

УДК 621.311.238 – 021.465

УНИФИЦИРОВАННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Кавалеров Б.В., Басаргин Ш.Д.

*ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: b.shamil.d@gmail.com*

До настоящего времени окончательно не сформирован перечень требуемых показателей качества. В данной статье рассматриваются задачи испытания ГТЭС, в которых в результате испытаний получают набор переходных процессов с их последующей оценкой на соответствующие показатели качества. Ориентируясь на основные показатели качества, мы пытаемся сформулировать унифицированные показатели качества ГТЭС по напряжению и частоте. Ориентируясь на сформулированные показатели качества, идет формулировка характерных (типовых) переходных процессов с учетом рекомендаций и основных групп возмущающих воздействий, таких как пуск, различные аварийные события, переход из одного режима работы в другой, изменение момента, изменение структуры и состава нелинейной нагрузки, потеря синхронизма и ресинхронизация, колебания мощности. В статье предлагается перечень унифицированных показателей качества, выбор которых может быть скорректирован с учетом перечня типовых переходных процессов.

Ключевые слова: газотурбинная электростанция, газотурбинная установка, синхронный генератор, автоматизация испытаний, показатели качества

UNIFIED QUALITY TRANSIENTS FOR AUTOMATED TESTING OF GAS TURBINES POWER

Kavalеров B.V., Basargin S.D.

Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «Perm National Research Polytechnic University», Perm, e-mail: b.shamil.d@gmail.com

So far finally the list of the demanded quality indicators isn't created. In this article is considered problems of test of the GTPP in which result of tests receive a set of transition processes with their subsequent assessment on the corresponding indicators of quality. Being guided on the main indicators of quality, we try to formulate the unified indicators of quality of the GTPP on tension and frequency. Being guided by the formulated indicators of quality there is a formulation of characteristic (standard) transition processes taking into account recommendations and the main groups revolting influences, such as: start-up, various emergency events, transition from one operating mode to another, change of the moment, change of structure and structure of nonlinear loading loss of synchronism and a resinkhronization, fluctuations of power. In article the list of the unified quality indicators which choice can be corrected taking into account the list of standard transition processes is offered.

Keywords: gas turbine power plant, gas turbine, synchronous generator, test automation, quality indicators

Газотурбинные электростанции малой и средней мощности (до 25 МВт и выше) могут строиться на базе конвертированных авиационных газотурбинных двигателей. Такие электростанции в настоящее время находят всё более широкое применение. Механическую мощность в таких электростанциях создает газотурбинная установка (ГТУ), топливом для которой обычно служит предварительно подготовленный газ. ГТУ приводит во вращение синхронный электрогенератор, который вырабатывает электрическую энергию, потребляемую нагрузкой. Построенная таким образом газотурбинная электростанция (ГТЭС) может работать как автономно на выделенную нагрузку, так и параллельно с другими ГТЭС, а также на мощную сеть. Для управления режимами ГТЭС служит система автоматического управления (САУ). Объект управления имеет сложную структуру, обладает перекрестными связями и непросто для по-

лучения требуемых показателей качества управления. САУ ГТЭС включают в себя САУ ГТУ и систему управления синхронным генератором, а также много других составных частей. Ситуация осложняется тем, что до настоящего времени окончательно не сформирован перечень требуемых показателей качества. В статье предпринята попытка сформировать вектор показателей качества переходных процессов при управлении ГТЭС для автоматизации испытаний САУ ГТЭС. САУ ГТЭС предварительно испытывают на математических и полунатурных моделях, затем испытания проводят на натурных стендах, где электрическая нагрузка подается на испытываемую ГТЭС. Обеспечение требуемых показателей качества вырабатываемой ГТЭС электроэнергии представляет собой достаточно актуальную проблему, в настоящее время ее решением занимаются разработчики САУ ГТЭС и различные научные коллективы.

