



УДК 6621.313.12.017:553

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ РАЗГРУЗКИ ГЕНЕРАТОРОВ В ИЗОЛИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

### DEVELOPMENT OF THE LOAD SHEDDING SYSTEM OF GENERATORS AT AN ISOLATED POWER SYSTEM OF A FIELD

**Бацева Наталья Ленмировна**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент Отделения электроэнергетики и электротехники,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет  
batsevan@tpu.ru

**Валиев Тимур Тофикович**

Заместитель главного инженера по эксплуатации  
ПрЭО «Ямал»,  
ООО «Газпромнефть Энергосистемы»  
Valiev.TT@gazprom-neft.ru

**Федькин Артем Сергеевич**

студент Отделения электроэнергетики и электротехники,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет  
asf21@tpu.ru

**Хошбекян Самвел Мкртчичович**

студент отделения электроэнергетики и электротехники,  
Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет  
smh5@tpu.ru

**Аннотация.** Статья посвящена совершенствованию системы разгрузки газотурбинных агрегатов в изолированной энергетической системе нефтегазоконденсатного месторождения. По результатам проведенных исследований выявлено, что даже совместная работа автоматической частотной разгрузки и дополнительной автоматической разгрузки для ограничения снижения частоты в изолированной энергосистеме месторождения не даёт гарантий прекращения снижения частоты при возникновении возмущения и переходного процесса, поэтому предлагается внедрить систему автоматической быстрой разгрузки с целью сокращения потери добычи углеводородов и собственных нужд станции.

**Ключевые слова:** нефтегазоконденсатное месторождение, изолированная энергосистема, газотурбинная электростанция, газотурбинный агрегат, автоматическая частотная разгрузка, дополнительная автоматическая разгрузка, система автоматической быстрой разгрузки.

**Batseva Natalia Lenmirovna**

Ph. D., Associate Professor  
of Power Engineering Department,  
National Research  
Tomsk Polytechnic University  
batsevan@tpu.ru

**Valiev Timur Tofikovich**

Deputy Chief Engineer for Operation  
of the Yamal PSP,  
Gazpromneft Power Systems LLC  
Valiev.TT@gazprom-neft.ru

**Fedkin Artem Sergeevich**

Student of Power Engineering Department,  
National Research  
Tomsk Polytechnic University  
asf21@tpu.ru

**Khoshbekyan Samvel Mkrтчichovич**

Student of Power Engineering Department,  
National Research  
Tomsk Polytechnic University  
smh5@tpu.ru

**Annotation.** This paper demonstrates the developed load shedding system of gas turbine units in an isolated power system of an oil and gas condensate field. The results show that even combined operation of an under-frequency load shedding and supplementary automatic load shedding does not guarantee the termination of the frequency decreasing, if a disturbance and transient process are appeared in an isolated power system. Therefore, it is suggested to implement the automatic power decay system to avoid losses of the hydrocarbon extraction and station auxiliaries.

**Keywords:** oil and gas condensate field, isolated power system, gas turbine power plant, gas turbine unit, under-frequency load shedding, supplementary automatic load shedding, automatic power decay system.

В изолированных энергосистемах (ЭС) нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ) для выработки электроэнергии и мощности используются высокоманевренные газотурбинные агрегаты (ГТА). Для предотвращения недопустимого снижения частоты и её восстановления при возникновении дефицита генерирующих мощностей в таких ЭС применяют автоматическую частотную разгрузку (АЧР) [1]. При протекании переходного процесса дефицит активной мощности может достигать 45-и % от суммарной мощности нагрузки. Поэтому при скорости снижения частоты в 1,5–2 Гц/с работа АЧР не может прекратить снижение частоты. Если имеется угроза возникновения большого дефицита активной мощности, а скорость снижения частоты велика, то используют дополнительную автоматическую разгрузку (ДАР) [2], которая срабатывает до начала работы АЧР. К сожалению, даже совместная работа АЧР и ДАР не гарантирует предотвращение снижения частоты при возникновении возмущений в изолированных ЭС НГКМ.



