм).

Принимаем среднее удельное давление на сегмент с ЭМП-слоем $P_{уд} = 6$ МПа (60 кгс/см²). Для сегментов с баббитовым покрытием $P_{уд} = 4$ МПа (40 кгс/см²). Необходимая рабочая поверхность сегментов равна $S = W/P_{уд}$. Полная площадь поверхности зеркала пяты S_0 подпятника (без учета вылета зеркала пяты по наружному и внутреннему краям сегментов)

$$S_0 = S/K_s,$$

где $K_s = 0,6 \div 0,75$ – коэффициент, характеризующий величину промежутков между сегментами подпятника.

Наружный диаметр сегментов

$$D_{н.сег} = (D_{вн.сег}^2 + 4 \cdot S/\pi)^{1/2}.$$

Радиальная ширина сегмента

$$B = (D_{н.сег} + D_{вн.сег})/2.$$

Задаемся оптимальным значением соотношения средней длины сегмента (L) к ширине сегмента (B)

$$\alpha_L = L/B = 0,7 \div 0,85$$

и коэффициентом уклона $\beta = 3$.

Средняя длина сегмента в тангенциальном направлении $L = \alpha_L \cdot B$.

Площадь сегмента

$$S_c = B \cdot L.$$

Число сегментов $m = S/S_c$ округляем до ближайшего четного целого значения.

Средний диаметр сегментов

$$D_{ср.сег} = (D_{н.сег} + D_{вн.сег})/2.$$

Длина окружности по среднему диаметру

$$C = \pi \cdot D_{ср.сег}.$$

Длина окружности, занимаемая сегментами по среднему диаметру

$$C_c = L \cdot m.$$

Расстояние между сегментами должно быть не менее 25 % от средней длины сегментов

$$(C - C_c)/m > 0,25.$$

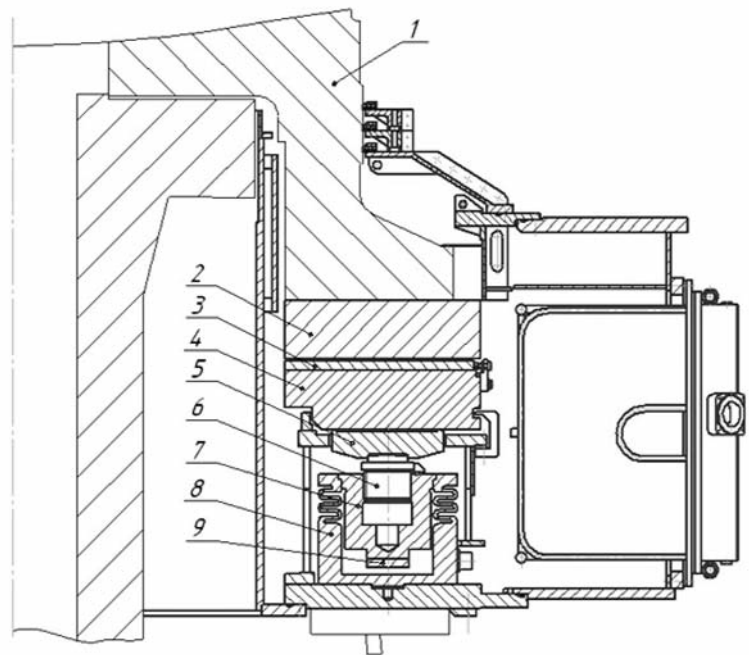


Рис. 1. 1 – ступица; 2 – диск; 3 – верхняя часть сегмента; 4 – основание сегмента; 5 – опорная тарелка; 6 – опорный болт; 7 – тело заполнения; 8 – упругая камера; 9 – накладка

Т. о., определены геометрические размеры сегментов подпятника. Далее выполняется гидродинамический расчет [1]. Определяющими критериями являются толщина масляной пленки, которая должна быть более $0,02$ мм и температура масла на рабочей поверхности сегмента, которая не должна превышать 80°C для сегментов с баббитовым покрытием и 90°C для сегментов с ЭМП-покрытием.