Задача испытаний ГТЭС

Формализуем задачу автоматизации испытаний ГТЭС и САУ ГТЭС согласно [10]. В результате испытаний получают набор переходных процессов. Эти переходные процессы потребуется оценить на соответствие требуемым показателям качества, поэтому, прежде всего, зададим множество показателей качества переходных процессов, ограниченных допустимыми значениями:

$$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}; \quad (1)$$

сформируем множество ограничений САУ:

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}. \quad (2)$$

Элементами множества являются, например, допустимые максимальный и минимальный (при сбросе режима) уровни расхода топлива ГТУ, допустимая максимальная частота вращения турбокомпрессора ГТУ, допустимое максимальное ускорение частоты вращения турбокомпрессора и др. В это множество полезно включить и такие ограничения, как допустимая стоимость (трудоемкость) испытаний, допустимое время испытаний.

Множество экспериментов формирует-ся в виде множества

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}. \quad (3)$$

Множество настроек САУ определяется в виде

$$R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}. \quad (4)$$

Требуется найти вектор **R** допустимых настроечных параметров для фиксированной структуры САУ при системе указанных ограничений. Количество элементов множеств (1)–(4) в общем случае различно.

Для оценки эффективности САУ ГТЭС целесообразно использовать показатели качества вырабатываемой электроэнергии (1), которые при наличии ограничений на управление и условия функционирования ГТЭС (2) позволят обосновать структуру и параметры САУ по результатам проведения испытаний. Предложим обоснованный вариант множества Q .

Показатели качества переходных процессов

Известны прямые показатели качества: время управления, перерегулирование, частота колебаний, число колебаний, время нарастания переходного процесса, декремент затухания [11]. Эти показатели относятся к линеаризованным системам и в большей степени ориентированы на отработку управляющего воздействия, в то же время возмущения чаще всего носят им-

пульсный характер. Следует также учитывать точность системы в установившемся режиме.

Как правило, на практике, в частности в электроэнергетических ГТУ, одновременно протекают смешанные процессы, вызываемые различными факторами, в основном это режим отработки возмущения [3]. Требования к статическим характеристикам системы обычно формулируются легко, в статике необходимо обеспечивать ошибку $\Delta = v - y$, не превышающую заданную допустимую. Требования к динамическим свойствам системы обычно формулируются на языке оценок переходных процессов во времени или в некоторых случаях задаются каким-либо критерием оптимальности процессов [3]. Этот традиционный для синтеза линейных систем подход предполагает, что выполнение нескольких оценок переходного процесса в достаточной мере обеспечит желаемые свойства процессов для произвольных возмущений [3, 15].

К сожалению, для нелинейных систем в общем случае нет такой возможности. Тем не менее необходимо, исходя из небольшого числа оценок переходных процессов, оценивать требуемые динамические свойства. Таким образом, в общем случае необходим этап преобразования исходных оценок переходных процессов к одной из перечисленных выше форм задания динамических свойств. С учетом специфики задачи испытаний САУ и удобства формализации преимущество следует отдать критериальным формам.

При выборе требований к качеству переходных процессов САУ ГТУ следует ориентироваться на требования стандартов и руководящих документов. Например, согласно правилам технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ [13] система регулирования ГТУ должна удовлетворять основным требованиям по электрическим параметрам: устойчиво поддерживать заданную электрическую нагрузку; удерживать ГТУ на холостом ходу при номинальной частоте вращения ротора; обеспечивать надежную работу ГТУ на режимах пуска и остановки, а также остановки агрегата в аварийных ситуациях; обеспечивать при изменении нагрузки плавное изменение режима работы ГТУ; удерживать частоту вращения ротора, не вызывающую срабатывания автомата безопасности, при мгновенном сбросе максимальной нагрузки до нуля (для ГТУ со свободной силовой турбиной значение нагрузки указывается в технических условиях); иметь степень статической неравномерности регулирования частоты вращения генераторного вала

в пределах 4–5 % номинальной; иметь степень нечувствительности при любой нагрузке не более 0,2 % номинальной частоты вращения. Здесь же перечисляются условия, при которых ГТУ должна быть немедленно отключена действием защит или персонала. Среди них – недопустимость повышения температуры газов перед турбиной (турбинами) и повышения частоты вращения роторов сверх допустимого предела.

