

В.М.КАПИНОС, докт.техн.наук; **Ю.А.ИЩУК**, канд.техн.наук;
Т.И.ЗАХАРЧЕНКО; НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН, ОСНОВАННОЕ НА КРИТЕРИЯХ КАЧЕСТВА

Розглянута діагностика технічного рівня парових турбін по даним показників їх якості з кількісною оцінкою.

The diagnostics of the technical level of steam turbines by quality indexes with quantitative assessment is considered.

В инженерной практике часто применяют экспертную оценку технического уровня паровых турбин. Однако, этот, по существу, интегральный метод анализа технического уровня турбин не позволяет проектировщикам турбины установить, какие показатели качества оказались ослабленными в изделии.

Дифференциальное оценивание технического уровня достигается при сравнении с турбиной-аналогом на основе единичных показателей качества. В целом, все показатели, по которым сравниваются турбины, разделяются на классификационные и собственно оценочные. На основании классификационных показателей выбираются ближайшие турбины-аналоги, на основании оценочных показателей устанавливается технический уровень.

Согласно известным экспертным оценкам в качестве классификационных показателей турбоустановок принимаются: мощность турбины, давление свежего пара, температура свежего пара, частота вращения ротора, давление за турбиной. Для турбоустановок с нерегулируемыми отборами на регенерацию принимается также такой показатель как температура питательной воды. В случае теплофикационных и производственных отборов - их тепловая нагрузка. С целью оценки эффективности работы конденсатора наряду с противодавлением турбины рассматривается и температура охлаждающей воды.

Начальные и конечные параметры при заданной частоте вращения определяют число ступеней, их средние диаметры, структуру проточной части (ступени давления или ступень скорости и ступени давления). При изменении мощности изменяется расход, а следовательно, увеличиваются или уменьшаются проходные сечения, а значит габариты и вес. Косвенно значение мощности сказывается и на экономичности турбины.

Поскольку практически мала вероятность отыскания турбин-аналогов, у которых совпадали бы все три показателя – мощность, начальные и конечные параметры (изоэнтропический перепад) и частота вращения, то эти показатели необходимо принимать с заданным весом. Весовые показатели принимаются либо на основании экспертных оценок, либо, если экспертные оценки

отсутствуют, ориентировочные, основанные на личном опыте специалистов, проводящих сравнительный анализ с целью определения технического уровня.

Коэффициенты весомости показателей (в известной мере условные при их ориентировочном определении) представляют собой количественную оценку той доли каждого из показателей, которую он вносит в общий технический уровень или в значение некоторого критерия качества, принимаемого за 100 % (или 100 баллов). Так, при выборе турбины-аналога, по мнению авторов, можно принять весовой коэффициент для изоэнтروпического перепада, определяемого по начальным и конечным параметрам, равным 60 %, для мощности турбины – 30 % и для частоты вращения – 10 %. Тогда суммирующий эти показатели комплексный коэффициент определяется по формуле

$$K_{\text{кл}} = 60 \frac{H_{\text{min}}}{H} + 30 \frac{N_{\text{min}}}{N} + 10 \frac{n_{\text{min}}}{n}, \quad (1)$$

где H , N и n – соответственно, изоэнтропический перепад, мощность и число оборотов. Если показатели H , N и n турбины-аналога и рассматриваемой турбины совпадают, то $K_{\text{кл}} = 100$ %, в противном случае классификационный коэффициент всегда будет меньше, так как в качестве множителей используются величины меньше единицы. Для сравниваемой пары аргументов выбирают H_{min} , N_{min} и n_{min} независимо от того минимальное значение принимает параметр турбины-аналога или турбины-объекта аналога, поскольку речь идет только о различии турбин. Турбины-аналоги, таким образом, выбираются по принципу наибольшей близости их характеристик к характеристике оцениваемого изделия.

Чтобы определить по единичным показателям технический уровень через комплексную относительную характеристику, определяющую степень приближения качества оцениваемого изделия к эталону (уровню мирового стандарта), необходимо так же, как и для классификационных показателей, иметь коэффициенты весомости этих показателей. Для определения номенклатуры единичных показателей необходимо принять во внимание следующие соображения.

Качество турбины может быть определено как комплекс ее показателей, от которых, в конечном счете, зависит стоимость преобразования тепловой энергии в механическую энергию движения ротора. Такими показателями являются удельный расход топлива, удельный расход теплоты, надежность эксплуатации, маневренность, долговечность, стоимость агрегата, степень автоматизации технологического процесса, полнота и совершенство контроля параметров, характеризующих состояние агрегата, занимаемая площадь и высота здания, удобство обслуживания и др.

Одной из характеристик агрегатов являются общие расходы на эксплуатацию, которые складываются из расходов на топливо, отчисления на амортизацию, первоначальных затрат (на оборудование, строительство здания, монтаж, материалы), расходов на оборудование и ремонт, убытков от простоев и

аварий. На эти статьи расходов при эксплуатации турбины влияет ее конструкция, качество примененных материалов, уровень запасов прочности, качество изготовления и монтажа, технический уровень эксплуатации.