Для доказательства этого утверждения была проведена серия экспериментов на модели изолированной ЭС существующего месторождения, где центром питания является газотурбинная электростанция (ГТЭС), в составе которой работают 6 ГТА суммарной мощностью 96 МВт.

В качестве примера приведен эксперимент со следующими условиями: схема ЭС НГКМ – нормальная; в работе 4 ГТА – №№ 1, 4, 5 и 6; в ремонте 2 ГТА – № № 2 и 3; суммарная активная мощность нагрузки – 48 МВт. Потребителями являются кустовые площадки НГКМ, заведённые под ДАР и АЧР.

При возникновении возмущения на шинах 35 кВ ГТЭС происходит аварийный останов ГТА №№ 4 и 5 и наброс нагрузки на ГТА №№ 1 и 6.

Согласно режимной карте центрального диспетчерского управления (ЦДУ) ЭС НГКМ, работа АЧР начинается с уставки 47,8 Гц с разницей по частоте между соседними ступенями в 0,1 Гц. Уставка по времени у ступеней принята в диапазоне 0,2–0,6 с. Объём отключаемой нагрузки в узлах ЭС введен согласно режимной карте.

Начальная уставка для работы ДАР определялась по методике из [3] и равна 49,3 Гц. Скорость снижения частоты составляет 1,5 Гц/с, а уставка по времени – 0,1 с.

Моделирование схемы ЭС, автоматики и протекания процесса осуществлялось в программном модуле RUSTab программно-вычислительного комплекса RASTRWIN3 [4]. Работа АЧР и ДАР запрограммирована во вкладках «Логика» и «Действия» подсистемы «Автоматика». Управляющие воздействия, направленные на отключение или ограничение нагрузочных мощностей кустовых площадок, задавались во вкладке «Действия».

Результаты эксперимента представлены на рисунках 1 и 2.