Действующий ГОСТ [8] определяет требования к качеству электроэнергии. Но могут быть и другие, более жесткие требования [5, 6] или требования со стороны потребителей, например со стороны ОАО «Газпром» [14].

Ориентируясь на основные показатели этих требований, попробуем сформулировать унифицированные показатели качества ГТЭС по напряжению и частоте, поскольку именно напряжение и частота – главные режимные параметры электроэнергии [2]. При этом за частоту в большей степени «отвечает» ГТУ, а за напряжение – синхронный генератор. При этом ограничим состав показателей качества показателями, вызванными возмущающими воздействиями со стороны электрической нагрузки ГТЭС. Предложен следующий состав показателей из множества Q .

а) установившееся отклонение частоты при неизменной симметричной нагрузке измеряют при симметричной нагрузке, равной 25 и 100 % номинальной мощности, следующим образом:

– устанавливают номинальное значение частоты;

– по контрольному частотомеру в течение 5 мин с интервалами наблюдения 1 мин фиксируют наибольшее и наименьшее значения частоты:

$$q_1 = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{2n_{\text{ном}}} 100\% \leq 1\%, \quad (5)$$

где $n_{\max}$ и $n_{\min}$ – наибольшее и наименьшее напряжения соответственно [5];

б) допустимое максимальное отклонение частоты при набросе и сбросе 100 % номинальной нагрузки – 7,5 % от номинальной:

$$q_2 = \left| \frac{n_{\text{дин}} - n_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} \right| \cdot 100\% \leq 7,5\%;$$

$$\Delta P = \pm 100\%, \quad (6)$$

где $n_{\text{дин}}$ – максимальное или минимальное значения, зарегистрированные при переходном процессе, выходящие за пределы допустимого значения установившейся частоты [5];

в) время восстановления частоты с точностью $\pm 0,5\%$ должно составлять не более 5 с:

$$q_3 = t_n < 5 \text{ с};$$

$$|n - n_{\text{ном}}| \leq 0,5\%; \quad (7)$$

г) значение двойной амплитуды установившихся колебаний, вызываемых устройствами регулирования частоты вращения, не превышает 0,4 % номинальной частоты вращения генератора, работающего на изолированную сеть при установившейся нагрузке:

$$q_4 = \varepsilon = |n - n_{\text{ном}}| < 0,2\%. \quad (8)$$

Аналогично сформулируем требования к переходным процессам по напряжению.

а) установившееся отклонение напряжения при изменении нагрузки [7], при этом устанавливают значения выходного напряжения и частоты напряжения, равные номинальным при 10 %-ной нагрузке, после чего включают нагрузку с номинальным коэффициентом мощности и измеряют установившееся выходное значение напряжения при 100 %-ной нагрузке $U_{st, \max}$; изменяют нагрузку до 10 % номинальной мощности и измеряют установившееся выходное значение напряжения $U_{st, \min}$.

$$q_5 = \pm \frac{U_{st, \max} - U_{st, \min}}{2U_{\text{ном}}} 100\% \leq \pm 10\%; \quad (9)$$

б) установившееся отклонение напряжения при неизменной симметричной нагрузке измеряют при симметричной нагрузке, равной 10 и 100 % номинальной мощности, следующим образом:

– устанавливают номинальное значение напряжения;

– по контрольному вольтметру или по цифровому вольтметру в течение 5 мин с интервалами наблюдения 1 мин фиксируют наибольшее и наименьшее значения напряжения:

$$q_6 = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2U_{\text{ном}}} 100\% \leq 3\%, \quad (10)$$

