

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ПАРОВЫХ ТУРБИН ПРИ ВНЕДРЕНИИ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

НОВОСЁЛОВ В.Б.*, БРОДОВ Ю.М.*, ЛИТВИНОВ Е.В.*, ЛЕБЕДЕВ В.В.** ,
МИХАЙЛОВ А.Г.**

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина»

**ОАО «Уралэнергоремонт»

Рассмотрены различные схемы систем защиты, применяемых в гидродинамических и электрогидравлических системах регулирования и защиты паровых турбин, выполнен критический анализ их функциональности, показаны преимущества современных многоканальных систем защиты.

Ключевые слова: система защиты паровой турбины, блок золотников защиты, электромагнитные клапаны.

Каждому этапу развития паровых турбин соответствует, наряду с применяемой автоматической системой регулирования (АСР), вполне определённая система защиты (СЗ). Осуществляемый в настоящее время повсеместный переход к электрогидравлическим системам регулирования (ЭГСР) заметно отразился и на подходах к проектированию СЗ.

В настоящей статье представлен опыт исследований и проектирования СЗ, полученный в последнее десятилетие в ОАО «Уралэнергоремонт» (ОАО УЭР) и Уральском федеральном университете (УрФУ) при реконструкциях АСР турбин различных заводов-изготовителей и оснащении турбинными заводами новых турбин электрогидравлической системой регулирования и защиты (ЭГСРЗ)¹.

Сравнительные характеристики систем защиты

В качестве исходной базы для сравнения рассмотрена типичная механогидравлическая система защиты (МГСЗ) от разгона паровой турбины, которой комплектовались отечественные паровые турбины всю вторую половину 20-го века.

МГСЗ [1, 2] (см. рис. 1) выполнялась двухканальной в импульсной и усилительной частях, т.е. содержала 2 бойковых автомата безопасности (АБ) и двухканальный блок золотников автомата (регулятора) безопасности (ЗАБ, ЗРБ). Последующие элементы системы защиты: гидравлическая «линия защиты», сервомотор (автотатор) и стопорный клапан выполнялись одноканальными, поскольку ни экономически, ни, особенно, конструктивно продолжать дублирование в части исполнительных и парораспределительных органов не представлялось (и не представляется до сих пор) возможным. Здесь следует отметить, что дублирование АБ и ЗАБ не являлось самоцелью, а было следствием осознанной необходимости их периодического поканального расхаживания, в процессе которого расхаживаемый канал выключается из работы, что требует наличия на этот период другого (работающего) канала защиты.

¹ На основе материалов ЗАО «Уральский турбинный завод» (УТЗ)

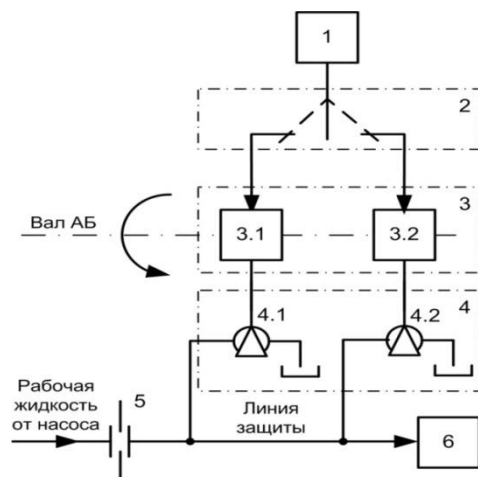


Рис.1. Схема двухканальной ГМСЗ: 1 – рабочая жидкость для расхаживания; 2 – переключатель расхаживания каналов; 3 – бойки автомата безопасности; 4 – золотники автомата безопасности; 5 – дроссель запитки линии защиты; 6 – автозатвор стопорного клапана

Анализ способов контроля работоспособности такой ГМСЗ в процессе эксплуатации турбоагрегата показал следующее:

