

УДК 621.165

А. П. УСАТЫЙ, канд. техн. наук.

Национальный технический университет Харьковский политехнический институт»,  
г. Харьков

## МОДЕЛИ РАСЧЕТА СИСТЕМ СОПЛОВОГО ПАРОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ МНОГОРЕЖИМНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

*В статье приведены модели расчета соплового парораспределения с заданным расходом рабочего тела, реализующие четыре варианта законов управления подъемами регулирующих клапанов для обеспечения, требуемого расхода. Модели предназначены для использования в задачах оптимального синтеза и анализа конструкций осевых турбин с учетом режимов их эксплуатации.*

*В статті приведені моделі розрахунку соплового паророзподілу з заданою витратою робочого тіла, що реалізують чотири варіанти законів управління підйомами регулюючих клапанів для забезпечення потрібної витрати. Моделі призначені для використання в задачах оптимального синтезу та аналізу конструкцій осьових турбін з урахуванням режимів експлуатації.*

### Постановка и актуальность проблемы

Условия работы современных энергоблоков характеризуются существенной неравномерностью эксплуатационных нагрузок. Текущий уровень нагрузки энергоблока зависит от многочисленных факторов, основными из которых, с учетом региональных отличий, являются суточные и сезонные графики потребления тепловой и электрической энергии. Согласование потребляемой и вырабатываемой мощностей, как правило, осуществляется изменением расхода пара через проточную часть (ПЧ) турбины энергоблока. Для регулирования расхода через ПЧ, наиболее часто используют системы соплового парораспределения, которые на сегодняшний день являются наиболее эффективным и надежным механизмом изменения мощности турбин [1]. Известно также, что отклонение режима эксплуатации паровой турбины от расчетно-номинального, существенным образом сказывается на экономичности работы ее ПЧ. В наибольшей мере снижается экономичность регулировочной ступени, первых 2-3 ступеней давления цилиндра высокого давления (ЦВД), а также последних 2-3 ступеней цилиндра низкого давления (ЦНД). В этой связи очевидной является необходимость учета потенциального графика изменения расхода пара через ПЧ еще на стадии проектирования новой или модернизации существующей турбины. Существенное влияние отклонения расхода пара от его расчетно-номинального значения на эффективность регулировочной ступени делает весьма важными и актуальными вопросы, связанные с оптимальным проектированием системы соплового парораспределения, учитывающим потенциальный график изменения расхода за определенный период, например, один год эксплуатации. Решение этих вопросов не возможно без наличия моделей расчета соплового парораспределения, позволяющих анализировать экономичность его конструкции при заданном расходе пара. Известны методы и модели расчета соплового парораспределения, обеспечивающие определение расхода для заданных положений регулировочных клапанов [1, 2, 3]. Вместе с тем, использование таких моделей напрямую для решения задач оптимального проектирования соплового парораспределения с учетом изменения эксплуатационных нагрузок не представляется возможным. Очевидно, что проектирование оптимальных, высокоэкономичных конструкций систем соплового парораспределения, способных наиболее эффективно реагировать на изменение нагрузки требует разработки соответствующих моделей расчета, способных определять параметры этих систем при заданном расходе пара.

### Цель исследования

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка математических моделей расчета подсистемы соплового парораспределения, обеспечивающих определение характеристик всех составных частей подсистемы при заданном расходе пара. Учитывая, что наиболее эффективные решения могут быть найдены только с учетом максимального числа факторов, определяющих взаимодействие не только узлов подсистемы соплового парораспределения, а и всей проточной части турбины, решение стоящих задач наиболее целесообразно осуществлять в рамках интегрированной САПР, например САПР «Турбоагрегат». В этой связи рациональным выглядит подход, основанный на модификации и расширении функциональных возможностей модели [3], разработанной лишь для решения задач анализа при заданных положениях регулировочных клапанов.

### Основная часть

Появление в последнее время систем управления положениями регулирующих клапанов [4], потенциально способных осуществлять независимое позиционирование каждого регулирующего клапана, открывает новые возможности как в области оптимального проектировании систем соплового парораспределения, так и возможности реализации различных законов управления положениями клапанов.