где $U_{\max}$ и $U_{\min}$ – наибольшее и наименьшее напряжения соответственно [5];

в) переходное отклонение напряжения при сбросе-набросе симметричной нагрузки 100 % номинальной мощности – не более $\pm 30\%$, время восстановления – не более 5 с [8]:

$$q_7 = \left| \frac{U_{\text{дин}} - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \right| \cdot 100\% \leq 30\%;$$

$$\Delta P = \pm 100\%; \quad (11)$$

$$q_8 = t_U < 5 \text{ с}; \quad |U - U_{\text{ном}}| \leq 5\%, \quad (12)$$

где $U_{\text{дин}}$ – максимальное или минимальное значения, зарегистрированные при переходном процессе, выходящие за пределы допустимого значения установившегося напряжения [5];

г) время допустимого снижения напряжения более чем на 20 % не более 2 с:

$$\begin{aligned} q_9 &= t_{20} \leq 2 \text{ с}; \\ |U - U_{\text{ном}}| &\leq 5\%; \\ \frac{U_{\text{ном}} - U}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% &\geq 20\%; \end{aligned} \quad (13)$$

д) время допустимого снижения напряжения более чем на 40 % не более 0,1 с:

$$\begin{aligned} q_{10} &= t_{40} \leq 0,1 \text{ с}; \\ |U - U_{\text{ном}}| &\leq 5\%; \\ \frac{U_{\text{ном}} - U}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% &\geq 40\%; \end{aligned} \quad (14)$$

е) время переходного процесса – после отключения короткого замыкания должно обеспечиваться достижение номинального напряжения с точностью 1 % за время не более 1,5 с:

$$q_{11} = t_U < 1,5 \text{ с}; \quad |U - U_{\text{ном}}| \leq 1\%; \quad (15)$$

ж) коэффициент небаланса напряжения при несимметричной нагрузке фаз с коэффициентом небаланса тока до 25 % номинального значения силы тока – не более 10 %:

$$q_{12} = K_{\text{неб}} = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном}}} 100 < 10\%, \quad (16)$$

где U_{max} и U_{min} – наибольшее и наименьшее из измеренных фазных (линейных) напряжений соответственно [5].

Отдельно проверяется режим параллельной работы [5, 8]: степень рассогласования при параллельной работе – наибольшая разность относительных нагрузок данной установки и группы параллельно работающих установок:

$$q_{13} = \left(\frac{p_e}{p_{ev}} - \frac{\sum p_e}{\sum p_{ev}} \right) \cdot \frac{p_{ev}}{p_{ev \text{ max}}} 100 \%, \quad (17)$$

где p_e – фактическая нагрузка энергоустановки; $\sum p_e$ – фактическая нагрузка остальных

энергоустановок; p_{ev} – номинальная мощность энергоустановки; $\sum p_{ev}$ – номинальная мощность остальных энергоустановок; $p_{ev \text{ max}}$ – номинальная мощность наиболее мощной из параллельно работающих энергоустановок.

Типовые переходные режимы

Известно [9], что типология динамических воздействий на систему авиационная ГТУ – устройство управления позволяет целенаправленно проводить исследования переходных процессов в САУ. Типы возмущений и режимов перечислены в [9], но для электроэнергетических ГТУ следует дополнительно ввести возмущающие воздействия со стороны электрической нагрузки. Данная задача применительно к испытаниям ГТЭС не формализована. Это не случайно, в работе [17] отмечается, что сложные феномены ЭЭС – крайне запутанны для понимания и являются настоящим вызовом для анализа, в XXI веке эти вызовы только усилились из-за необходимости работать вблизи границ устойчивости.

Ориентируясь на сформулированные показатели качества Q , сформируем примерный перечень характерных (типовых) переходных процессов $U(3)$. При этом учитываются рекомендации [2] и основные группы возмущающих воздействий ЭЭС [12].

