Научная статья
Original article
УДК 002.304

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ПУСКА И ОСТАНОВА ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

RELIABILITY ANALYSIS OF GAS TURBINE STARTING DEVICES

Тимофеев Александр Андреевич, Студент магистратуры 2 курс, кафедра Электрические станции, НИУ «МЭИ», Россия, г. Москва
Кощеева Анна Григорьевна, Студентка магистратуры 2 курс, кафедра Электрические станции, НИУ «МЭИ», Россия, г. Москва

Timofeev Alexsander Andreevich, 2nd year master's student, Department of Power Plants, National Research University "MPEI", Russia, Moscow
Koshcheeva Anna Grigorevna, 2nd year master's student, Department of Power Plants, National Research University "MPEI", Russia, Moscow

Аннотация: Разработаны модели надежности типовых схем пусковых устройств газотурбинных установок. Проведено исследование надежности рассмотренных схем с учетом технологической части. Получены результаты расчета показателей надежности указанных схем и обоснована необходимость учета надежности пусковых устройств в общем анализе надежности газотурбинных и парогазовых установок.

Annotation: Models of reliability of typical schemes of starting devices for gas turbine plants have been developed. A study of the reliability of the considered schemes was carried out, taking into account the technological part. The results of calculating the reliability indicators of these schemes are obtained and the necessity

of taking into account the reliability of starting devices in the general analysis of the reliability of gas turbine and combined cycle plants is substantiated.

Ключевые слова: надежность, газотурбинная установка, парогазовая установка, пусковое устройство, SAIDI.

Keywords: Reliability, gas turbine plant, combined cycle plant, starting device, SAIDI.

На данный момент газотурбинные (ГТУ) и парогазовые установки (ПГУ) являются наиболее динамично развивающимися генерирующими установками. Средний КПД ГТУ составляет 35-36 % [1], однако, уже сегодня имеются тенденции к его росту. Вместе с тем ситуация кардинально изменяется при использовании энергии уходящих газов в теплофикационных установках, например, котле-утилизаторе или сетевом подогревателе. КПД парогазовых установок ПГУ доходит до 60 %.

Рост числа ПГУ и ГТУ на электрических станциях, приводит к необходимости расчета и оценки надежности их пуска и останова. Особенностью данных расчетов является необходимость учета надежности, как электрической, так и технологической части.

Показатель надежности генерирующей установки.

В качестве критерия оценки надежности применялись эквивалентные продолжительности отключения SAIDI (System average interruption duration index) [2] рассмотренных способов пуска ГТУ, как наиболее существенный параметр, характеризующий убытки генерирующих компаний от недополученной прибыли на оптовом рынке электроэнергии в результате неудачного пуска или останова ГТУ и ПГУ.

В качестве расчетных событий, вызывающих отключение генерирующей установки, рассматривались одиночные отказы, приводящие к аварийным ремонтам, а также плановые ремонты. В данной работе расчет надежности пусковых устройств ГТУ производился таблично-логическим

методом [3]. Таблично-логический метод позволяет производить поочередное рассмотрение отказов элементов схем с выявлением их последствий в нормальном и ремонтном режимах. Построение таблицы событий и состояния организует целенаправленный перебор отказов и неработоспособных состояний элементов схемы. Параметризация расчетной модели для пусковых устройств ГТУ проводилась на основе [3, 4, 5, 8]. Параметры надежности элементов пусковых установок ГТУ приведены в таблице 1.:

$\omega, [1/год]$ – параметр потока отказов;

$T_в, [ч]$ – среднее время восстановления;

$\mu_{пл.}, [1/год]$ – средняя частота плановых отключений;

$T_{пл.}, [ч]$ – средняя длительность одного планового отключения.

Таблица 1. Параметры надежности элементов пусковых устройств для ГТУ

Элемент схемы	$\omega, [1/год]$	$T_в, [ч]$	$\mu_{пл.}, [1/год]$	$T_{пл.}, [ч]$
Выключатель 6 кВ	0.0438	10.95	2.2	14.9
Система сборных шин 6 кВ	0.003	5	0.166	5
Асинхронный электродвигатель мощностью более 2 МВт	0.2	140	0,25	384
Токоограничивающий реактор	0.05	4	0.33	10
Трансформатор мощностью до 7.5 МВА (6 кВ)	0.08	120	0.25	8
Паровая турбина для пуска ГТУ	1.56	37.2	2.67	292
Котлоагрегат паропроизводительностью 255 кгс/см^2. Для паросиловой установки	8.4	80	2.67	295.3
Турбина (240 кгс/см^2). Для паросиловой установки	1.216	71	2.67	292

Типовая схема ГТУ.