- проверка (расхаживание) одного из каналов подачей тестового сигнала (для МГСЗ это практически однозначно – налив масла в испытуемый боёк) может быть осуществлена только в импульсной части (боёк – золотник) на часть хода для недопущения останова турбины;

- расхаживание бойка не сопровождается изменением импульсного давления в линии защиты (ЛЗ) и положения автозатвора стопорного клапана (АСК), которые являются неотъемлемыми частями канала защиты, т.е. не реализуется принцип «сквозной» проверки каналов защиты;

- отдельное расхаживание АСК реализует только механическую проверку его подвижности на ограниченную часть хода² и никак не связано с проверкой канала защиты;

- полная проверка любого из каналов защиты возможна только с остановом турбоагрегата;

- для проверки (расхаживания) одного из каналов необходимо изменение структуры защиты (исключение воздействия бойка на золотник, механическое ограничение величины хода золотника и т.п.), т.е. выход из стандартного рабочего состояния СЗ, а после проверки – возвращение в него; это обеспечивается дополнительными конструктивными элементами ЗАБ (ЗРБ), что снижает надёжность СЗ.

Исходя из приведённого анализа, при переходе к новым СЗ в составе ЭГСПЗ, по мнению авторов, необходимо добиваться следующего:

- тестирование (расхаживание) любого канала СЗ должно осуществляться путём подключения тестового сигнала взамен сигнала датчика **при неизменной структуре остальной части СЗ во всех режимах эксплуатации;**

- тестирование любого канала СЗ должно быть максимально глубоким, т.е. затрагивать максимальное количество элементов канала, **включая в предельном случае ЛЗ и АСК.**

² Для турбин с двумя (несколькими) подводами пара имеется возможность расхаживания одного АСК на полный ход

Трёхканальная золотниковая проточная система защиты

Впервые в России трёхканальную СЗ паровой турбины в составе ЭГСРЗ предложил и реализовал ОАО УЭР в 2004 г. [3]. Структурная схема такой СЗ, реализованной по проточной схеме, и её ключевой элемент – блок золотников защиты (БЗЗ) показаны на рис. 2.

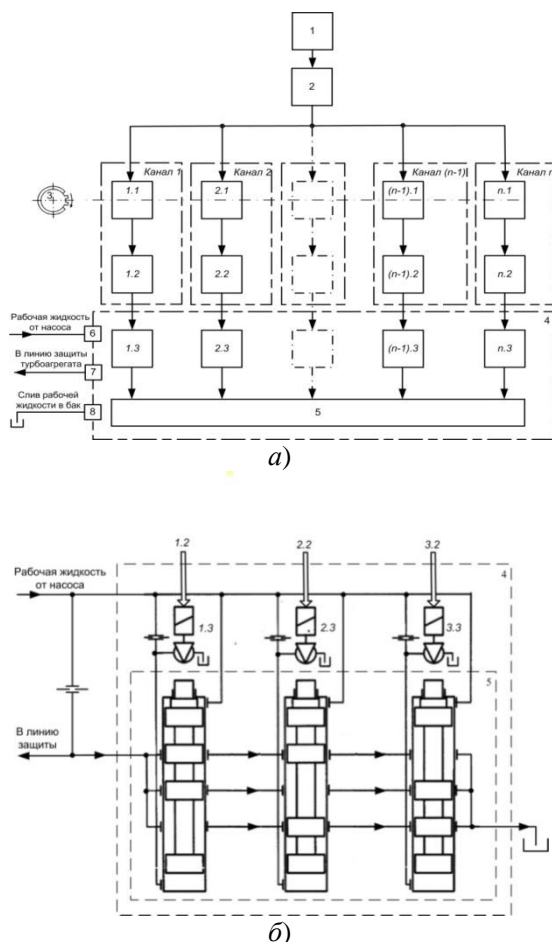


Рис. 2. Многоканальная СЗ (во взведённом состоянии), работающая по проточной схеме:

а) – структурная схема; б) – трёхканальный блок электромагнитных золотников защиты (БЭЗЗ).