Сегмент – та базовая деталь, исходя из размеров которой проектируются все остальные детали подпятника, включая выбор унифицированных. Зная размеры сегмента и нагрузку на подпятник, можно по разработанным алгоритмам однозначно определить параметры упорного болта, упругой камеры, тарельчатой опоры, на которые опирается сегмент и других деталей, входящих в узел (Рис. 1).

Раньше, при расчете размеров и геометрии сегментов вручную рассматривалось 5–6 вариантов, на которые тратилось несколько недель. Программа просчитывает множество вариантов, отбрасывая неприемлемые и предлагая конструктору выбрать лучший вариант. В программе предусмотрены подсказки, помогающие выбрать оптимальный вариант расчета. С помощью созданной программы на расчет окончательного варианта подпятника и получение чертежа-эскиза со всеми необходимыми для дальнейшей работы размерами уходит $10 \div 15$ минут.

Есть и другая важная сторона использования расчетной программы. При составлении тендерных документов необходимо быстро оценить,

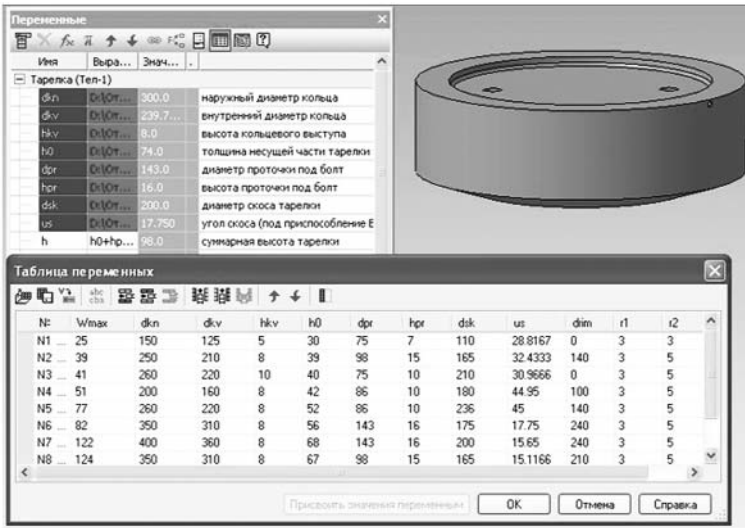


Рис. 2.

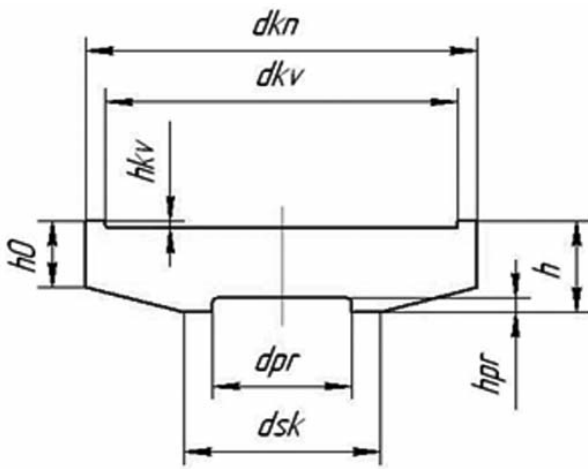


Рис. 3.

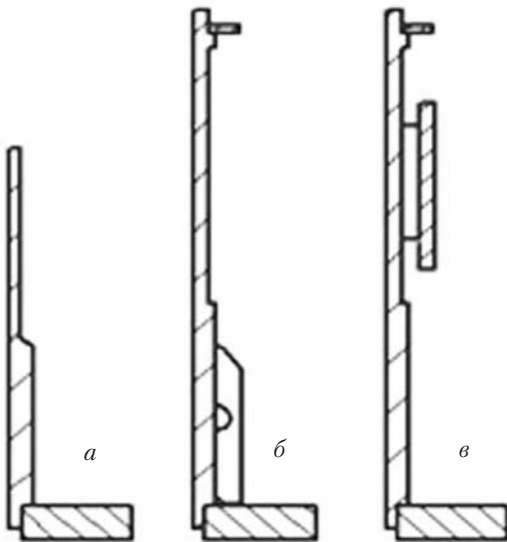


Рис. 4.

