

ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

2015 **5**
сентябрь-
октябрь

Оценка защищённости объектов
топливно-энергетического комплекса
стр. 5

Алгоритм разработки
перспективных схем энергоснабжения городов
стр. 15

Прогнозирование производства
альтернативной энергии
методом логистического тренда
стр. 22



О внесении изменений в Правила по охране труда при работе на высоте
стр. 43

ISSN 2071-2219



УДК 519.873

Обоснование выбора состава оборудования при модернизации промышленных ТЭС

В. В. Барановский,*Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, доктор технических наук, профессор***Т. Ю. Короткова,***Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, кандидат технических наук, доцент***М. Ю. Коновалов,***Министерство обороны РФ, заместитель начальника службы вспомогательного флота департамента транспортного обеспечения*

Представлены современные подходы к обоснованию выбора состава основного оборудования в процессе модернизации промышленных ТЭС. Выбор состава оборудования представляет собой сложную задачу, для решения которой целесообразно применение методологии системного подхода с использованием теории критериального выбора и разработкой математической модели на базе теории оптимизации.

Ключевые слова: промышленная ТЭС, модернизация, оборудование, критериальный выбор, целевая функция.

Отличительной особенностью промышленных ТЭС по сравнению с городскими электростанциями или теплоэлектроцентралями является относительно невысокая агрегатная мощность основного энергооборудования, как правило не превышающая 50 МВт. Также весьма разнороден состав оборудования (по установленной мощности, по производителям, по технологии производства электроэнергии и т. п.). На большинстве промышленных ТЭС используются устаревшие паротурбинные технологии производства электроэнергии с относительно невысокими параметрами пара. КПД производства электроэнергии на таких ТЭС, как правило, не превышает 36 %.

Морально и физически устаревшее основное оборудование способствует повышению риска возникновения отказов и аварий, увеличению эксплуатационных затрат, связанных с восстановлением отказавшего или аварийного оборудования, и, как следствие, повышению энергоёмкости производства и снижению конкурентоспособности продукции. Это особенно заметно в целлюлозно-бумажной и топливной промышленности.

В табл. 1 в качестве примера представлен состав основного оборудования ТЭС филиала Группы «Илим» в г. Коряжме (Котласский ЦБК). Большинство агрегатов имеют срок службы 50 и более лет и превысили проектный ресурс в два и более раз, и для поддержания их работоспособности требуются значительные материальные и физические затраты.

В то же время в топливном балансе промышленных ТЭС существенную долю составляет природный газ. Указанное обстоятельство позволяет провести модернизацию ТЭС с использованием более современных парогазовых технологий производства электроэнергии со значительно более высоким КПД – порядка 55–60 %.

Для сохранения конкурентоспособности продукции отечественных предприятий и повышения их рентабельности уже в ближайшее время необходимо решать задачу модернизации основного энергетического оборудования промышленных ТЭС с совершенствованием технологии производства энергии. При решении этой задачи неизбежно возникает проблема выбора состава основного оборудования ТЭС, требующего тщательного обоснования принимаемых решений. Учитывая широкую номенклатуру выбора, предоставляемую отечественными и зарубежными энергомашиностроителями (табл. 2–6) [1], а также структурную сложность промышленных ТЭС и многовариантность комплектования оборудования в составе тепловых схем, эта задача требует проведения технико-экономических расчётов с использованием методологии системного подхода. От того, насколько этот выбор будет удачным, зависит многое:

- возможность органично вписать новое оборудование в существующую инфраструктуру ТЭС;
- технико-экономическая эффективность производства тепловой и электрической энергии;
- объёмы капитальных и эксплуатационных затрат при модернизации и эксплуатации ТЭС, а также эффективность и конкурентоспособность предприятия в целом.

Таблица 1

Характеристики оборудования ТЭС филиала Группы «Илим»

№ п/п	Тип оборудования и завод-изготовитель	Год ввода в эксплуатацию	Общая наработка, ч	Параметры пара	
				Давление, МПа	Температура, °С
Котельные агрегаты					
1	БКЗ-160-100Ф БКЗ	1962	294 804	10	540
2	БКЗ-160-100Ф БКЗ	1963	317 589	10	540
3	БКЗ-160-100Ф БКЗ	1963	322 284	10	540
4	БКЗ-160-100Ф БКЗ	1967	295 151	10	540
5	БКЗ 210-140Ф БКЗ	1966	274 079	14	570
6	БКЗ-210-140Ф БКЗ	1967	262 207	14	570
7	БКЗ-210-140Ф БКЗ	1971	242 256	14	570
8	БКЗ-210-140Ф БКЗ	1971	255 787	14	570
9	БКЗ-210-140Ф БКЗ	1973	215 281	14	570
10	БКЗ-210-140Ф БКЗ	1973	236 381	14	570
11	БКЗ-210-140Ф БКЗ	1974	218 048	14	570
Турбоагрегаты					
1	ВПТ-25-4 ТМЗ	1961	303 349	9	535
2	ВПТ-25-4 ТМЗ	1962	282 413	9	535
3	ВПТ-25-4 ТМЗ	1964	326 587	9	535
4	ПТ-60-90/13 ЛМЗ	1965	300 457	9	535
5	ПТ-60-130/13 ЛМЗ	1966	309 121	13	565
6	ПТ-60-130/13 ЛМЗ	1970	281 771	13	565
7	Р-50-130/13 ЛМЗ	1974	255 151	13	565