1 – тестовый сигнал (тестовая частота); 2 – переключатель подачи тестового сигнала в каналы защиты;

1,1 ... n.1 – измерители частоты вращения; 1,2 ... n.2 – формирователи сигнала защиты;

3 – измерительная шестерня; 4 – БЭЗЗ; 1,3 ... n.3 – электромагнитные клапаны БЭЗЗ; 5 – блок гидравлических золотников БЭЗЗ; 6, 7, 8 – гидравлические входы–выходы БЭЗЗ

В реализованном трёхканальном варианте СЗ имеет три независимых электрических АБ, состоящих из измерителя частоты вращения и формирователя сигнала защиты, каждый из которых управляет «своим» золотником защиты (ЗЗ). Все три золотника защиты совместно формируют гидравлический сигнал останова турбины (снижение давления рабочей жидкости в ЛЗ) по логической схеме «2 из 3» в блоке золотников защиты.

ЛЗ запитывается маслом через дроссельную шайбу, а слив масла осуществляется через БЗЗ. Электрогидравлическими преобразователями (ЭГП) каналов защиты являются нормально открытые электромагнитные клапаны. Во взведённом состоянии катушка каждого электромагнитного клапана находится под напряжением, клапаны

закрыты и управляемый им золотник защиты – взведён. Когда взведены любые два (и тем более три) золотника БЗЗ, слив рабочей жидкости из ЛЗ перекрыт, давление в ЛЗ максимально, что соответствует открытому АСК. Напротив, при обесточивании любых двух (и тем более трёх) катушек электромагнитных клапанов соответствующие золотники БЗЗ перемещаются на нижние упоры, открывая слив рабочей жидкости из ЛЗ, что приводит к снижению давления в ней до уровня закрытия АСК.

Такая схема формирования логики «2 из 3» в гидравлической части БЗЗ позволяет осуществить полный контроль (тестирование) каждого канала вплоть до ЛЗ в процессе эксплуатации турбины без изменения режима работы. Практически (на эксплуатируемых турбинах) такой контроль реализован ежедневно в автоматическом режиме, что, безусловно, демонстрирует существенные преимущества над традиционной двухканальной СЗ. Ложное срабатывание одного из каналов не приводит к останову турбоагрегата, но диагностируется и автоматически преобразует логику оставшихся в работе двух каналов в «1 из 2».

В процессе эксплуатации проявились **некоторые относительные недостатки проточной СЗ³**:

- неполное снижение давления в ЛЗ при её срабатывании, определяемое балансом в ней расходов и сливов рабочей жидкости;
- относительно большие сливные сечения золотников для обеспечения требуемого уровня снижения давления в ЛЗ;
- вероятность заклинивания золотников защиты вследствие наличия боковых усилий на рабочих поясах золотников;
- относительно небольшой подвод рабочей жидкости в ЛЗ через дроссельную шайбу, приводящий к проявлению влияния нерасчётных протечек в ЛЗ и из неё (особенно при их изменении в процессе эксплуатации турбоагрегата) на величину давления в ЛЗ.

Трёхканальная золотниковая отсечная система защиты

Дальнейшим развитием трёхканальной золотниковой СЗ с логикой «2 из 3» явился переход на БЗЗ, работающий по отсечной схеме [4]. Такой БЗЗ был разработан в УТЗ и в настоящее время реализуется во всех ЭГСРЗ завода (см. рис. 3).