можно ли воспользоваться уже имеющимися чертежами подпятников. Программа позволяет это сделать. Поиск генератора-аналога проводится по мощности, частоте вращения и нагрузке на подпятник. Если нагрузка на подпятник неизвестна, ее, с достаточно большой точностью, можно определить по графикам зависимости нагрузки на

подпятник по мощности и частоте гидроагрегата. Для построения графиков использовались данные более, чем четырехсот подпятников. Эта информация важна в тех случаях, когда необходимо в краткие сроки рассчитать потери на подпятнике.

Для дальнейшего развития автоматизированной системы проектирования подпятника было необходимо связать расчетную программу с трехмерными моделями деталей. Система "Компас" предоставляет такую возможность. Наша задача — создать такую систему проектирования, которая могла бы решать весь диапазон задач, с которым сталкивается конструктор:

- проектировать новый подпятник;
- использовать существующие наработки полностью или частично;
- заменять в процессе проектирования одни детали на другие или дорабатывать их.

На примере детали тарельчатой опоры (Рис. 2) видно, что конструктор может либо получить совершенно новую деталь по расчетным размерам, занесенным в ссылки файла либо использовать опору из числа предыдущих гидрогенераторов, заложенную в таблицу переменных.

Рассмотрим еще один аспект автоматизации проектирования подпятника — возможность выбора окончательной конструкции. В гидроагрегатах завода "Электротяжмаш" используются три конструкции внутренних стенок масляных ванн — выгородок (Рис. 4). Вариант (а) находит применение в маломощных машинах, варианты (б) и (в) в машинах средней и большой мощности. Программно рассчитываются размеры деталей всех вариантов. Поскольку окончательный выбор конструкции делает проектировщик, он с помощью визуализации деталей может перейти от одной конструкции выгородки к другой.

Также существует возможность использования уже существующих чертежей деталей выгородки. Они заложены в таблицы переменных соответствующих файлов.

В сборочном файле, как в "Наборе конструктора", собраны детали подпятника: опорные болты со стопорящими деталями, упругие камеры с цилиндрами и соединительными трубами для подпятников на гидравлической опоре, втулка (стакан) для подпятников на жесткой опоре, тарельчатая и промежуточная опоры, сегмент, сегментные упоры и т. д..

С учетом того, что гидрогенераторы могут быть разной мощности, обратимыми/необратимыми, однорядными/двухрядными, количество



Таблица 1.

1-рядные подпятники				2-рядные подпятники	
Необратимые генераторы		Обратимые / Необратимые генераторы		Обратимые / Необратимые генераторы	
Однослойный сегмент, без тарельчатой опоры, подпятник на жесткой опоре	Однослойный сегмент, с тарельчатой опорой, подпятник на жесткой опоре	Двухслойный сегмент, с тарельчатой опорой, подпятник на жесткой опоре	Двухслойный сегмент, с тарельчатой опорой, подпятник на упругой опоре	Двухслойный сегмент, с тарельчатой опорой, подпятник на жесткой опоре	Двухслойный сегмент, с тарельчатой опорой, подпятник на упругой опоре
1 вариант	2 вариант	3, 4 вариант	5, 6 вариант	7, 8 вариант	9, 10 вариант

разнообразных конструкций подпятников можно свести к десяти: шесть вариантов конструкций для необратимых генераторов и четыре варианта для обратимых (Табл. 1). Каждый вариант предполагает свой набор деталей.

Тип генератора (обратимый, необратимый) задает заказчик. Тип подпятника (1–рядный или 2–рядный) определяется из гидродинамического

расчета сегментов. Выбор типа опоры (жесткая или гидравлическая), конструкции подпятника (с промежуточной опорой или без нее, наличие или отсутствие тарельчатой опоры) зависит от величины нагрузки на подпятник и удельной нагрузки на сегмент.

