

ВНЕДРЕНИЕ РЕЖИМА ИМПУЛЬСНОЙ РАЗГРУЗКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА НА ЭНЕРГБЛОКЕ № 2 РОСТОВСКОЙ АТОМНОЙ СТАНЦИИ

П. П. Мезенцев, Б. В. Доровских, В. В. Люльчак, В. В. Мальшиев, Я. Б. Солдатов, П. С. Мартюков

Московский филиал «Центратомтехэнерго» ОАО «Атомтехэнерго», г. Москва

На современном этапе развития атомной энергетики со стороны энергосистемы предъявляются требования о необходимости участия энергоблоков атомной станции (АЭС) в противоаварийной защите энергосистемы.

Работа энергоблока по каналам противоаварийной автоматики (ПАА) реализуется в двух режимах:

- импульсная разгрузка турбогенератора (ИР ТГ) с возвратом на исходный уровень мощности;
- разгрузка турбогенератора с последующим фиксированным ограничением мощности (ОМ).

Импульсная разгрузка турбогенератора – это защита энергосистемы, инициируемая ПАА и приводящая к кратковременному быстрому снижению электрической нагрузки ТГ с последующим плавным восстановлением электрической мощности до исходного значения.

Разгрузка с последующим фиксированным ограничением мощности (ОМ) – это защита энергосистемы, инициируемая ПАА и приводящая к быстрому снижению электрической нагрузки ТГ до величины ограничения, установленного ПАА. Увеличение нагрузки энергоблока возможно после снятия сигнала ПАА по командам оперативного персонала.

К АЭС энергосистемами предъявляется требование по участию в ПАА, как в части разгрузки с ОМ, так и в части ИР. Поэтому в настоящее время необходимо проведение комплекса мероприятий по внедрению данных режимов на всех строящихся, а также на всех действующих энергоблоках России.

К реализации режима ИР предъявляются следующие критерии:

- величина сброса нагрузки соответствует заданной в соответствии с типом сигнала ИР («ИР 30 %», «ИР 50 %» и т. д.);
- время от момента выдачи инициирующего сигнала ИР с открытого распределительного устройства (ОРУ) АЭС до момента начала снижения мощности ТГ в соответствии с требованиями энергосистемы;
- скорость сброса нагрузки не ниже предельно допустимой в соответствии с требованиями энергосистемы;
- время восстановления мощности до исходного значения в соответствии с требованиями энергосистемы и динамикой переходных процессов во втором контуре энергоблока АЭС;

– отсутствие срабатывания аварийных технологических защит и блокировок, а также срабатывания аварийных уставок по основным параметрам энергоблока (давление в главный паровой коллектор (ГПК), уровни в парогенераторах, температура и давление в 1-м контуре и другие);

– выход на заданный уровень мощности при снятии инициирующего сигнала ИР.

Впервые режим ИР с проведением полномасштабных исследований динамических режимов на АЭС был внедрен на энергоблоке № 3 Калининской АЭС, в настоящее время режим ИР внедряется на энергоблоках № 1 и № 2 Ростовской АЭС.

На этапе опытно-промышленной эксплуатации на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС были проведены работы по внедрению режима ИР по каналам ПАА. К особенностям испытаний и внедрения режимов ИР на Ростовской АЭС следует отнести тот факт, что на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС используется турбина К-1000-60/1500-2 производства ОАО «Турбоатом» (номинальная частота вращения 1500 об/мин), полномасштабные исследования по внедрению режима ИР на которой ранее не проводились.

Условно можно разделить работу по внедрению режима ИР на несколько этапов:

– аналитический расчет возможности внедрения режима ИР на энергоблоках, включающий динамический расчет протекания режима;

– анализ алгоритмов технологических защит и блокировок, срабатывающих в ходе протекания режима ИР;

– испытания электронно-гидравлической системы регулирования (ЭГСР) турбины в режиме имитации ИР ТГ на остановленной турбине;

– испытания по проведению ИР ТГ на энергоблоке на различных уровнях мощности (50, 75 и 100 % от номинального уровня мощности РУ).

На энергоблоке № 2 Ростовской АЭС ИР представляет собой быстрое снижение мощности ТГ за счет закрытия регулирующего клапана (РК) турбины, путем подачи на электрогидравлический преобразователь (ЭГП) форсирующего тока в течение 0,3–1,5 секунды, с последующим его снятием по экспоненциальному закону. Выбор амплитуды и длительности импульса форсирующего тока должен производиться с учетом экспериментальных зависимостей глубины разгрузки от параметров импульса.