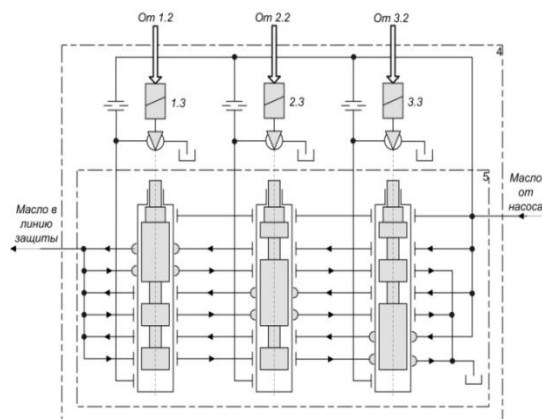


Рис. 3. БЗЗ, работающий по отсечной схеме. Обозначения - как на рис. 2,б

Гидравлическая часть БЗЗ выполнена таким образом, что во взведённом состоянии 2-х или 3-х каналов рабочая жидкость подаётся из напорной линии в ЛЗ,

³ По сравнению с идеальным вариантом СЗ
© Проблемы энергетики, 2016, № 3-4

отсеченную от линии слива в бак, а в сработавшем состоянии ЛЗ отсечена от напорной линии, но соединена со сливной линией в бак.

В остальном отсечная СЗ функционально не отличается от проточной. Её **сравнительными достоинствами**, по отношению к проточной СЗ, являются:

- полное снижение давления (до нуля) в ЛЗ в сработавшем состоянии, что повышает надёжность закрытия АСК;
- при одинаковых конструктивных размерах меньше в 3–4 раза боковые усилия на золотниках, что снижает вероятность их заклинивания;
- существенное снижение влияния нерасчётных протечек в ЛЗ и из неё на величину давления в ней.

Многоканальная беззолотниковая СЗ

В представленных выше двух вариантах трёхканальной СЗ преобразование электрического сигнала защиты в гидравлический осуществляется электромагнитными клапанами, которые при этом являются только пилотными элементами золотников БЗЗ, реализующих логическую схему «2 из 3». Наличие золотников, как элементов, принципиально способных отказать в работе, снижает надёжность СЗ.

Понимание этого факта объясняет стремление организовать СЗ, в которой необходимая логическая схема формируется непосредственно на электромагнитных клапанах без БЗЗ, что должно по определению повысить надёжность СЗ.

Вариант реализации такой СЗ был предложен в патенте [5] и в дальнейшем реализован в ОАО УЭР при реконструкции ряда турбин. Основное её отличие от предыдущих золотниковых вариантов состоит в применении вместо БЗЗ блока электромагнитных клапанов (БЭК). Применяются двухпозиционные трёхходовые (3/2) электромагнитные клапаны (ЭК), объединённые в единую конструкцию из нескольких клапанов, схема которой в обесточенном состоянии клапанов (турбоагрегат остановлен) показана на рис. 4.

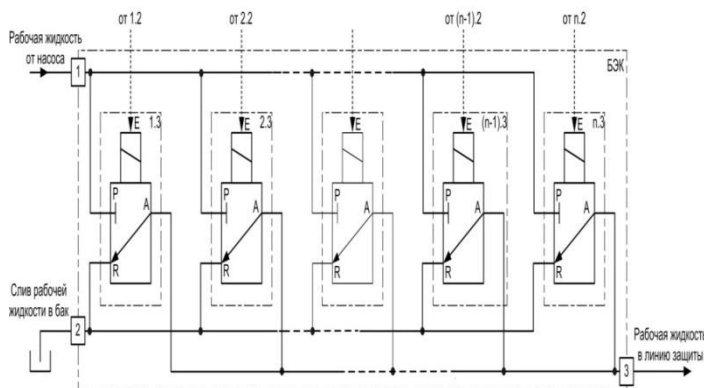


Рис. 4. БЭК в сработавшем (обесточенном) состоянии (турбина остановлена). 1.3...n.3 – двухпозиционные трёхходовые (3/2) электромагнитные клапаны. Остальные обозначения в тексте

Определение количества ЭК (n), необходимого для надёжной защиты турбины, является одной из задач при организации такой защиты, которая в любом случае должна реализовать логическую схему « $(n-1)$ из n », т.е. обеспечить надёжную работу СЗ (закрытие СК) даже при отказе одного из n каналов. С другой стороны, должно быть обеспечено поканальное тестирование защиты, не приводящее к останову турбины.