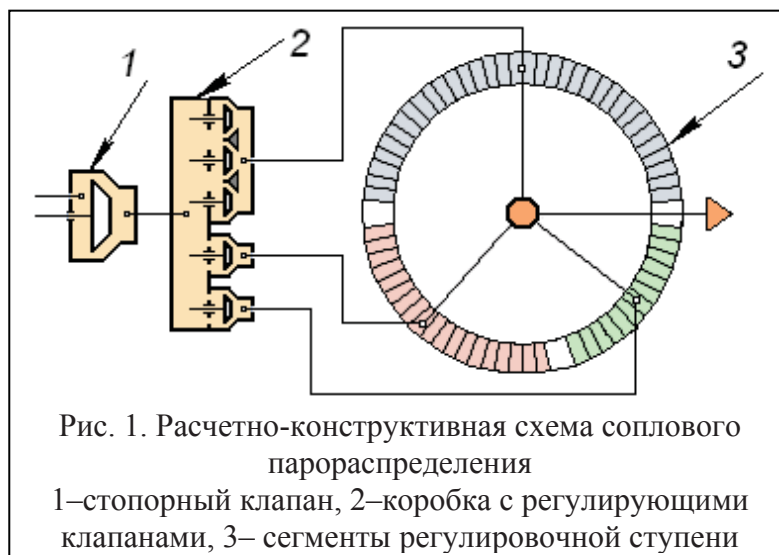
В этой связи, для решения поставленной задачи, в первую очередь, необходимо определить правила управления последовательностью и величинами подъема регулирующих клапанов. Важность определения отмеченных правил очевидна и вытекает она из неоднозначности решения задачи с заданным расходом ( ) в случае их отсутствия, т.к. один и тот же расход пара через систему соплового парораспределения можно обеспечить бесконечным множеством вариантов комбинаций положений регулирующих клапанов. В данной статье рассматриваются четыре варианта правил моделирующих управление позиционированием клапанов:

1. Часть клапанов открыта, часть полностью закрыта, а требуемая величина расхода обеспечивается соответствующим положением одного из клапанов.
2. Заданный расход достигается одинаковым подъемом ( ) всех клапанов.
3. Заданный расход достигается позиционированием клапанов, при котором относительные высоты подъема ( , где – диаметр регулирующего клапана) всех клапанов равны.
4. Требуемый расход обеспечивается комбинацией положений клапанов, определяемой в результате решения оптимизационной задачи.

Рассмотрим основные особенности алгоритмической реализации моделей расчета соплового парораспределения с заданным расходом на базе отмеченных вариантов правил позиционирования регулирующих клапанов. Расчетно-конструктивная схема соплового парораспределения приведена на рисунке 1.

Учитывая, что любая конструкция соплового парораспределения имеет свою максимальную пропускную способность, в разработанных алгоритмах существует общий блок, осуществляющий проверку возможности пропуска заданного расхода пара. Для этого моделируется полное открытие всех клапанов, и проводится расчет по варианту модели с заданными высотами подъемов регулирующих клапанов [3] с целью определения расчетного значения расхода ( ). Если будет выполнено условие, что , алгоритм завершит свою работу. В результате расчета будет определен расход пара равный максимальной пропускной способности данной конструкции соплового парораспределения.

В противном случае, алгоритмы поиска положений клапанов продолжают работу по поиску комбинации положений регулирующих клапанов, обеспечивающей прохождения заданного расхода. Так в алгоритме, реализующем первый вариант правил позиционирования регулирующих клапанов в первую очередь определяется клапан, в зоне работы которого находится заданный расход.



Для этого поочередно, начиная с последнего (N-го) клапана, моделируется последовательное их закрытие и соответственно расчет по модели [3]. Признаком нахождения такого клапана является выполнение двух условий:  $G_p \geq G_s$  – при полностью открытом клапане и  $G_s \geq G_p$  – при полностью закрытом клапане. Точное значение высоты подъема найденного клапана, обеспечивающее прохождение заданного расхода, определяется численным решением уравнения  $G_s = G_p = f(H_k)$ . Для решения этого уравнения используется метод секущих. Блок-схема алгоритма, реализующего первый вариант правил позиционирования регулирующих клапанов приведена на рисунке 2.