Программа не только рассчитывает основные размеры деталей, но и визуализирует в сборочном

Таблица 2. Сравнение параметров подпятников гидрогенераторов

№	Параметры	$N = 400 \text{ МВт}$, $n = 125 \text{ об/мин}$, $W = 2300 \text{ Тс}$	$N = 630 \text{ МВт}$, $n = 166,7 \text{ об/мин}$, $W = 3280 \text{ Тс}$
1	Количество сегментов, шт	18	18
2	Внутренний диаметр сегмента, мм	2650	2840
3	Наружный диаметр сегмента, мм	3680	4160
4	Центральный угол сегмента, град	14,17	13,83
5	Ширина сегмента, мм	515	660
6	Средняя длина сегмента, мм	391,4	422,4
7	Площадь сегмента, см ²	2016	2788
8	Удельное давление на сегмент, кг/см ²	63	64
9	Линейная скорость пяты на среднем диаметре сегментов, м/с	20,7	30,5
10	Максимальная температура поверхности сегмента, °С	82	83
11	Минимальная толщина масляной пленки, мм	0,0405	0,0536
12	Сегментные потери на трения, кВт	296	686
13	Дисковые потери, кВт	58	276
14	Суммарные потери на трение, кВт	354	962
15	Толщина промежуточной опоры, мм	180	200
16	Наружный диаметр тарельчатой опоры, мм	300	330
17	Толщина тарельчатой опоры, мм	98	110
18	Высота упругой камеры, мм	320	400
19	Наружный диаметр упругой камеры, мм	475	550
20	Высота наружного сегментного упора, мм	150	174
21	Наружный диаметр обечайки, мм	2522	2680
22	Наружный диаметр верхнего диска, мм	3705	4280
23	Наружный диаметр нижнего диска, мм	3800	4280
24	Внутренний диаметр диска зеркала пяты, мм	2630	2820
25	Внутренний диаметр диска зеркала пяты, мм	3700	4180
26	Толщина диска зеркала пяты, мм	140	200



файле те, которые необходимы для конкретного подпятника. Ненужные детали остаются невидимыми, но в ручном режиме можно их сделать видимыми и изменить состав деталей сборочного узла. Сборка производится в соответствии с типом конструкции подпятника.

В Табл. 2 для сравнения приведены параметры подпятников и их деталей для гидрогенераторов различной мощности, частоты вращения и нагрузки на подпятник.

Важное преимущество объемного моделирования в том, что теперь разработчик сразу видит свою конструкцию такой, какой она будет в действительности. При этом ошибки можно найти и исправить на ранней стадии проектирования.

Например, при проектировании подпятника для гидрогенератора Зеленчукской ГАЭС, благодаря трехмерной сборке сразу была отброшена возможность использования гидравлических опор из-за недостатка места, определены необходимые изменения для сегментных упоров и тарельчатой опоры.

Система автоматизированного проектирования подпятника является базой для проектирования масляной ванны подпятника и узлов, примыкающих к ним.

В настоящее время на предприятии создается система автоматизированного проектирования для направляющих подшипников вертикальных гидрогенераторов.

Заклучение

1. Разработана система автоматизированного проектирования деталей подпятников для гидрогенераторов различных мощностей, частот вращения и нагрузки на подпятник.

2. Создание трехмерных моделей деталей подпятника существенно сократит время проектирования опорного узла.

3. Обеспечен выпуск чертежей деталей с основными размерами.

4. Осуществляется поиск генератора-аналога для подбора чертежей из числа уже созданных.

Автоматизация проектирования - необходимость, продиктованная временем. В условиях усиливающейся конкуренции увеличивается объем конструкторской документации, который нужно сделать в сжатые сроки. Созданная система уменьшит количество непрофессиональных решений и высвободит время для творческого конструирования за счет выполнения компьютером рутинных операций.

Автоматизированное проектирование подпятника гидроагрегата является показательным примером для проектирования остальных узлов электрических машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воскресенский В.А., Дьяков В.И. Расчет и проектирование опор скольжения. — М.: Машиностроение, 1980 г.

2. Бронштейн Л.Я. и др. Справочник конструктора гидротурбин. — Л., Машиностроение, 1971 г.

© Грубой А.П., Дьяков В.И., Кубанов В.Г., Салтовская Д.А., 2012