Таблица 2

Характеристики оборудования ТЭС (газотурбинные двигатели)

Модель	Мощность номинальная, МВт	КПД, %	Степень повышения давления	Расход рабочего тела через двигатель, кг/с	Частота вращения выходного вала генератора, об./мин	Температура газов на выходе из двигателя, °С	Эмиссия NOx, мг/м³	Наличие редуктора	Размеры, мм	Масса, кг	Ресурс до капремонта/назначенный, ч
ОАО «Пермский моторный завод»											
ГТУ-12ПЭР	12,7	33,7	16,1	45,9	6500/3000	493	150	+	5500×2000×2000	6300	25000/100000
ГТУ-16ПЭР	16,8	35,2	19,5	56,1	5300/3000	495	150	+	5500×2000×2000	6300	25000/100000
ГТЭ-16ПА	16,8	36,6	19,9	56,4	3000	478	150	+	5500×2000×2000	6300	25000/100000
ГТЭ-25П	23,8	38	23,7	76,7	5000/3000	473		+	6000×2200×2200	11000	25000/100000
ОАО «НПО „Сатурн”»											
ГТД-10РМ	10,4	36,5	17,6	33	4800/3000	515	100	+	4942×1800×1930	5050	25000/100000
ОАО «Кузнецов»											
НК-37	25	36,4	23,1	98	3000	460	40	–	6200×2400×2300	9150	25000/100000
ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение» (УМПО)											
АЛ-31СТЭ	18	36	18,1	66	3000	515	40	–	5500×2000×2200	7500	25000/75000
GE Power&Water											
LM2500+	30	37,3	20	85	3000	510	50	–	6860×2100×3000	5035	40000/160000
LM2500RB	31,9	39,2	23	85	6100/3000	514	50	+	6860×2100×3000	5035	40000/160000
LM6000PD-NGD Sprint	47,5	37,3	32,3	132	3000	446	50	–	7300×2000×2500	8200	40000/160000
Siemens AG, Energy Sector											
SGT-400	12,9	34,8	16,8	39,4	9500/1500	555	30	+	13500×2700×3800	75000	48000/–
SGT-750	35,93	38,7	23,8	96	6100/1500	462	30	+	20000×4500×5100	160000	40000/–
SGT-800	47	37,5	19	131,5	6600/1500	544	30	+	17000×4267×3700	172000	40000/–

Таблица 3

Характеристики оборудования ТЭС (паровые турбины)

Модель	Мощность номинальная/максимальная, МВт	Расход пара на номинальном/максимальном режиме, т/ч	Давление пара, МПа	Температура, °С	Частота вращения вала, об./мин	Удельная масса турбины, т/МВт
ОАО «Калужский турбинный завод»						
ПР-12/15-8,8/1,5/0,7	12/–	100/113,4	8,8	535	3000	2,4
ПТ-25/30-8,8/1,0-1	25/30	99/156	8,8	535	3000	2,0
ОАО «Турбоатом»						
Р-12-3,4/0,3	12/12	93,2/107,6	3,43	435	3000	2,4
ПТ-20-2,9/1,0/0,3	20/20	100,2/158,7	2,84	400	3000	5,85
ОАО «Силовые машины»						
Р-25-90/30	25/29	400/420	8,8	535	3000	4,1
ПТ-30-3,4	30/40	225/225	3,4	435	3000	6,2
ЗАО «Уральский турбинный завод»						
ПТ-30/35-90/10-5М	30/35	190/240	8,8	535	3000	4,3
Siemens AG, Energy Sector						
SST120	–/10		13,1	530	23 000	
SST150	–/20		10,3	505	13 300	

Таблица 4

Характеристики оборудования ТЭС (газотурбинные электростанции)

Модель	Мощность электрическая/тепловая, МВт	КПД, %	Модель двигателя	Котел паровой/водогрейный	Наличие редуктора	Размеры, мм	Масса, кг
Turbomach S.A. (Caterpillar Inc.)							
TBM-T130	15/25,8	35,2	Titan 130 GS	паровой/водогрейный	+	15600×2900×10000	90000
TBM-T250	21,75/40	39,0	Titan 250 GS	паровой/водогрейный	+	18200×3400×14000	99000

Таблица 5

Характеристики оборудования ТЭС (парогазовые электростанции)

Модель	Мощность электрическая, МВт	КПД, %	Количество газотурбинных двигателей/паровых турбин	Модель двигателя	Мощность двигателя электрическая, МВт	Расход газа на 100 % нагрузке, кг/ч	Мощность паровой турбины электрическая, МВт
Rolls-Royce Power Engineering Plc.							
RB211-G62 DLE	42,64	52,8	1ГТ/1ПТ	RB211-6761	31,17	5886	12,59
Trent 60DLE	64,23	52,7	1ГТ/1ПТ	Trent 60DLE	50,01	8683	15,26