Убытки от перебоев в работе турбины могут быть очень велики, даже если они не сопровождаются серьезными повреждениями самой турбины. Наибольшие убытки от аварийной остановки турбины будут в том случае, если она является единственным агрегатом, обслуживающим потребителя, например, предприятие, цех предприятия, какое-либо автономное хозяйство. В этом случае авария турбины приведет к полному отключению потребителя. Убытки будут складываться из убытков от простоя турбины, стоимости ее ремонта и последующего пуска и, главным образом, из убытков, вызванных простоем потребителей. При параллельной работе турбин, помимо потерь от простоя и затрат на ремонт, убытки будут вызваны также работой оставшихся турбин на менее выгодных режимах. Поэтому среди показателей качества турбины на первое место может быть поставлена ее надежность в эксплуатации.

Вслед за надежностью важнейшим показателем качества турбины является ее тепловая экономичность, определяющая расход топлива как основной составляющей себестоимости продукции паротурбинной установки. В качестве оценочного показателя тепловой экономичности может быть принят внутренний КПД турбины или удельный расход теплоты. Последний показатель является более полным критерием экономичности. При использовании опубликованных данных о тепловой экономичности следует иметь в виду, что в различного рода проспектах приводятся так называемые парадные значения экономичности, то есть наибольшие достижимые данной турбоустановкой. Они могут существенно превосходить среднегодовые эксплуатационные. Особенно увеличивается расход топлива сверх парадного при пусках и остановках. Этот дополнительный расход топлива зависит от конструкции турбины, так как она определяет продолжительность пуска. Сама по себе продолжительность пуска является важнейшим оценочным показателем технического уровня турбины. Быстрый пуск неприспособленной к этому турбины будет сопровождаться недопустимыми температурными напряжениями и большими деформациями ее деталей. Первые могут вызвать коробление цилиндра и появление в нем трещин, малоцикловая усталость может вызвать трещинообразование и в роторе. Температурные деформации могут вызвать задевания при пусках, которые, если и не вызовут более серьезных последствий, то, по меньшей мере, приведут к увеличению зазоров, с которыми турбина и будет все время работать с соответствующим снижением экономичности.

Из других расходов, связанных с конструкцией турбины, необходимо принять во внимание стоимость сооружений, которая определяется весом и габаритами турбины.

Сравнительно малый удельный вес амортизационных отчислений и большая доля топливной составляющей в общих расходах по эксплуатации

турбины означает, что при нынешнем дорогом топливе даже значительное удорожание турбины может быть сравнительно за короткий срок компенсировано хотя бы небольшой, но реальной экономией теплоты.

Таким образом, из большого числа показателей, характеризующих в той или иной степени качество турбины, можно выделить следующие основные показатели, прямо или косвенно обусловленные ее конструкцией.

1. Надежность и долговечность – достаточная прочность, малый износ, сохранение формы и взаиморасположения деталей, отсутствие задеваний деталей в турбине при пуске, совершенство и достаточное количество защитных устройств.

2. Тепловая экономичность – высокий внутренний КПД и малое его снижение в эксплуатации, малые потери по паровым трактам, отсутствие вредных протечек пара (их минимизация), совершенство технологии изготовления, обеспечивающей необходимые зазоры.

3. Эксплуатационные расходы – быстрота пуска, малые расходы на обслуживание и ремонт, малый вес и расход металла, низкая стоимость турбины и сооружений, высокая технологичность, продолжительность работы без ремонта.

Многие из перечисленных показателей затруднительно определить количественно, числом, что необходимо для объективного выявления технического уровня изделия. Поэтому для показателей оценочных так же, как и для показателей классификационных, введем весовые коэффициенты.

Надежность эксплуатации будем оценивать по максимально допустимой скорости пуска τ с весовым коэффициентом 30 % (скорость пуска во многом определяет надежность эксплуатации турбины и ее маневренность). Тепловую экономичность - по удельному расходу теплоты q с весовым коэффициентом

28 %. Стоимость турбины – по значению параметра $B = \frac{H(u/c_0)^2}{\omega^2 D}$ [1] (D –

средний диаметр ступени, ω – частота вращения) с весовым коэффициентом 16 %. Параметр B пропорционален стоимости турбины, которая в [1] определяется через стоимость ступени и число ступеней. Стоимость ступени (диафрагмы, колеса в целом и корпус) принята пропорциональной D ($B = k i D$, i – число ступеней).

Металлоемкость турбины по удельной массе m (кг/кВт) с весовым коэффициентом 10 %. Стоимость сооружения – по удельной площади здания S (m^2 /кВт) с весовым коэффициентом 8 %, и по удельному объему здания V (m^3 /кВт) с весовым коэффициентом 8 %.

Суммарный оценочный коэффициент турбины рассчитывается по формуле

$$k_0 = 30 \frac{\tau_3}{\tau} + 28 \frac{q_3}{q} + 16 \frac{B_3}{B} + 10 \frac{m_3}{m} + 8 \frac{S_3}{S} + 8 \frac{V_3}{V}, \quad (2)$$

где индексом «3» отмечены единичные показатели турбины-эталона.