Каждый ЭК имеет три порта (хода). К порту «P» подключена линия подачи рабочей жидкости от насоса системы регулирования, к порту «A» – ЛЗ турбоагрегата, а порт «R» соединён с линией слива рабочей жидкости в бак системы регулирования.

Как видно из рис. 4, в обесточенном состоянии БЭК (турбина остановлена) рабочая жидкость из линии защиты сливается, давление в ней равно нулю (0), что соответствует закрытому АСК турбины.

При пуске турбины для взведения АСК на ЭК подаётся напряжение и БЭК переходит в состояние, изображённое на рис. 5.

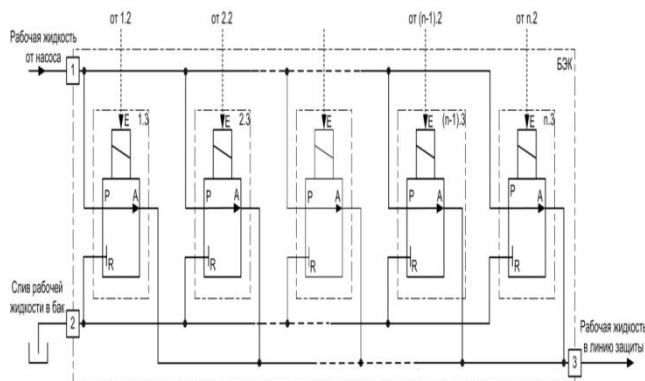


Рис. 5. Блок электромагнитных клапанов во взведённом (под напряжением) состоянии (турбина работает)

При этом через все ЭК рабочая жидкость от насоса системы регулирования подаётся в ЛЗ, слив из которой в бак отсекается. Давление в ЛЗ становится равным давлению за насосом регулирования, что соответствует полному открытию АСК.

Проверка (тестирование) канала защиты может производиться двумя способами:

1. Первый (основной) способ состоит в том, что на вход канала подаётся сигнал с тестового генератора частоты (вместо датчика ЧВ, см. рис. 2,а), соответствующий уставке срабатывания защиты; при этом все элементы канала защиты срабатывают, приводя к обесточиванию соответствующего ЭК (рис. 6), который, переключившись, начинает сливать рабочую жидкость из ЛЗ, в то время когда остальные клапаны продолжают её подавать в ЛЗ.

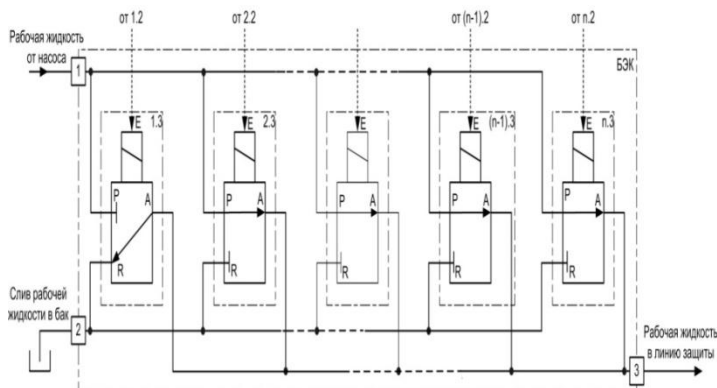


Рис. 6. Блок электромагнитных клапанов во взведённом состоянии при тестировании одного из каналов или ложном срабатывании в нём

2. Второй способ состоит в том, что при проверке только снимается напряжение с электромагнитного клапана, т.е. он расхаживается; результат – тот же, что при первом способе.

При этом давление рабочей жидкости в ЛЗ в процессе тестирования (обозначим его как $p_{ЛЗ}^{тест}$) определяется из исходного уравнения

$$(n-1)\sqrt{p_n - p_{ЛЗ}^{тест}} = \sqrt{p_{ЛЗ}^{тест}}, \quad (1)$$

где n – количество каналов защиты (клапанов БЭК); p_n – давление рабочей жидкости за насосом регулирования.