1. Пуск мощного асинхронного двигателя или группы асинхронных двигателей.

2. Короткое замыкание или перегрузка в распределительной или питающей сети и их устранение, отключение линии электропередачи с последующим успешным или неуспешным автоматическим повторным включением.

3. Отключение и включение одного или нескольких генераторов ГТЭС.

4. Различные последовательности аварийных событий и противоаварийных управляющих воздействий: короткие замыкания и их устранение, отключения и последующие подключения двух и более линий электропередачи, действие противоаварийной автоматики, форсировка возбуждения электрогенераторов и др.

5. Несимметричные короткие замыкания при срабатывании или отказе противоаварийной автоматики и их устранение.

6. Переход с автономного режима работы ГТЭС на параллельный режим ра-

боты или работу на мощную сеть и наоборот.

7. Изменение момента сопротивления нагрузки в связи с изменением механической нагрузки электродвигателей.

8. Изменение структуры и состава комплексной нелинейной нагрузки при значительных изменениях электрической мощности.

9. Влияние толчкообразного характера нагрузки.

10. Изменение комплексной нагрузки в системе два электрогенератора – нагрузка.

11. Изменение комплексной нагрузки в системе n электрогенераторов – нагрузка.

12. Взаимовлияние САУ ГТУ и САУ электрогенераторами при резких изменениях нагрузки.

13. Влияние слабых связей и изменений в конфигурации ЭЭС при значительных изменениях передаваемой электрической мощности.

14. Потеря синхронизма и ресинхронизация.

15. Взаимные колебания мощности при параллельной работе генераторов.

Различные параметры, имеющие, по мнению экспертов, одинаковую важность, располагаются на одинаковых местах, то есть ранги могут повторяться. Поэтому после ранжировки таблица нормируется так, чтобы сумма рангов была равна $S_n = (1 + n)n/2$. В состав группы обычно входят разработчики отдельных узлов ГТУ и САУ, специалисты по электрической части, поэтому мнения экспертов о необходимости тех или иных переходных процессов расходятся. При подготовке и проведении испытаний следует отбирать те процессы, о важности которых мнения в группе имеют достаточную степень согласия.

Количественной оценкой степени согласия мнений по интересующему вопросу в группе исследователей является коэффициент конкордации, определяемый методом ранговой корреляции [1, 16]. Такой подход позволяет наиболее полно использовать имеющуюся априорную информацию и сократить объем исследований по выбору переходных процессов.

Заключение

В статье предложен перечень унифицированных показателей качества, окончательный их выбор может быть скорректиро-

ван с учетом перечня типовых переходных процессов U . Таким образом, показатели (5)–(17) следует рассматривать только как общий шаблон, на основании которого может быть подготовлена документация для проведения испытаний ГТЭС и методика её последующей автоматизации.

Список литературы

1. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1974. – 159 с.
2. Веников В.А. Переходные электрохимические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
3. Востриков А.С. Синтез систем регулирования методом локализации: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 252 с.
4. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
5. ГОСТ Р 53178-2008 Установки электрогенераторные с бензиновыми, дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Методы испытаний.
6. ГОСТ Р 50783-95 Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические требования.
7. ГОСТ 20440-75. Установки газотурбинные. Методы испытаний.
8. ГОСТ 10511-83 Системы автоматического регулирования частоты вращения (САЧ) судовых, тепловых и промышленных дизелей.
9. Идентификация систем управления авиационных газотурбинных двигателей / В.Г. Августиневич, В.А. Акиндинов, Б.В. Боев и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 200с.
10. Кавалеров Б.В. Автоматизация испытаний САУ ГТУ газотурбинных мини-электростанций при проектировании и настройке // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 1. – С. 12–17.
11. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5 тт. Т3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 616 с.
12. Овчаренко Н.И. Автоматика энергосистем. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 476 с.
13. РД 34.20.501-95 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. РАО «ЕЭС России», 1995 (http://magicad.su/magicad_docs/2/2785/index.htm).
14. РД 51-015 86 23-07-95 Применение электростанций собственных нужд нового поколения с поршневым и газотурбинным приводом, РАО «Газпром», 1997г. (http://standartgost.ru/g/%D0%A0%D0%94_51-0158623-07-95).
15. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 712 с.
16. Шалыгин А.С., Палагин Ю.И. Прикладные методы статистического моделирования. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 320 с.
17. Kundur P. Power system stability and control. New York, McGraw-Hill, 1994. – 1176 p.