Традиционная современная газотурбинная установка — это совокупность воздушного компрессора, камеры сгорания и газовой турбины, а также вспомогательных систем, обеспечивающих ее работу. Совокупность ГТУ и электрического генератора называют газотурбинным агрегатом [6]. На рис. 1 показана принципиальная схема простейшей ГТУ.

Парогазовыми называются энергетические установки, в которых теплота уходящих газов ГТУ прямо или косвенно используется для выработки электроэнергии в паротурбинном цикле. Газы, уходящие из ГТУ поступают в котел-утилизатор - теплообменник противоточного типа, в котором за счет теплоты горячих газов генерируется пар высоких параметров, направляемый в паровую турбину [6]. Запуск ПГУ начинается с пуска ГТУ. Данный факт обусловливают необходимость проведения анализа надежности пускового устройства и для ПГУ.

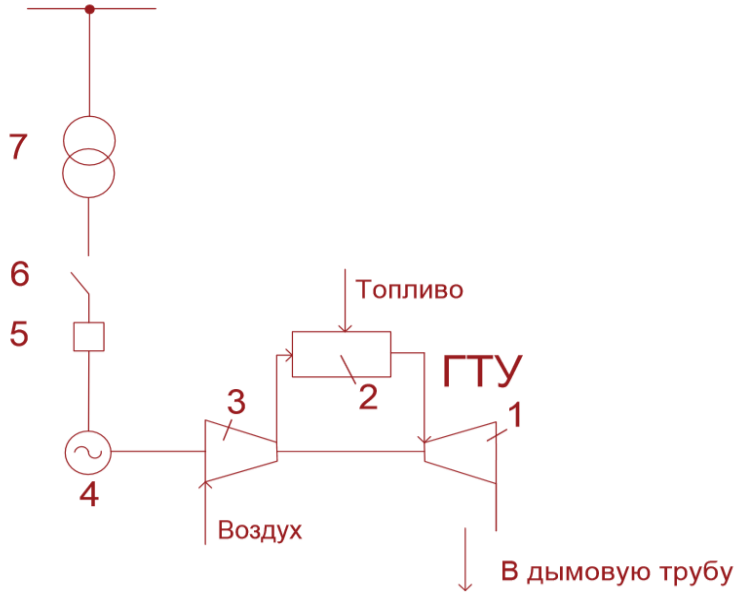


Рисунок 1. Расчетная схема для оценки надежности ГТУ:

1 - газовая турбина; 2 - камера сгорания; 3 - компрессор; 4 - генератор;

5 - выключатель; 6 - разъединитель; 7 – трансформатор

Способы пуска ГТУ.

Режим пуска представляет собой вывод ГТУ на минимальный режим устойчивой работы. Для этого необходим внешний источник энергии. Это объясняется тем, что до начала вращения ротора ГТУ невозможно зажечь топливо в камере сгорания. При малых частотах вращения газовой турбины (ГТ) создаваемый ею крутящий момент меньше момента, необходимого для вращения компрессора. При определенной частоте вращения моменты вращения компрессора и ГТ выравниваются, и только после этого можно отключить пусковое устройство (стартер). В качестве стартера можно использовать электродвигатель, двигатель внутреннего сгорания, сжатый воздух из специального резервуара, перевод электрогенератора ГТУ в режим двигателя с помощью тиристорного пускового устройства (ТПУ) и др. Последний способ все чаще применяется на современных крупных энергетических ГТУ.

Мощность пускового устройства расходуется на покрытие разности моментов вращения турбины и компрессора, а также на разгон ротора ГТУ. В течение всего периода пуска, его мощность должна значительно превосходить недостающую мощность на валу ГТУ, чтобы уменьшить время запуска [6].

Пуск ГТУ с помощью тиристорного пускового устройства.

Тиристорные пусковые устройства (ТПУ) получили широкое распространение в отечественной и зарубежной энергетике для частотного пуска газотурбинных установок. В основе ТПУ — трехфазная, шестипульсная схема преобразователя выпрямитель-инвертор со звеном постоянного тока. Задача пускового устройства — разгон турбоагрегата генератором в режиме двигателя до частоты вращения турбины (≈32 %), продолжение разгона совместно с турбиной в режиме ограничения момента и мощности и автоматическое отключение при частоте вращения ≈65 % [6].