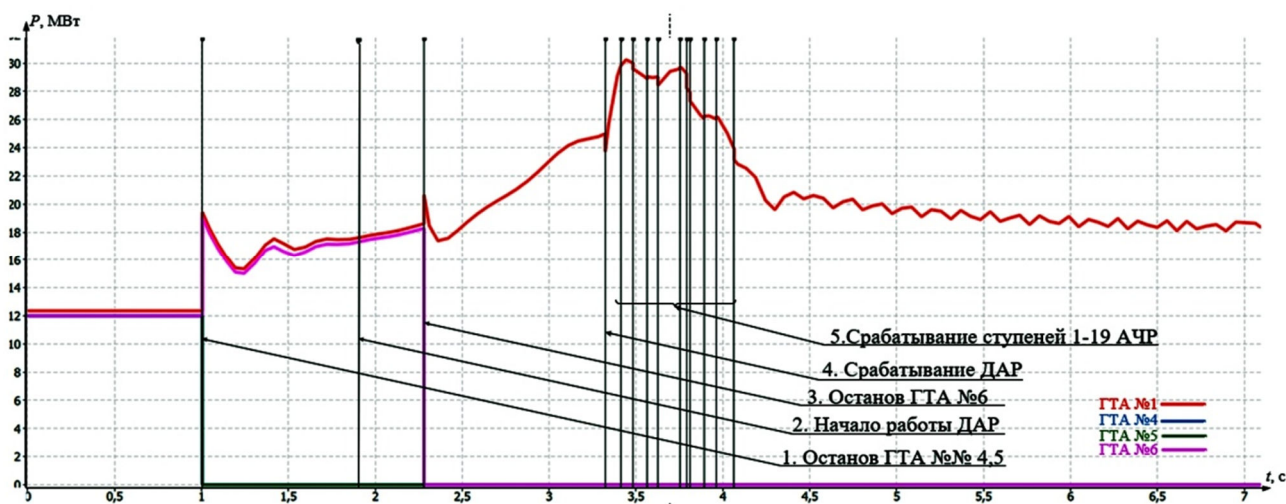


Рисунок 1 – График загрузки ГТА № № 1, 4, 5 и 6

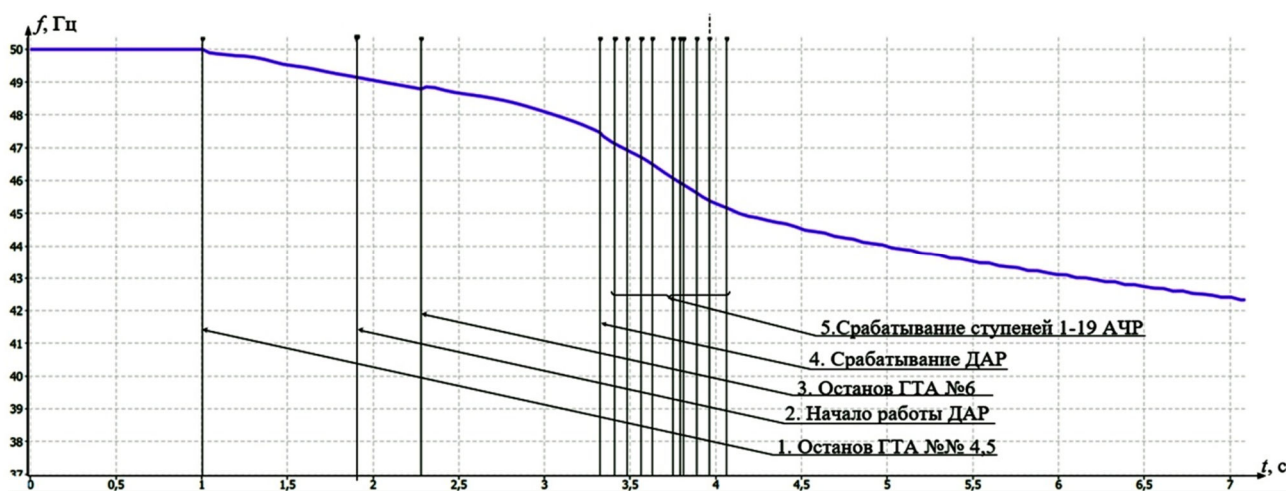


Рисунок 2 – График зависимости частоты от времени для ЭС

Согласно рис. 1 в начале переходного процесса при  $t = 1$  с происходит аварийный останов ГТА № № 4 и 5. Потеря генерируемой мощности приводит к набросу мощности на оставшиеся в работе ГТА № № 1 и 6, частота в системе начинает снижаться и на 1.74 с достигает значения 49.3 Гц, ДАР



начинает реагировать на скорость снижения частоты. На 2.28 с при снижении частоты до 48.8 Гц ГТА № 6 аварийно отключается защитой от минимальной частоты. На 3.32 с при частоте 47.47 Гц срабатывает ДАР и отключает часть мощности нагрузки. Мощность, генерируемая ГТА № 1, продолжает расти, а частота – уменьшаться. На 3.41 с при частоте 47.12 Гц срабатывает первая ступень АЧР, мощность нагрузки снижается, дефицит генерируемой мощности уменьшается, но баланса мощности достичь не удается, частота продолжает снижаться, что приводит к останову ГТА.

Согласно осциллограммам (рис. 1 и 2), можно сказать, что совместная работа АЧР и ДАР не предотвращает снижение частоты в ЭС, поэтому предлагается к использованию система автоматической быстрой разгрузки (АБР) с продолжительным и непрерывным режимом работы.

В [5] описана система автоматического противоаварийного управления нагрузкой в изолированно работающей ЭС, которая отличается от предлагаемой системы АБР отсутствием контроля сигнала о закрытии отсечного газового клапана (ОГК). В предложенной системе предусмотрен постоянный контроль сигнала от ОГК, и алгоритм системы запускается при получении сигнала о его закрытии. Помимо этого, схема работы предлагаемой системы АБР (рис. 3) отличается от описанной в [5] схемы тем, что: в блоке 2 формируется режимная карта в соответствии с температурным графиком работы ГТА, что дает возможность использовать оптимальные параметры работы оборудования, тем самым увеличивая надежность и экономичность его использования; система АБР ведет постоянный контроль исходных данных в автоматическом режиме, в то время как в системе из [5] ввод и первичная обработка данных происходят только при вводе системы в работу.