Из формулы (1) получаем величину $p_{ЛЗ}^{тест}$:

$$p_{ЛЗ}^{тест} = p_n \frac{(n-1)^2}{(n-1)^2 + 1}. \quad (2)$$

В табл. 1 представлены значения давления $p_{ЛЗ}^{тест}$ в «линии защиты» для различного n при $p_n = 1,4$ МПа (типичное значение для турбин УТЗ):

Таблица 1

Давления $p_{ЛЗ}^{тест}$ в «линии защиты» для различного n при $p_n = 1,4$ МПа

n	1	2	3	4	5	6
$p_{ЛЗ}^{тест}$	0	0,7	1,12	1,26	1,318	1,346

Для сравнения на рис. 7 показана типичная для турбин УТЗ зависимость открытия АСК от давления в ЛЗ. Из рис. 7 видно, что для поканального расхаживания БЭК достаточно трёх клапанов ($n=3$), при этом $p_{ЛЗ}^{тест} = 1,12$ МПа и АСК при расхаживании не закрывается.

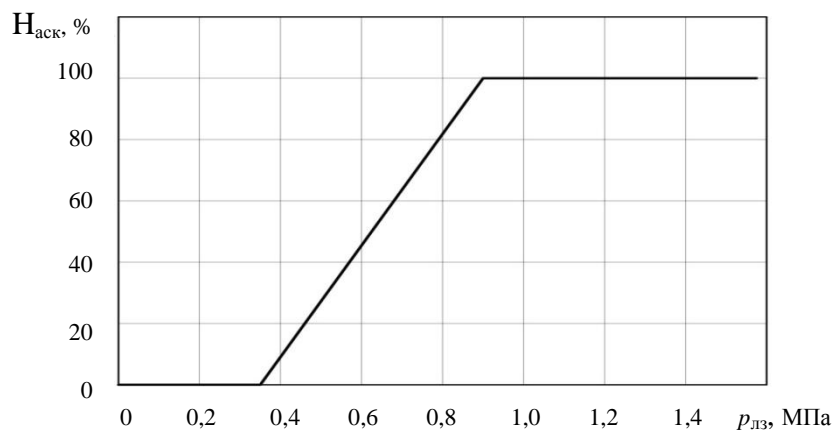


Рис. 7. Зависимость открытия АСК от давления в ЛЗ

Рассмотрим задачу определения количества каналов защиты с позиций надёжной работы. При нормальной работе (срабатывают все каналы) СЗ обеспечивает снижение давления в ЛЗ до нуля (0), что, безусловно, обеспечивает закрытие АСК. В случае отказа одного из каналов защиты (см. рис. 8) $(n-1)$ ЭК сливают рабочую жидкость в бак, а один ЭК (отказавший, в примере на рис. 8 – 1.3) подаёт её в «линию защиты», т.е. реализуется случай, соответствующий логике « $(n-1)$ из n ».

В этом случае в «линии защиты» устанавливается давление $p_{ЛЗ}^{защ}$, определяемое из исходного уравнения

$$\sqrt{p_n - p_{ЛЗ}^{защ}} = (n-1)\sqrt{p_{ЛЗ}^{защ}}, \quad (3)$$

откуда

$$p_{ЛЗ}^{зашч} = \frac{p_H}{(n-1)^2 + 1}. \quad (4)$$

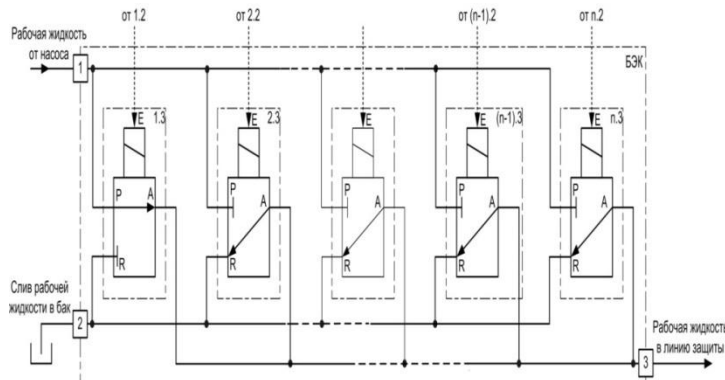


Рис. 8. Блок электромагнитных клапанов в сработанном (обесточенном) состоянии (турбина остановлена) при отказе срабатывания одного из каналов