При одинаковых показателях турбины-аналога (рассматриваемой как эталон для сравнения) и оцениваемой турбины $K_0 = 100 \%$, в остальных случаях K_0 может быть как выше, так и ним 100% . Если все единичные показатели оцениваемой турбины ниже показателей турбины-аналога, то $K_0 > 100 \%$ и, следовательно, технический уровень оцениваемой турбины выше технического уровня турбины эталона. Если $K_0 < 100 \%$, то это свидетельствует о том, что какие-то показатели качества оцениваемой турбины ниже показателей турбины-аналога. При отсутствии данных о некоторых единичных показателях их отношения принимаются равными единице и в формуле (2) суммируются только весовые коэффициенты этих показателей.

Очевидна некоторая условность зависимостей (1) и (2), обусловленная как набором единичных показателей, так и условностью, в известной мере, весовых коэффициентов. Однако одинаковость критериев сравнения и одинаковость пусть в некоторых случаях и ориентировочных коэффициентов весовости обеспечивает по мнению авторов необходимую объективность сравнения. Очень важно, что критерий классификационный и критерий качества величины количественные.

Число показателей качества, включенных в зависимость (2), меньше числа показателей, предусмотренных ГОСТом 4.424-86. Однако номенклатура показателей предусмотренная этим стандартом, предназначена преимущественно для энергетических турбин большой единичной мощности. Для технологических турбин небольшой единичной мощности нами используется сокращенная номенклатура. В зависимости от конкретных условий сравнения критерий K_0 может быть дополнен рядом критериев по тем или иным единичным показателям качества, важным для данных изделий по их назначению и условиям использования. При этом принимается следующая количественная оценка. Пусть, например, дополнительно оценивается надежность эксплуатации, но известен только весовой коэффициент для средней наработки на отказ P в ряду других показателей P_{0i} , также влияющих на надежность эксплуатации (коэффициент готовности, долговечности и др.). Если $P_0 = 15 \%$, то коэффициент качества по надежности

$$k_H = 15 \frac{T}{T_0} + (100 - 15) \quad (3)$$

$$\text{(в общем виде } k_H = P_0 \frac{T}{T_0} + \sum_{i=2}^n P_{0i} \frac{A_i}{A_{0i}} \text{), } T - \text{ время наработки на отказ,}$$

где для всех остальных единичных показателей (с неизвестными весовыми показателями) их отношение к эталонным значениям приняты равными единице.

Такой прием оценки технического уровня может быть использован при определении коэффициентов качества по отдельным группам единичных показателей. Допустим необходимо оценить технический уровень изделия по

маневренности. В зависимости (2) надежность и маневренность суммарно определена весовым коэффициентом 30 %. Примем весовой коэффициент по маневренности равным 15 %. Тогда, если известны минимальное время пуска из холодного состояния, из неостывшего состояния T_x , минимальное время пуска из горячего состояния T_r , то коэффициент качества определяется по формуле

$$K_M = 15 \frac{T_{\text{ЭХ}}}{T_x} + 15 \frac{T_{\text{ЭН}}}{T_H} + 15 \frac{T_{\text{ЭГ}}}{T_r} + (100 - 45). \quad (4)$$

Пусть $\frac{T_{\text{ЭХ}}}{T_x} = 1,05$; $\frac{T_{\text{ЭН}}}{T_H} = 0,9$; $\frac{T_{\text{ЭГ}}}{T_r} = 0,95$,

получаем, что $K_M = 98,5$.

В зависимостях (2) и (4) эталонные значения единичных показателей при определении относительных величин стоят в числителе соответствующих дробей, а в зависимости (3) – в знаменателе. Это зависит от смысла единичного показателя. В (2) и (4) благоприятным является уменьшение значений единичных показателей оцениваемого изделия по сравнению с эталоном, а в зависимости (3), где определяется технический уровень по показателю времени наработки на отказ, благоприятным является увеличение значения единичного показателя оцениваемого изделия по сравнению с эталоном. Указанным формулой (3) способом можно выделить коэффициенты качества по ряду групп показателей качества: экономичности, вибрационной надежности, стоимости, показателей по системе регулирования (степень нечувствительности, максимальный заброс оборотов при сбросе нагрузки) и др.

Оценивание изолированно по группам показателей все же затрудняет проведение оценки в целом, так как по отдельным группам коэффициенты качества могут быть и больше и меньше 100 %, поэтому предпочтение следует отдать полностью итоговому, комплексному показателю по типу зависимости (2), где каждый из членов формулы может быть при необходимости еще и детализирован.

Приведенный количественный подход к оценке технического уровня, благодаря введению весовых коэффициентов и относительных значений единичных показателей, достаточно гибкий и легко может быть приспособлен к заданным конкретным условиям.

Список литературы: 1. Зальф Г.А., Звягинцев В.В. Тепловой расчет паровых турбин. – Л.: Машгиз, 1961. – 291 с. 2. Лобанов В.П. Новые данные КПД турбин высокого давления // Теплоэнергетика. – 1954. – № 4. – С. 52-54. 3. Pioleet G. A. New architecture for large impulse turbines // Revue Alstom. – 1985. – V. 2. – P. 5-14.

Поступила в редколлегию 19.04.2007