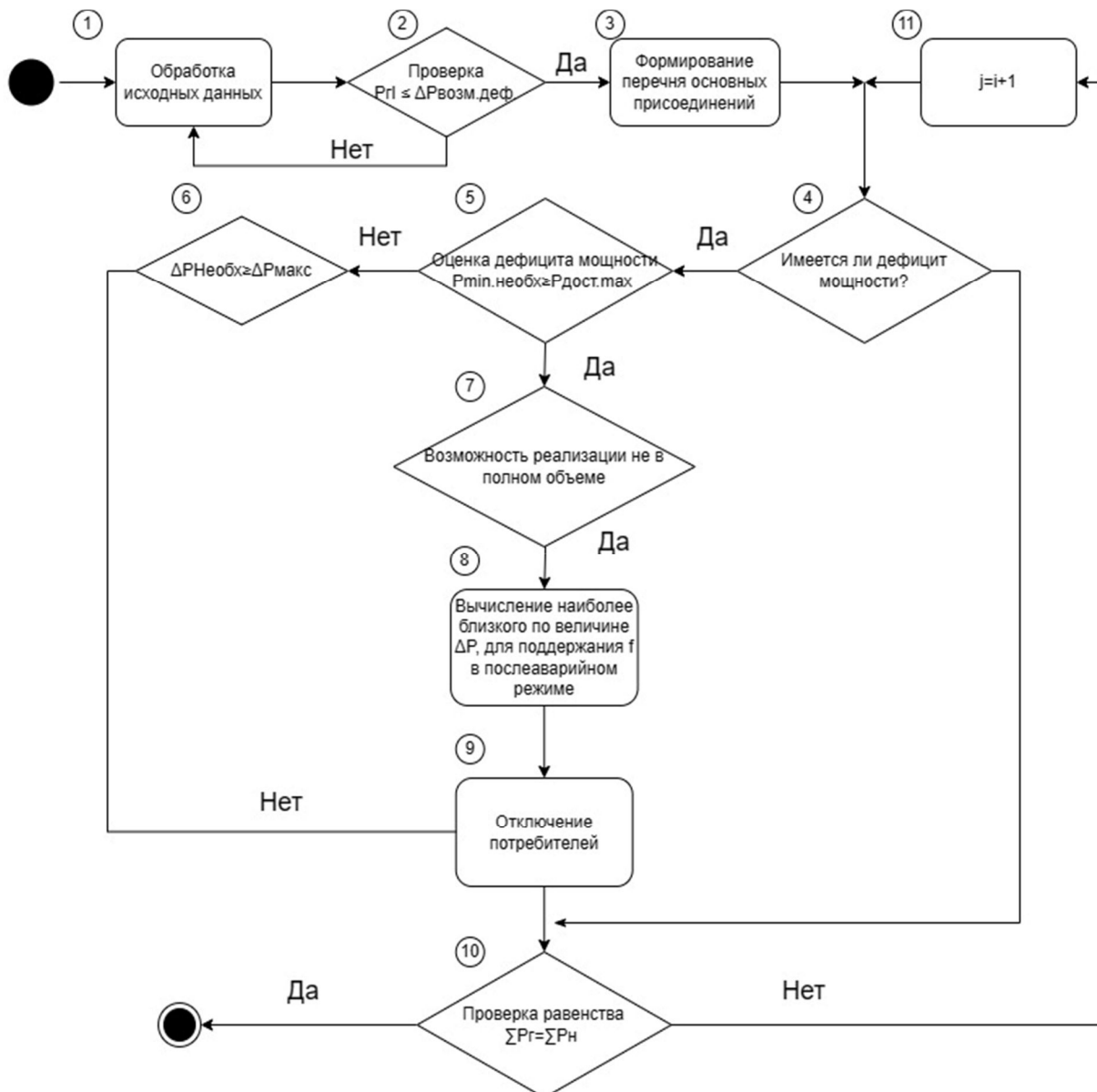


Рисунок 3 – Схема работы системы АБР



Для работы АБР на каждой ячейке распределительных устройств подстанций, заводимой под действие АБР, должны быть организованы: прием сигнала от АБР с действием на блок микропроцессорной релейной защиты, формирование базы данных, ведение суточной, сменной ведомостей, ведомости событий, архива для копирования, включая регистрацию и архивирование действий оператора, регистрация информации об аварийных ситуациях, синхронизация времени АБР по протоколу NTP с сервером времени автоматизированной системы управления технологическим процессом, обеспечение синхронизации времени между журналом сообщений и графическим регистратором данных.

При соблюдении этих условий устройство обеспечит: контроль предшествующего режима с осуществлением приема и обработки телеметрической информации о загрузке генераторов по активной мощности, количества работающих агрегатов, температуры окружающего воздуха, коэффициентов загрузки агрегатов, баланса мощностей генерации и нагрузки; регистрацию входного сигнала «Аварийный останов» («АО») на отсечной газовой клапан от системы возбуждения и электрических защит; сравнение доаварийной загрузки генераторов с уставками срабатывания, рассчитанными из условия заданных пределов мощности для заданного количества работающих агрегатов при определенной температуре окружающего воздуха и в соответствии с изменением мощности на валу силовой турбины. В случае прерывания уставки максимально допустимого небаланса мощности при текущей схемно-режимной ситуации и регистрации «АО», с помощью устройства можно определить уровень дефицита активной мощности, сформировать сигнал на отключение нагрузок согласно приоритетам, определенным в ЦДУ, с погрешностью +2 % от определенного уровня дефицита, передачу сигнала на отключение по волоконно-оптическим линиям связи.