В табл. 2 представлены значения давления $p_{ЛЗ}^{зашч}$ в «линии защиты» для различного n при $p_H = 1,4$ МПа.

Таблица 2

Давления $p_{ЛЗ}^{зашч}$ в «линии защиты» для различного n при $p_H = 1,4$ МПа

n	1	2	3	4	5	6
$p_{ЛЗ}^{зашч}$	1,4	0,7	0,28	0,14	0,082	0,054

Сравнение данных табл. 2 с рис. 7 показывает, что минимальное количество каналов, при котором показанная беззолотниковая СЗ может использоваться, составляет $n=4$. В этом случае при отказе одного из каналов три оставшихся работоспособными обеспечат снижение давления в ЛЗ до величины 0,14 МПа, что с определённым запасом приведёт к закрытию АСК. При поканальном тестировании (расхаживании) величина снижения давления в ЛЗ также составляет 0,14 МПа, (т.е. $p_{ЛЗ}^{тест} = 1,26$ МПа), что гарантированно не приведёт к закрытию АСК.

Необходимое количество каналов защиты может быть определено непосредственно без использования приведённых выше табличных данных: для надёжной работы защиты (гарантии закрытия стопорного клапана) необходимо, чтобы при срабатывании защиты и отказе одного из каналов давление в «линии защиты» снижалось до некоторого заданного минимально значения. Если обозначить такое значение как $p_{ЛЗ}^{\min}$, то для нахождения необходимого количества ЭК (каналов) необходимо выполнение условия

$$p_{ЛЗ}^{\min} \geq p_{ЛЗ}^{зашч}, \quad (5)$$

т.е. должно выполняться неравенство

$$p_{ЛЗ}^{\min} \geq \frac{p_H}{(n-1)^2 + 1}, \quad (6)$$

из которого получается выражение для необходимого количества ЭК:

$$n \geq 1 + \sqrt{p_H / p_{ЛЗ}^{\min} - 1}. \quad (7)$$

Например, если задаться $p_{ЛЗ}^{\min} = 0,15 \text{ МПа}$, то из (7) получается $n \geq 3,89$, и с учётом того, что n должно быть целочисленным, имеем $n=4, 5, 6, \dots$

Если принять более жёсткое условие – $p_{ЛЗ}^{\min} = 0,1 \text{ МПа}$ (что, однако, вполне оправданно с позиций гарантий надёжности), – то имеем $n \geq 4,6$, т.е. СЗ должна быть как минимум 5-канальной.

ОАО УЭР в своих проектах ЭГСРЗ считает оптимальной 5-канальную беззолотниковую СЗ. В этом случае даже при отказе одного канала из 5 давление в ЛЗ снижается до 0,082 МПа, что гарантирует закрытие АСК в случае значительных смещений характеристики АСК (см. рис. 7) влево (в область пониженных уровней давления в ЛЗ) в результате накапливающихся в процессе эксплуатации дефектов, приводящих к увеличению нечувствительности АСК. Такой 5-канальный вариант защиты применён ОАО УЭР в проектах реконструкции САР паровых турбин различных заводов-изготовителей: УТЗ с турбина ПТ-140/165-130/15 Волжской ТЭЦ-2; ЛМЗ – 3 турбины ПТ-80/100-130/13: 1 – на Новочебоксарской ТЭЦ-3 и 2 – на Омской ТЭЦ-5.