Таким образом, одной из основных задач реализации режима ИР на энергоблоке является корректная настройка формы импульса форсирующего тока, которая позволит выполнить все критерии успешного проведения испытания режима ИР.

Важным вопросом при реализации режима ИР является решение о возможности/необходимости закрытия регулирующих заслонок (РЗ) турбины. С одной стороны, закрытие РЗ позволяет значительно увеличить скорость сброса нагрузки ТГ за счет перекрытия поступления пара в цилиндры низкого давления (ЦНД), аккумулированного в сепараторах-пароперегревателях (СПП). С другой стороны, продолжительное закрытие РЗ может привести к чрезмерному (вплоть до критических величин) повышению давления пара в СПП.

Предварительный аналитический расчет возможности проведения ИР на турбине К-1000-60/1500-2 был выполнен ОАО «Турбоатом». По результатам расчета был сделан вывод о возможности внедрения режима ИР на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС. Кроме этого, в ходе исследований были рекомендованы амплитуда и длительность импульса форсирующего тока на ЭГП. Результаты этого расчета были использованы, как отправная точка при выполнении этапа испытания электрогидравлической системы регулирования (ЭГСР) турбины в режиме имитации импульсной разгрузки ТГ.

Был проведен анализ алгоритмов технологических защит и блокировок турбинного отделения с целью выявления и устранения вероятных ложных и некорректных срабатываний алгоритмов в процессе протекания режима ИР. Результатом этой работы стали разработка и внедрение на энергоблоке Ростовской АЭС ряда технических решений по корректировке алгоритмов технологических защит и блокировок турбинного отделения. В частности на время процесса ИР ТГ (20 секунд) были исключены переводы слива конденсата греющего пара подогревателя низкого давления (ПНД), конденсатосборника (КС-1) СПП, сепаратосборника (СС) СПП и команды на открытие рециркуляции конденсатного электронасоса (КЭН-2) и клапана импульсного соленоидного (КИС).

Этап испытания ЭГСР турбины в режиме имитации импульсной разгрузки ТГ на остановленной турбине проводился на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС и состоял из серии экспериментов, целью которых было определение возможности проведения ИР на аппаратуре ТПТС51 (производство ФГУП «ВНИИА») для энергоблока № 2, а также экспериментальное уточнение параметров, характеризующих режим ИР.

В ходе испытаний на ЭГП из ЭГСР подавался импульс форсирующего тока различной длительности и амплитуды при различной исходной степени открытия РК, соответствующей различному исходному уровню электрической мощности ТГ.

По результатам проведения испытаний ЭГСР турбины К-1000-60/1500-2 в режиме имитации

ИР ТГ был сделан вывод, что алгоритмы ИР ТГ, реализованные в ЭГСР на аппаратуре ТПТС51, являются работоспособными, программно-технические особенности аппаратуры не препятствуют проведению испытаний по ИР ТГ на действующем оборудовании.

Также были уточнены рекомендуемые параметры настройки амплитуды и длительности форсирующего тока. Окончательные параметры настроек алгоритмов ИР должны быть уточнены по результатам проведения испытаний ИР ТГ на действующем оборудовании.

Необходимо отметить, что в результате испытаний было определено значение форсирующего тока при различной исходной степени открытия РК, при котором не производится закрытие РЗ турбины. Было принято решение, что на первых испытаниях величину форсирующего тока необходимо выбирать исходя из условия недопущения закрытия РЗ. Решение о закрытии РЗ для увеличения скорости снижения мощности ТГ принять после рассмотрения результатов испытаний «Системным оператором».

19.05.2010 г. на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС были проведены испытания ТГ в режиме ИР. Испытания проводились на уровне мощности 450 МВт. Иницирующим сигналом был сигнал «ИР 30%», выдаваемый с ОРУ Ростовской АЭС, то есть снижение мощности должно было составить 30 % от номинальной – (300 МВт). Величина форсирующего тока была установлена равной 300 мА, время удержания форсирующего тока – 0,5 с. Характеристики форсирующего тока представлены на рис. 1.



Рис. 1. График зависимости электрической мощности от импульса форсирующего тока на ЭГП при проведении испытаний режима «ИР 30 %» на уровне исходной мощности 450 МВт

В соответствии с результатами испытаний мощность генератора была снижена на величину 200 МВт за 1, 2 секунды, с 450 МВт до 250 МВт (рис. 1), при этом скорость снижения мощности ТГ составила 167 МВт/с. Затем мощность генератора за 9 секунд снизилась до 90 МВт. После окончания режима ИР через 30 секунд уровень мощности генератора составил 400 МВт.