References

1. Beshelev S.D., Gurvich F.G. Matematiko-statisticheskie metody jekspertnyh ocenok. M.: Statistika, 1974. 159 p.
2. Venikov V.A. Perehodnye jelectromehaničeskie processy v jelectricheskikh sistemah. M.: Vyssh. shk., 1985. 536 p.
3. Vostrikov A.S. Sintez sistem regulirovanija metodom lokalizacii: monografija / Vostrikov A.S. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2007. 252 p.
4. GOST 13109-97 Jelectricheskaja jenergija. Sovmestimost tehničeskikh sredstv jelectromagnitnaja. Normy kachestva jelectricheskoi jenergii v sistemah jelectrosnabženija obshhego naznachenija.
5. GOST R53178-2008 Ustanovki jelectrogeneratornye s benzinovymi, dizelnymi i gazovymi dvigateljami vnutrennego sgoranija. Metody ispytanij.
6. GOST R 50783-95 Jelectroagregaty i peredvizhnye jelectrostancii s dvigateljami vnutrennego sgoranija. Obshhie tehničeskie trebovanija.
7. GOST 20440-75. Ustanovki gazoturbinye. Metody ispytanij.
8. GOST 10511-83 Sistemy avtomatičeskogo regulirovanija častoty vrashhenija (SARCh) sudovyh, teplovoznyh i promyshlennyh dizelej.
9. Identifikacija sistem upravlenija aviacionnyh gazoturbinyh dvigatelej/ Avgustinovich V.G., Akindinov V.A., Boev B.V i dr. M.: Mashinostroenie, 1984. 200s.
10. Kavalero B.V. Avtomatizacija ispytanij SAU GTU gazoturbinyh mini-jelectrostancij pri proektirovanii i nastrojke//Avtomatizacija v promyshlennosti. 2011. no. 1. pp. 12–17.
11. Metody klassičeskoj i sovremennoj teorii avtomatičeskogo upravlenija: Učebnik v 5 tt. T3: Sintez reguljatorov sistem avtomatičeskogo upravlenija/ Pod red. K.A. Pupkova i N.D. Egupova. M: Izdatelstvo MGTU im. N.Je.Baumana, 2004. 616 p.
12. Ovčarenko N.I. Avtomatika jenergosistem. M.: Izdatelskij dom MJeI, 2007. 476 p.
13. RD 34.20.501-95 Pravila tehničeskoj jekspluatacii jelectricheskikh stancij i setej Rossijskoj Federacii. RAO «EJeS Rossii», 1995 (http://magicad.su/magicad_docs/2/2785/index.htm).
14. RD 51-015 86 23-07-95 Primenenie jelectrostancij sobstvennyh nužd novogo pokolenija s porshnevym i gazoturbinyym privodom, RAO «Gazprom», 1997g. (http://standartgost.ru/g/%D0%A0%D0%94_51-0158623-07-95).
15. Spravočnik po teorii avtomatičeskogo upravlenija/ Pod red. A.A. Krasovskogo. M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1987. 712 p.
16. Shalygin A.S., Palagin Ju.I. Prikladnye metody statističeskogo modelirovanija. L.: Mashinostroenie. Leningr. otdnie, 1986. 320 p.
17. Kundur P. Power system stability and control. New York, McGraw-Hill, 1994. 1176 p.