Новое положительное свойство беззолотниковой СЗ, по сравнению с предшествующими золотниковыми, состоит в том, что тестирование (расхаживание) каждого канала защиты приводит к видимому расчётному снижению давления в ЛЗ. **Таким образом реализуется проверка работоспособности большей части элементов канала защиты, включая и саму ЛЗ, чего не было в золотниковых СЗ, где глубина контроля канала ограничивалась контролем посадки золотника.**

Принципиально возможным является вариант проверки защиты, при котором также АСК закрывается на часть хода, не вызывая останова турбины. В представленном 5-канальном варианте к такому результату приводит тестирование с подачей сигнала в 2 канала из 5. В этом случае реально выполняется сквозная проверка системы защиты с видимой расчётной реакцией ЛЗ и АСК. Однако такой вариант требует дальнейшей тщательной практической проверки и отработки (при испытаниях на стоящей турбине был получен положительный результат).

Выводы

1. Проанализированы сравнительные варианты 2-х, 3-х и многоканальных систем защиты паровой турбины с позиции полноты реализации задач защиты турбины.
2. Показано, что переход от 2-х к 3-канальной системе защиты позволил обеспечить поканальную проверку (включая посадку золотника защиты) на работающей турбине без её останова, а также реализовать логическую схему «2 из 3», обеспечив при этом защиту турбины от ложного срабатывания в одном из каналов.
3. Выявлено, что переход к многоканальной беззолотниковой системе защиты позволяет дополнительно увеличить глубину поканальной проверки, включая расчётную реакцию (изменение) давления в «линии защиты», а также (после практической отработки) закрытие на часть хода автоматического стопорного клапана турбины.
4. Представлены расчётные формулы для определения необходимого количества каналов беззолотниковой системы защиты, исходя из требуемой надёжности её работы. В проектах ОАО УЭР обосновано решение, согласно которому в качестве оптимальной принята 5-канальная система защиты.

Summary

Different schemes of protection systems used in hydrodynamic and electrohydraulic control and protection systems of steam turbines are considered, the critical analysis of

their functionality is performed, the advantages of modern multi-channel protection systems are shown.

Keywords: *protection system of the steam turbine unit, spools protection unit, solenoid valves.*

Литература

1. Щегляев А.В. Регулирование паровых турбин: учеб. пособие для вузов / А.В. Щегляев, С.Г. Смельницкий. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. 256 с.
2. Бененсон Е.И. Теплофикационные паровые турбины / Е.И. Бененсон, Л.С. Иоффе.; под ред. Д.П. Бузина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: «Энергия», 1986. 272 с.
3. Система защиты турбоагрегата: пат. 2272153 Рос. Федерация. / Новосёлов В.Б., Вдовиков К.В. 2006, Бюл. № 8(III).
4. Трёхканальная система защиты турбоагрегата: пат. 2431046 Рос. Федерация / Новосёлов В.Б. 2011, Бюл. № 28.
5. Многоканальная система защиты турбоагрегата: пат. 2477801 Рос. Федерация./ Новосёлов В.Б. 2013, Бюл. № 8.

Поступила в редакцию

12 марта 2016 г.

Новоселов Владимир Борисович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). Тел.: 8(922)2087953. E-mail: vnowoselov@mail.ru.

Бродов Юрий Миронович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). Тел.: 8(343)375-48-51. E-mail: turbine66@mail.ru.

Литвинов Егор Владимирович – аспирант кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). Тел: 8(912)2912688. E-mail: litvinov@uer.ru.

Лебедев Владимир Вадимович – начальник цеха регулирования и автоматики ОАО «УРАЛЭНЕРГОРЕМОНТ». Тел.: 8(343)3881442. E-mail: v-lebedev-55@mail.ru.

Михайлов Алексей Геннадьевич – инженер цеха регулирования и автоматики ОАО «УРАЛЭНЕРГОРЕМОНТ». Тел.: 89193766547. E-mail: mixailov070@mail.ru.