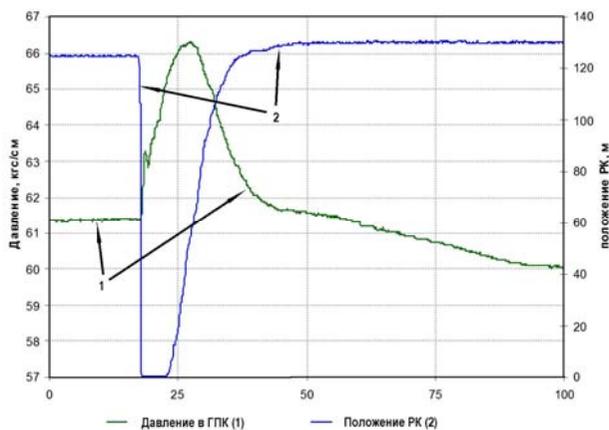


Рис. 2. Давление пара в ГПК и положение РК ЦВД при проведении испытаний режима «ИР 30 %» на уровне исходной мощности 450 МВт

На рис. 2 показан график изменения давления пара в ГПК и положения РК ЦВД во время проведения испытаний. Из графика видно, что аварийная уставка по давлению пара в ГПК 67 кгс/см², при срабатывании которой производится открытие РК быстродействующей редукционной установки отвода пара в конденсатор (БРУ-К), достигнута не была. Кроме этого, на время восстановления мощности ТГ и заброс давления пара в ГПК значительно повлияло то, что во время работы режима ИР РК ЦВД были закрыты в течение 5 секунд.

Очевидным является тот факт, что уменьшение времени режима ИР позволит значительно уменьшить заброс давления пара в ГПК, поэтому было решено изменить форму восстановления форсирующего тока (красная линия на рис. 1), благодаря чему время прохождения режима ИР при последующих динамических испытаниях сократилось с 30–40 до 5–10 секунд.

Учитывая, что открытие РК ЦВД начинается только после восстановления тока на ЭГП до величины, при которой «всплывают» отсечные золотники, было предложено сразу же после снятия форсирующего тока ИР восстанавливать ток на ЭГП до значения 120 мА (рисунок 1), что при исходной мощности 450 МВт соответствует величине «всплытия» отсечных золотников.

После внесения корректировок по результатам испытания на уровне мощности реакторной установки (РУ) 50 % $N_{НОМ}$ были проведены динамические испытания энергоблока в режиме импульсной разгрузки на 30 % $N_{НОМ}$ на уровне мощности РУ 75 % $N_{НОМ}$. Исходное состояние:

- автоматический регулятор мощности реактора (АРМР) в режиме «Н»;
- ЭГСР в режиме поддержания давления «РД-1»;
- давление пара в ГПК = 60,6 кгс/см²;
- электрическая мощность ТГ = 693,6 МВт;
- положение сервомоторов РК11,12 = 162,75 мм, РК13,14 = 165,96 мм.

По факту поступления команды от противоаварийной автоматики на импульсную разгрузку ТГ в ЭГСР сформировался форсирующий ток на закрытие

регулирующих клапанов величиной 350 мА длительностью 0,3 секунды с последующим снятием форсирующего тока до 120 мА. Степень открытия регулирующих клапанов по факту поступления в ЭГСР сигнала ИР уменьшилась с исходного значения 162 мм до 51 мм (главный сервомотор (ГСМ 1)) и 73 мм (ГСМ 2) за 0,5 - 0,7 секунды. Время снижения электрической мощности ТГ с исходного уровня (689 МВт) до минимального значения (383 МВт) составило 0,7 секунды. Далее по мере снятия удерживающего тока происходило открытие регулирующих клапанов до исходного положения. После полного снятия удерживающего тока произошло прикрытие регулирующих клапанов на 4 мм, что привело к снижению скорости восстановления электрической мощности ТГ. Время открытия регулирующих клапанов до исходного положения составило $\approx 7,4$ секунды. Электрическая мощность ТГ на момент снятия форсирующего тока составила 606 МВт.