Мощность ТПУ составляет 5-7 % от мощности ГТУ. Каждое ТПУ на ТЭС должно использоваться, как правило, для пуска-останова нескольких агрегатов. Необходимое количество ТПУ должно определяться в каждом

конкретном случае исходя из одновременности и продолжительности их использования. Дополнительным преимуществом ТПУ является возможность длительной обкатки турбокомпрессоров при любом числе оборотов в пределах допустимой мощности энергосистемы.

Пуск ГТУ с помощью электродвигателей.

Для пуска ГТУ вместо ТПУ можно использовать разгонный электрический двигатель. В ГТУ малой и средней мощностей различных назначений широко используют их пуск электродвигателями постоянного тока с питанием от аккумуляторных батарей. В качестве резервного пускового устройства могут использоваться двигатели внутреннего сгорания.

Пуск ГТУ с помощью паровой турбины.

Пусковые паровые турбины имеют весьма благоприятные характеристики крутящего момента в функции числа оборотов — максимальный крутящий момент развивается при пуске с места.

Использование паровых турбин может быть оправдано в случаях, когда имеется источник пара. Подобные турбины очень просты по конструкции, имеют малую массу при значительной мощности, но требуют наличия источника пара и конденсатора; выпуск отработавшего пара в атмосферу не исключен, хотя он и связан с необратимыми потерями конденсата. Паротурбинный пуск допускает возможность обкатки турбокомпрессора при малых числах оборотов без ограничения времени [6].

Типовые схемы подключения пусковых устройств.

В ходе расчета эквивалентной продолжительности отключения типовых пусковых устройств ГТУ были рассмотрены следующие типовые схемы:

- схема пуска ГТУ с помощью ТПУ (рис.2);
- схема пуска ГТУ с помощью электродвигателя (рис.3);
- схема пуска ГТУ с помощью паровой турбины (рис.4).

Питание ТПУ и электродвигателя в рассматриваемой схеме осуществляется от секций 6 кВ рабочего питания с.н. энергоблоков. Питание взаиморезервируемых ТПУ должно осуществляться от разных энергоблоков.

Подключение ТПУ к источникам питания, где имеется другая нагрузка, должно выполняться только через разделительные двухобмоточные трансформаторы.

Перед плановым включением ТПУ или электродвигателя напряжением 6 кВ, питающую этих потребителей электроэнергией, секции 6 кВ необходимо перевести на питание от резервного трансформатора, т.е. на магистраль резервного питания, чтобы избежать дефицита активной мощности, вызывающего глубокое снижение частоты [7].

Расчет эквивалентной продолжительности отключения типовой схемы пуска ГТУ с помощью ТПУ.

В ходе расчета была рассмотрена типовая схема пуска ГТУ с помощью ТПУ. При расчете надежности учитывались следующие элементы: секция сборных шин (6 кВ), автоматический выключатель трансформатора, трансформатор для гальванической развязки ТПУ и собственных нужд станции, разъединитель, ТПУ, выключатель ТПУ, токоограничивающий реактор. Так как данная схема является последовательной, то отказ или ремонт одного из элементов приведет к неработоспособности (отказу) данной типовой схемы пуска ГТУ.

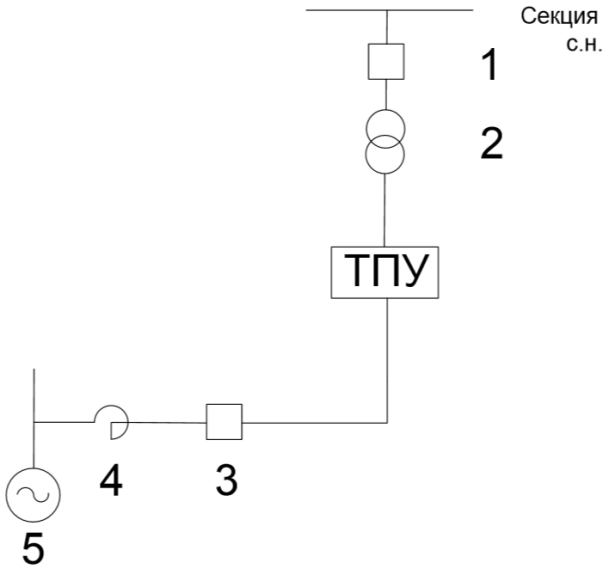


Рис. 2. Расчетная схема для оценки надежности типовой схемы пуска ГТУ с помощью ТПУ:

1- автоматический выключатель трансформатора; 2 - трансформатор; 3 – выключатель ТПУ; 4 - токоограничивающий реактор; 5 – генератор

Согласно [8] средняя наработка на отказ ТПУ, вызванная выходом из строя силовых тиристорных модулей, составляет 25000 ч. У восстанавливаемых элементов параметр потока отказов (среднее число отказов), 1/год, определяется как плотность вероятности возникновения отказов за рассматриваемый период, т.е.

$$\omega = m/nT,$$

где m – число отказов наблюдаемых n элементов за время T [3].

$$\omega_{\text{ТПУ}} = 0.33$$

Эквивалентная продолжительность восстановления после отказа элементов схемы по результатам расчетов составила 42 ч/год.

Согласно [3] вид ремонта должен определяться видом ремонта входящей в его состав установки, имеющей наибольший объем ремонтных работ и определяющей продолжительность ремонта. В типовой схеме пуска ГТУ с помощью ТПУ наибольший объем ремонтных работ занимает трансформатор. Данное требование одновременного планового ремонта последовательно соединенных элементов является всегда экономически оправданным [3].

$$T_{\text{пл}} = 48 \text{ ч/год}$$

В результате расчетов эквивалентная продолжительность отключения типовой схемы пуска ГТУ с помощью ТПУ (SAIDI) составила 90 ч/год.

Расчет эквивалентной продолжительности отключения типовой схемы пуска ГТУ с помощью асинхронного электрического двигателя.

В ходе расчета была рассмотрена типовая схема пуска ГТУ с помощью асинхронного электрического двигателя. При расчете надежности учитывались следующие элементы: секция сборных шин (6 кВ), автоматический выключатель, асинхронный электрический двигатель. Так как данная схема является последовательной, то отказ или ремонт одного из элементов приведет к неработоспособности (отказу) данной типовой схемы пуска ГТУ.

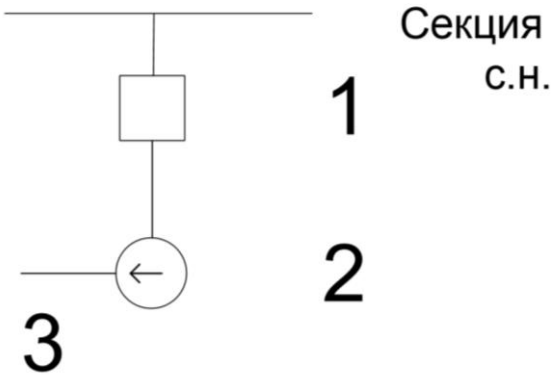


Рис. 3. Расчетная схема для оценки надежности типовой схемы пуска ГТУ с помощью асинхронного электрического двигателя:
1- автоматический выключатель; 2 - асинхронный электрический двигатель; 3 – выходной конец вала к электрогенератору ГТУ

Эквивалентная продолжительность восстановления после отказа элементов схемы составила 29 ч/год.

В данной типовой схеме пуска ГТУ наибольший объем работ при плановом ремонте требуется для асинхронного электрического двигателя.

$$T_{\text{пл}} = 96 \text{ ч/год}$$

В результате расчетов эквивалентная продолжительность отключения (SAIDI) составила 125 ч/год.

Расчет эквивалентной продолжительности отключения типовой схемы пуска ГТУ с помощью паровой турбины.

В ходе расчета была рассмотрена типовая схема пуска ГТУ с помощью паровой турбины. При расчете надежности учитывались следующие элементы: паропровод, паровая турбина. Так как данная схема является последовательной, то отказ или ремонт одного из элементов приведет к неработоспособности (отказу) данной типовой схемы пуска ГТУ.

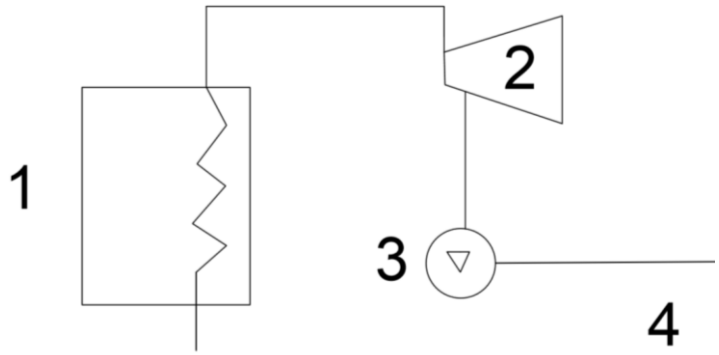


Рис. 4. Расчетная схема для оценки надежности типовой схемы пуска ГТУ с помощью паровой турбины:
1- котлоагрегат; 2 – паровая турбина паросиловой установки; 3 – паровая турбина для пуска ГТУ; 4 – выходной конец вала к электрогенератору ГТУ