В блоке 1 производится мониторинг и формирование исходных данных, а именно: температуры окружающей среды  $t_{окр.ср.}$ ; активной мощности генерации  $P_{ген.}$ ; количества агрегатов, находящихся в работе  $n$ ; коэффициентов загрузки генераторов  $k_{загр.}$ ; мощности нагрузки  $P_{нагр.}$ .

В блоке 2 формируется режимная карта и проверяется неравенство  $P_{ГТ} \leq \Delta P_{возм.деф.}$ , где  $P_{ГТ}$  – мощность отключенного ГТА, оставшаяся после распределения его мощности между другими ГТА согласно  $k_{загр.}$ ;  $\Delta P_{возм.деф.} = P_{макс.по реж.карте} - P_{ГТ мгнов.}$  – возможный дефицит мощности, равный разности максимально возможного по режимной карте дефицита мощности и мгновенной мощности отключенного ГТА.

В блоке 3 определяется суммарная мощность нагрузки  $\sum P_{нагр.}$ , а также мощность каждого из потребителей, формируется перечень основных присоединений, и задается очередность их отключения в случае возникновения возмущения.

В блоке 4 определяется дефицит мощности на основе сравнения  $\sum P_{нагр.}$  и  $\sum P_{ген.}$

В блоке 5 оценивается дефицит мощности путем сравнения  $P_{min необх.}$  и  $P_{дост.мах.}$ , где минимально необходимая для отключения мощность  $P_{min необх.} = P_{дефиц.} + 2\%$ ;  $P_{дост.мах.}$  – максимальная мощность, доступная для отключения, согласно режимной карте. Если условие  $P_{min необх.} \geq P_{дост.мах.}$  не выполняется, то в блоке 6 начинается проверка неравенства  $\Delta P_{необх.} \geq \Delta P_{макс.}$ , где  $\Delta P_{необх.}$  – необходимый для отключения объем мощности;  $\Delta P_{макс.}$  – максимально возможный для отключения объем мощности для АБР.

В блоке 7 проверяется возможность реализации отключаемого объема мощности  $\Delta P$  сравнением с  $P_{дефиц.}$ .