По признаку ИР импульсной командой длительностью 3 секунды БРУ-К принудительно открылись до положения ≈ 35 %, сформировался режим сброса нагрузки, далее регулятор БРУ-К работал в соответствии с алгоритмом сброса нагрузки, при этом давление в ГПК увеличилось с 60,6 кгс/см² до 62,3 кгс/см². По факту работы регулятора БРУ-К ЭГСР переключилась в режим «РМ». После полного закрытия всех РК БРУ-К ЭГСР перешла в режим регулятора номинального давления («РД-1») с заданным значением по давлению равным 62,2 кгс/см². Электрическая мощность ТГ при переходе ЭГСР в режим «РД-1» составила 626 МВт. Дальнейшее увеличение электрической мощности ТГ до исходного уровня могло бы быть обеспечено за счет приведения текущего давления в ГПК к заданному значению давления в ГПК, записанному в момент поступления команды ИР.

После снятия режима ИР 30 % текущая мощность не соответствовала исходному значению мощности до момента поступления команды ИР. Причиной такого несоответствия стало то, что давление в ГПК после снятия режима ИР не соответствовало значению давления до момента поступления команды ИР. Для восстановления мощности ТГ до исходного уровня (при условии отсутствия изменения нейтронной мощности РУ) было реализовано «замораживание» текущей уставки давления в ГПК в момент поступления команды на ИР ТГ, до полного закрытия БРУ-К при условии, что АРМР не изменял режима работы. Графики электрической мощности генератора, давления пара в ГПК, положение сервомотора (СМ) РК приведены на рис. 3, 4.

С учетом внесения корректировок в алгоритм формирования ИР по результатам испытания на уровне мощности РУ 50 % $N_{НОМ}$ и 75 % $N_{НОМ}$, были проведены динамические испытания энергоблока в режиме импульсной разгрузки на 50 % $N_{НОМ}$ на уровне мощности РУ 100 % $N_{НОМ}$. Исходное состояние перед началом испытания следующие:

- АРМР в режиме «Н»;
- ЭГСР в режиме поддержания давления «РД-1»;
- давление пара в ГПК равно 60,01 кгс/см²;
- электрическая мощность ТГ равна 1000,7 МВт;
- положение сервомоторов РК11,12 равно 224,46 мм, РК13,14 равно 229,22 мм.

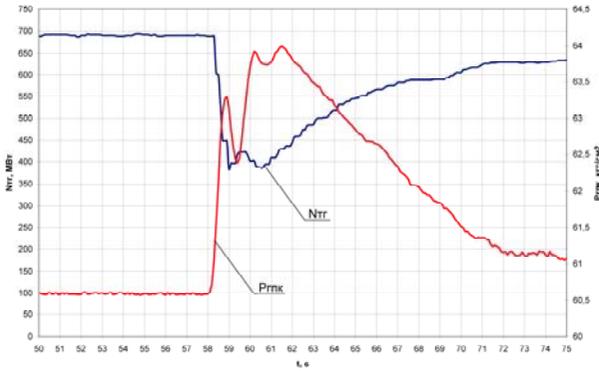


Рис. 3. Электрическая мощность ТГ и давление пара в ГПК

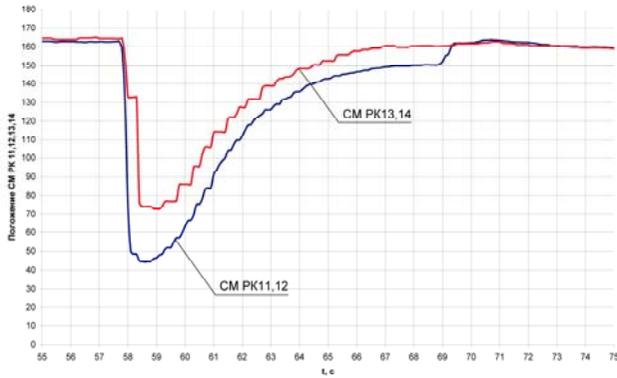


Рис. 4. Положение сервомоторов РК 2SE11,12,13,14S01

По факту поступления команды от ПАА на ИР ТГ в ЭГСР сформировался форсирующий ток на закрытие РК величиной 500 мА и длительностью 0,3 секунды с последующим снятием форсирующего тока до 120 мА. Степень открытия РК по факту поступления в ЭГСР сигнала ИР уменьшилась с исходного значения 224,46 мм (ГСМ-1) и 229,22 мм (ГСМ-2) до 10,80 мм (ГСМ-1) и 42,82 мм (ГСМ-2) за 0,42 секунды. Время снижения электрической нагрузки ТГ с исходного уровня (1000,7 МВт) до минимального (504,88 МВт) составило 0,71 секунды, что соответствует скорости 690 МВт/с. Далее, по мере снятия удерживающего тока, происходило открытие РК до исходного положения. Время открытия РК до исходного положения составило ≈ 10 секунд. Электрическая мощность ТГ на момент снятия форсирующего тока составила 950 МВт. По команде из алгоритма ИР импульсной командой длительностью 5 секунд РК БРУ-К принудительно открылись до

положения ≈ 41 %, при этом давление в ГПК увеличилось с 60,01 кгс/см² до 64 кгс/см².