Эквивалентная продолжительность восстановления после отказа элементов схемы по результатам расчетов составила 134 ч/год

Основываясь на данных, приведенных в таблице 1., была рассчитана средняя продолжительность ремонта паросиловой установки, которая составляет 784 ч/год.

$$T_{\text{пл}} = 784 \text{ ч/год}$$

В результате расчетов эквивалентная продолжительность отключения (SAIDI) составила 918 ч/год.

Выводы:

1. Проанализированы способы пуска ГТУ и рассмотрены типовые схемы подключения пусковых устройств ГТУ;
2. Произведен расчет эквивалентной продолжительности отключения рассмотренных типовых схем пуска ГТУ;
3. Результат расчетов эквивалентной продолжительности отключения типовой схемы пуска ГТУ с помощью ТПУ составил 90 ч/год, типовой схемы пуска ГТУ с помощью асинхронного электрического двигателя – 125 ч/год. SAIDI типовой схемы пуска ГТУ с помощью паровой турбины - 918 ч/год, что в 9 раз больше, чем у вышеописанных вариантов. Основное

снижение надежности данной схемы происходит из-за паровой турбины паросиловой установки, так как во время её планового ремонта пуск ГТУ будет невозможен в независимости от состояния работоспособности паропровода и паровой турбины для пуска ГТУ.

Литература

1. Основы современной энергетики: Учебник для вузов. В двух частях // Под общей редакцией чл.-корр. РАН Е.В. Аметистова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М: Издательство МЭИ, 2003
2. IEEE Standard 1366-1998, "IEEE trial-use guide for electric power distribution reliability indices", April 1999.
3. Трубицын В.И. Надежность электростанций: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 240 с.
4. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
5. Непомнящий В.А. Надежность оборудования энергосистем. – М.: издательство журнал «Электроэнергия. Передача и распределение», 2013. - 196 с.
6. Электрическая часть электростанций с газотурбинным и парогазовыми установками: учебное пособие для вузов / В.В. Жуков. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 519 с.
7. Автоматика электроэнергетических систем: Учеб. пособие для вузов/ О.П. Алексеев, В.Е. Казанский, В.Л. Козис и др.; Под редакцией В.Л. Козиса и Н.И. Овчаренко. – М.: Энергоиздат, 1981. – 480 с.
8. Каталог устройств и систем плавного пуска электродвигателей напряжением 3...10 кВ и мощностью до 17 МВт. Издание 9. 2016 – 32 с

Literature

1. Fundamentals of modern energy: Textbook for universities. In two parts // Under the general editorship of the corresponding member. RAS E.V. Ametistova. - 2nd ed., reprint. and add. - M: Publishing House of MEI, 2003
2. IEEE Standard 1366-1998, "IEEE trial-use guide for electric power distribution reliability indices", April 1999.
3. Trubitsyn V.I. Reliability of power plants: Textbook for universities. - M.: Energoatomizdat, 1997. - 240 p.
4. Neklepaev B.N. Electrical part of power plants and substations: Reference materials for course and diploma design: Textbook for universities– - 4th ed., reprint. and additional - M.: Energoatomizdat, 1989. - 608 p.
5. Nepomnyashchy V.A. Reliability of power systems equipment. - M.: publishing house of the journal "Electric Power. Transmission and distribution", 2013. - 196 p.
6. The electric part of power plants with gas turbine combined-cycle gas installations: a textbook for universities / V.V. Zhukov. - M.: Publishing House of MEI, 2015. - 519 p.
7. Automation of electric power systems: Textbook for universities/ O.P. Alekseev, V.E. Kazansky, V.L. Kozis, etc.; Edited by V.L. Kozis and N.I. Ovcharenko. - M.: Energoizdat, 1981. - 480 p.
8. Catalog of devices and systems for soft start of electric motors with a voltage of 3... 10 kV and a capacity of up to 17 MW. Edition 9. 2016 - 32 p.

© Тимофеев А.А., Кощеева А.Г., 2022 Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №4/2022.

Для цитирования: Тимофеев А.А., Кощеева А.Г. АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ПУСКА И ОСТАНОВА ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ// Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №4/2022