Структурно алгоритмы 2-го и 3-го вариантов управления положениями регулирующих клапанов одинаковы. Отличие этих алгоритмов заключается в физической сути определяемой величины, значение которой обеспечит прохождение заданного расхода. Если для второго варианта этой величиной является абсолютное значение подъема (одинаковое для всех регулирующих клапанов), то в третьем варианте используются относительные величины подъема клапанов. Блок-схема алгоритма, реализующего 2-й и 3-й варианты, приведена на рисунке 3.

Структура алгоритма 4-го варианта подобна структуре 1-го варианта алгоритма. Основные различия этих алгоритмов, заключаются в том, что высоты подъема открытых клапанов в 1-м варианте максимальны, а в 4-м задаются в соответствии со стратегией поиска оптимального решения. Практически, использование 4-го варианта моделирования установок положений регулирующих клапанов приводит к изменению, по сравнению с 1-м вариантом, не только высот подъема клапанов, но и включению или выключению из работы того или иного сегмента регулировочной ступени. Все алгоритмы при необходимости обеспечивают, как полностью независимую, так и синхронную работу нескольких клапанов.

Следует отметить, что 4-й вариант управления положениями клапанов весьма чувствителен к выбранному критерию качества. Так, при использовании в качестве критерия оптимальности мощности регулировочной ступени результатом будет решение созвучное решению, получаемому при использовании 1-го варианта правил позиционирования регулирующих клапанов. В случае если целевая функция формируется на базе КПД регулировочной ступени результат решения оптимизационной задачи будет ближе к результату, получаемому с помощью использования 3-го варианта управления положениями клапанов. При использовании комплексных критериев качества результаты будут зависеть от состава вектора комплексного критерия качества и весов его компонент. Использование 2-го варианта правил установки положений клапанов приводит к решениям, подобным тем, которые получаются с помощью дроссельных систем регулирования.