Время от момента выдачи сигнала «ИР» на ОРУ блока вспомогательного сооружения (БВС) до момента выдачи форсирующего тока из ЭГСР составило 0,2 с. Время от момента выдачи сигнала «ИР» на ОРУ БВС до закрытия регулирующих клапанов составило 0,66 с. В ходе анализа полученных результатов испытания установлено, что показатели качества прохождения ИР улучшены по сравнению с результатами предыдущих испытаний. Графики электрической мощности генератора, давления пара в ГПК, положение СМ РК приведены на рис. 5, 6.

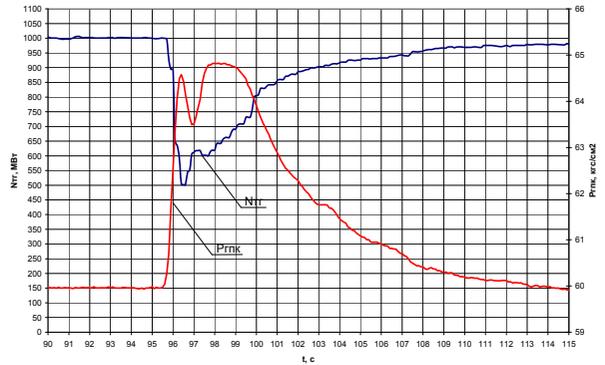


Рис. 5. Электрическая мощность ТГ и давление пара в ГПК

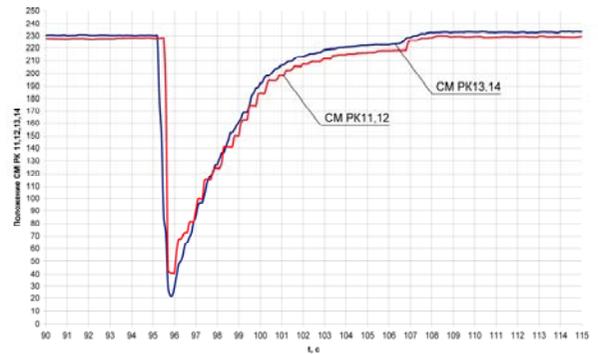


Рис. 6. Положение сервомоторов РК 2SE11,12,13,14S01

При прохождении сигнала ИР на мощности энергоблока 100 % от номинальной, производится отключение подогревателя высокого давления (ПВД), а также производится перевод питания паром основных потребителей с отборов от турбины на отбор от коллектора собственных нужд (КСН). В связи с этим был реализован алгоритм запрета перевода сливов на время прохождения сигнала ИР.

По результатам проведения динамических испытаний по реализации ИР на уровнях мощности РУ 50, 75 и 100 % от номинальной, параметры, характеризующие режим ИР (величина форсирующего тока, время удержания форсирующего тока, величина тока после окончания времени удержания форсирующего

тока, постоянная времени экспоненциальной части стекания тока по окончании удержания форсирующего тока) были аппроксимированы в зависимости от исходного уровня электрической мощности в момент формирования инициирующего сигнала ИР в диапазоне электрической мощности от 30 до 100 % от номинальной и внесены в алгоритм формирования ИР.

По итогам динамических испытаний предъявляемые «Системным оператором» критерии протекания ИР выполнены. Можно сделать вывод об успешном выполнении работ по внедрению режима ИР на энергоблоке № 2 Ростовской АЭС. Тем не менее, одним из основных направлений в усовершенствовании алгоритма протекания ИР является сокращение

времени реакции программного технического комплекса (ПТК) ЭГСР на инициирующий сигнал ИР и последующее формирование форсирующего тока на ЭГП до 50 мс. Решение данной проблемы связано с разработкой новых аппаратных средств. Работы в этом направлении в настоящее время ведутся.

Основываясь на опыте проведения работ по внедрению режима ИР на энергоблоке № 3 Калининской АЭС и энергоблоке № 2 Ростовской АЭС, в будущем будут проведены работы по внедрению режима ИР на всех действующих атомных энергоблоках России. В настоящее время ведутся работы по внедрению режима ИР на энергоблоке № 1 Ростовской АЭС.