Блок 8 отвечает за вычисление наиболее близкого по величине  $\Delta P$  к необходимому для поддержания частоты в послеаварийном режиме в допустимых пределах. В блоке 9 задается алгоритм отключения выбранных потребителей, а в блоке 10 – суммарная генерируемая мощность сравнивается с суммарной мощностью нагрузки. Если равенство не наблюдается, то начинается следующий  $j$ -й цикл.

В заключении следует отметить, что генерирующее оборудование изолированных ЭС месторождений имеет малую инерционность по сравнению с оборудованием Единой энергетической системы, поэтому изолированные ЭС чувствительны к возникновению небаланса мощностей.

Эксперименты на расчетной модели показали, что при возникновении возмущений, связанных с остановом ГТА, работа АЧР не всегда успешна. Повышение уставки срабатывания ступеней АЧР по частоте до 49,3 Гц не является выходом: останов ГТА не последует, но это приведет к ложным отключениям электрических нагрузок, сопутствовать которым будут экономические потери от остановки добычи углеводородов. При совместной работе АЧР и ДАР снижение частоты сглаживается в малой степени и на ситуацию не влияет, так как у ДАР, как и у АЧР есть выдержка времени, и срабатывание происходит уже после отключения ГТА. Необходимо учесть, что при достижении уставки по скорости снижения частоты, ДАР отключает потребителей не ступенчато, как это делает АЧР, а сразу всех, какие заведены под ДАР, что на НГКМ часто недопустимо из-за высокой концентрации потребителей первой и второй категорий.

Выходом из ситуации может быть разработка и применение системы АБР, которая реагирует на небаланс генерируемой и нагрузочных мощностей, имеет блок выбора управляющих воздействий и реализует их без ожидания реакции ЭС на возникающие возмущения, обеспечивает недопущение возникновения условий для ложного срабатывания АЧР и технологических защит.

**Список литературы:**

1. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта от 19-04-2011 СТО 59012820.29.240.001-2011 // АО «СО ЕЭС». – 2011. – 30 с.
2. Технические правила организации в ЕЭС России автоматического ограничения снижения частоты при аварийном дефиците активной мощности (автоматическая частотная разгрузка) от 31.12.2009 СТО 56012820.29.240.001-2015 // АО «СО ЕЭС». – 2015. – 21 с.
3. Основы противоаварийной автоматики в электроэнергетических системах : учебное пособие / Р.А. Ванштейн [и др.]. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Чебоксары : Изд-во РИЦ «СРЗАУ», 2022. – 392 с.
4. Руководство пользователя ПК RUSTab [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.rastrwin.ru/>
5. Патент № 2723544 Российская Федерация, МПК H02P 9/10 (2006.01), H02H 3/00 (2006.01), H02J 3/14 (2006.01), G01R 21/00 (2006.01). Система автоматического противоаварийного управления нагрузкой в изолированно работающей энергетической системе: № 2020105795: заявл. 06.02.2020: опубл. 15.06.2020 / Андранович Б., Аюев Б.И. и др. – 12 с.

**List of references:**

1. Automatic emergency control of power system modes. Automatic emergency control of power systems. Conditions for the organization of the process. Terms of establishment of the object from 19-04-2011 STO 59012820.29.240.001-2011 // SO UES. – 2011. – 30 p.
2. technical rules of organization in UES of Russia of automatic limitation of frequency reduction in case of emergency deficit of active power (automatic frequency unloading) from December 31, 2009 STO 56012820.29.240.001-2015 // SO UES, JSC. – 2015. – 21 p.
3. bases of emergency control automation in electric power systems : textbook / R.A. Vanstein [and others]. – 2nd edition, revised and enlarged. – Cheboksary : Publishing house of RIC «SRZAU», 2022. – 392 p.
4. User's guide PC RUSTab [Electronic resource]. – URL : <http://www.rastrwin.ru/>
5. Patent № 2723544 Russian Federation, IPC H02P 9/10 (2006.01), H02H 3/00 (2006.01), H02J 3/14 (2006.01), G01R 21/00 (2006.01). A system of automatic emergency load control in an isolated power system: no. 2020105795: application. 06.02.2020: publ. 15.06.2020 / Andranovich B., Ayuyev B.I. et al. – 12 p.