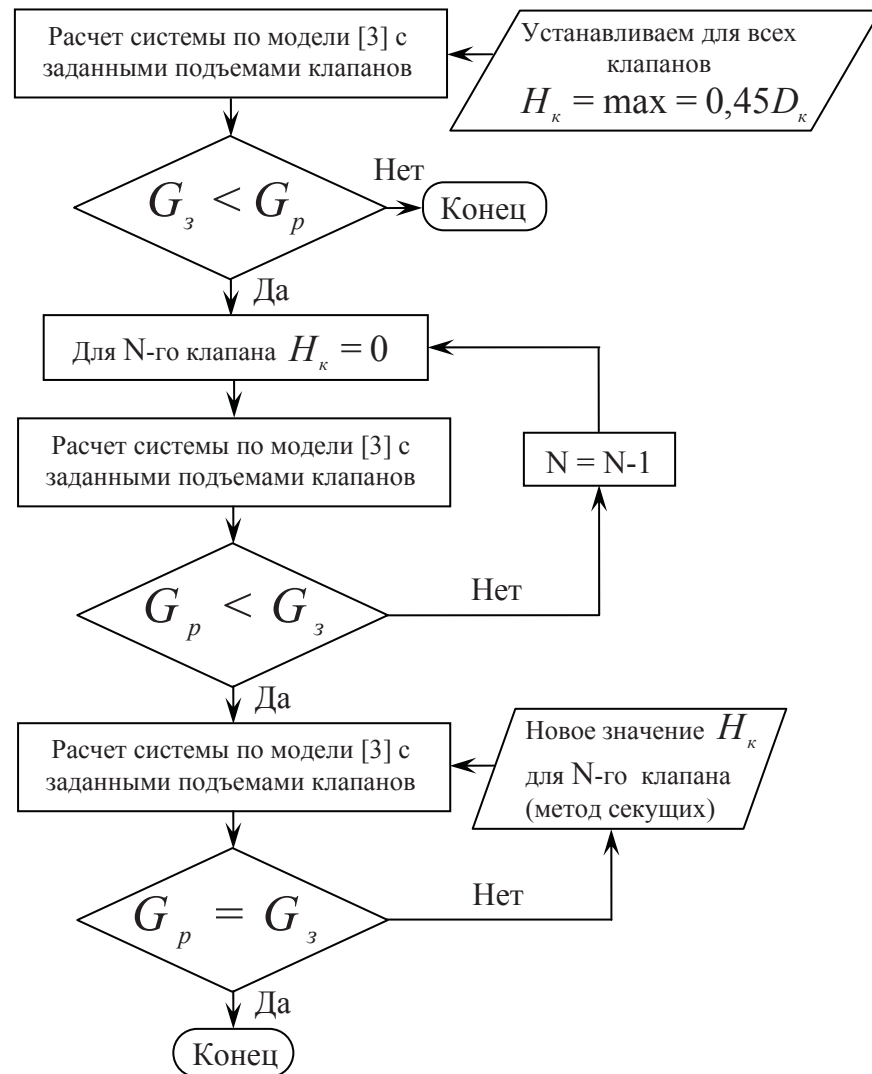


Рис. 2. Блок-схема первого варианта алгоритма, определяющего положения регулирующих клапанов для заданного расхода пара

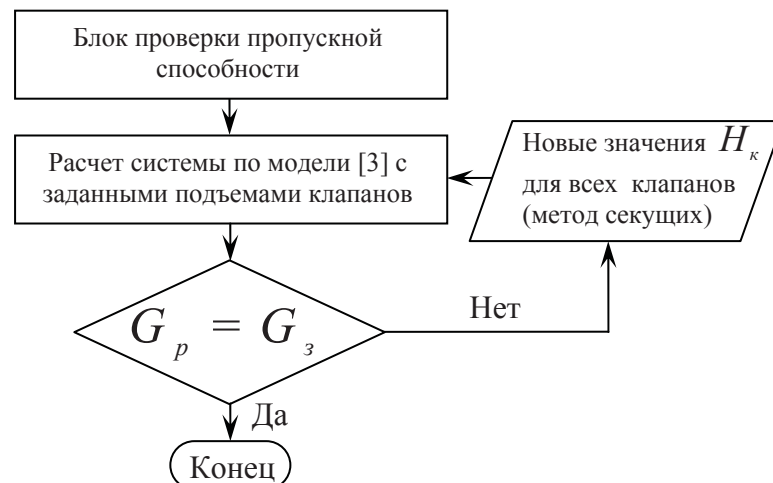


Рис. 3. Блок-схема 2-го и 3-го вариантов алгоритма, определяющего положения регулирующих клапанов для заданного расхода пара

В качестве примера в таблице приведены результаты расчета системы соплового парораспределения турбины К-310-240. Расчеты проведены с помощью рассмотренных выше алгоритмов позиционирования регулирующих клапанов моделировали частичную

нагрузку ( $G_3 = 220$  кг/сек). При этом, расход пара, соответствующий расчетно-номинальному режиму работы равен 277,778 кг/сек.

Таблица  
Результаты расчета системы соплового парораспределения турбины К-310-240

Параметры		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4.1	Вариант 4.2
Сегмент 1	$H_{к1}, мм$	33,75	5,52396	3,82703	16,5084	3,88835
	$H_{к2}, мм$	33,75	5,52396	3,82703	16,5084	3,88835
	$H_{к3}, мм$	50,40	5,52396	5,71503	23,8307	7,26314
	$H_{к4}, мм$	50,40	5,52396	5,71503	23,8307	7,26314
	$G_{к1}, кг/сек$	31,0544	26,9878	18,393	31,1667	18,4324
	$G_{к2}, кг/сек$	31,0544	26,9878	18,393	31,1667	18,4324
	$G_{к3}, кг/сек$	69,2527	39,3286	41,0172	69,0464	51,9976
	$G_{к4}, кг/сек$	69,2527	39,3286	41,0172	69,0464	51,9976
	$G_{сег}, кг/сек$	200,614	132,633	118,82	200,426	140,86
	$U/C_0$	0,363303	0,500447	0,544603	0,363501	0,477193
$P_{2к(1...4)}, кПа$	22699,4	18568,3	17923,8	22682,6	18941,7	
Сегмент 2	$H_{к1}, мм$	2,48078	5,52396	6,37838	1,80392	9,71216
	$G_{к1}, кг/сек$	19,3855	43,2371	50,6508	14,2366	79,14
	$G_{сег}, кг/сек$	19,3855	43,2371	50,6508	14,2366	79,14
	$U/C_0$	2,04088	0,79309	0,661317	2,76556	0,485116
	$P_{2к1}, кПа$	22699,4	16318,9	16829,8	14795,5	19138,0
Сегмент 3	$H_{к1}, мм$	0	5,52396	6,37838	0,6659	0
	$G_{к1}, кг/сек$	0	44,1301	50,5289	5,33663	0
	$G_{сег}, кг/сек$	0	44,1301	50,5289	5,33663	0
	$U/C_0$	0	0,548	0,494236	4,78711	0
	$P_{2к1}, кПа$	0	17959,1	18790,9	14710,9	0
Ступень	$h_0, Дж/кг$	86055,197	43618,792	41961,551	87057,269	56794,873
	$N, кВт$	18932	9596,14	9231,55	19186,9	12494,9
	КПД	0,581534	0,727494	0,74993	0,587648	0,768252
	$P_2, кПа$	14677,3	14826,9	14832,7	14673,7	14780,3
	$i_2, кДж/кг*гр$	3237,94	3280,38	3282,04	3236,79	3267,21
	$G_{ступ}, кг/сек$	220,0	220,0	220,0	219,999	220,0

Вариант 4.1 получен решением оптимизационной задачи позиционирования регулирующих клапанов при использовании в качестве критерия качества мощности регулировочной ступени, а вариант 4.2 в результате решения аналогичной задачи с критерием качества КПД ступени.

Как видно из таблицы, требуемый расход пара был обеспечен различными комбинациями регулирующих клапанов. Рассмотренные варианты правил, определяющих то или иное позиционирование клапанов, оказывают существенное влияние на параметры пара за регулировочной ступенью ее располагаемый теплоперепад и эффективность работы. Видно, что мощность регулировочной ступени в варианте 4.2, более чем в два раза превышает мощность ступени из варианта 3. Также наблюдаются от варианта к варианту значимые различия и в уровнях КПД регулировочной ступени.

Наличие существенного влияния правил управления позиционированием регулировочной ступени на ее эффективность еще раз подчеркивает важность и указывает на необходимость решения задач оптимального проектирования систем соплового парораспределения с учетом графиков потенциальных режимов работы.

### Выводы

1. Разработан метод расчета системы соплового парораспределения с заданным расходом.
2. Разработаны четыре варианта алгоритмов моделирующих правила позиционирования регулирующих клапанов.
3. Проведены расчетные исследования, подтвердившие наличие существенного влияния вариантов позиционирования клапанов на экономичность регулировочной ступени.
4. Подчеркнуты актуальность и необходимость проектирования систем соплового парораспределения с использованием оптимизационных алгоритмов, учитывающих потенциальные режимы работы турбин.

### Список литературы

1. Самойлович Г. С., Трояновский Б. М. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах. – М.: Энергоиздат, 1982. – 496 с.
2. Чупирев Д. А. Проектирование и тепловые расчеты стационарных паровых турбин. – Киев: МАШГИЗ., 1953. – 258с.
3. Бойко А. В., Говорущенко Ю. Н., Усатый А. П. Модель совместного расчета соплового парораспределения и проточной части осевой турбины в САПР «Турбоагрегат». // Энергетика та електрифікація. – 2009. – № 12. – С. 38–44.
4. Субботин В. Г., Бураков А. С., Рохленко В. Ю., Швецов В. Л. Электро-гидравлические системы регулирования паровых турбин ОАО «Турбоатом» // Сб. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование.– Харьков: НТУ «ХПИ».– 2009.– № 3.– С. 98–104.

## MODELS OF CALCULATION OF SYSTEMS OF NOZZLE PARORASPREDELENIYA ARE IN TASKS OF MULTIMODE OPTIMIZATION

A. P. USATYII, Cand. Tech. Sci.

*In the article the models of calculation of nozzle paroraspredeleeniya are resulted with the set expense of working body, realizing four variants of laws of management gettings up of regulative valves for providing, required expense. Models are intended for the use in the tasks of optimum synthesis and analysis of constructions of axial turbines taking into account the modes of their exploitation*

*Поступила в редакцию 10.02 2010 г.*



### Уважаемые читатели!

**Приглашаем Вас стать подписчиками журнала  
«Энергосбережение·Энергетика·  
Энергоаудит»  
на 2010 год!**

**На страницах журнала публикуются  
статьи об актуальных проблемах  
электроэнергетики, энергорынка,  
теплоэнергетики, газоснабжения, водоснабжения,  
водоотведения и экономики.**

**Подписка с любого месяца!  
Справки по телефону 8(057) 7-149-451**