Таблица 6

Характеристики оборудования ТЭС отечественных и зарубежных производителей (котлы-утилизаторы)

Модель	Тип двигателя	Расход газа двигателем, м³/ч	Теплопроизводительность, Гкал/ч	Давление пара, МПа	Паропроизводительность по перегретому пару, т/ч	Температура пара, °С	Температура газов на выходе из двигателя, °С	Размеры, мм	Масса, кг
ОАО «Балтийский завод – Судостроение»									
КУП 180			1,2	0,8	2,1	174	440	2910×2375×4800	7750
ОАО «ЗиО-Подольск»									
П-137	ГТЭ-160	495,4		9,86/0,87	223/52	509/217	544		
П-88	ГТЭ-110	1200000		7,3/0,7	242/35	501/231	545		

На выбор состава основного оборудования промышленных ТЭС при их модернизации оказывает влияние множество факторов, среди которых можно отметить следующие:

- номенклатура энергетического оборудования, предлагаемого отечественными и зарубежными энергомашиностроительными предприятиями для замены морально и физически устаревшего;
- вид используемого топлива и его стоимость с учётом динамики изменения стоимости;
- объёмы потребления тепловой и электрической энергии сторонними потребителями и предприятием на собственные нужды с учётом динамики их изменения;
- тарифы на отпускаемую тепловую и электрическую энергию сторонним потребителям;
- тип (газотурбинные, паротурбинные, дизельные, газопоршневые) и технико-экономические характеристики (агрегатная мощность, экономичность, ресурс и срок службы до капитального ремонта, проектный ресурс и др.) основного энергетического оборудования, предполагаемого для замены морально и физически устаревшего;
- объёмы капитальных затрат на модернизацию, а также эксплуатационных затрат после модернизации;
- сроки окупаемости основного оборудования и ряд других факторов.

Учитывая, что промышленные ТЭС представляют собой структурно-сложные системы, состоящие из большого количества элементов и систем с множеством связей между ними (механических, электрических, энергетических, информационных и др.), для их анализа целесообразно использовать системный подход, основные принципы которого изложены в [2–5]. Системный подход, являясь методологическим аппаратом исследования структурно-сложных систем, позволяет оценить качество системы по совокупности свойств составляющих её элементов с учётом структурного построения системы и иерархического разделения подсистем. С его использованием можно также разработать сложную систему с задаваемыми (требуемыми) свойствами на основе информации о свойствах составляющих элементов системы.

Устоявшаяся практика проектирования перспективных или модернизации существующих промышленных ТЭС регламентируется требованиями множества нормативно-технических документов. Использование основных принципов системного подхода при проектировании и модернизации ТЭС позволит существенно расширить нормативно-техническую базу и сделать выбор более обоснованным.

Исходя из методологии системного подхода при модернизации промышленных ТЭС, обоснования типа и состава основного оборудования, а также вариантов схемного исполнения (тепловой схемы) следует рассматривать задачу синтеза образа системы, иначе говоря, как обратную задачу анализа, когда объект анализа уже существует и единственен. Качественным отличием задачи синтеза от задачи анализа является то, что в результате её решения

рассматривается значительно большее количество информации о состоянии системы. Раскрывая заложенную в задаче синтеза неопределённость с точностью до альтернативы, мы получаем принципиально большую информацию, чем на том же уровне аппаратных средств можно получить в результате решения задачи анализа.

С учётом указанной особенности можно утверждать, что развитие методов обоснования облика проектируемых или модернизируемых промышленных ТЭС прежде всего связано с совершенствованием механизмов получения большого количества информации, обеспечивающей всесторонний анализ синтезируемых вариантов в интересах их последующей сравнительной оценки. Таким образом, при постановке задачи синтеза облика ТЭС необходимо изначально предположить, что её тип, состав и варианты схемного исполнения заранее неизвестны.

Выбор наиболее предпочтительного варианта оказывается непосредственно связанным с оценкой соответствия цели ТЭС. В данном случае можно считать, что наилучшим образом отвечает замыслу проекта тот вариант, которому соответствует наименьшее значение отношения вида

$$g = \frac{C}{E},$$

где C – стоимость создания и эксплуатации ТЭС (капитальные и эксплуатационные затраты);

E – показатель эффективности ТЭС, соответствующий цели её создания.

Под термином «облик ТЭС» в данном случае подразумеваются её тип (паротурбинная, газотурбинная, парогазовая и др.) и состав основного оборудования (количество и тип тепловых машин и т. п.), а также схемное исполнение (тип и структурное построение тепловой схемы). Рациональность тех или иных технических решений при обосновании облика перспективной промышленной ТЭС может быть установлена только путём оценки их влияния на комплекс технико-экономических показателей ТЭС и через него на целесообразность, эффективность и стоимость создания и эксплуатации (капитальные и эксплуатационные затраты) ТЭС.

В целях проектирования используется задача синтеза. Здесь в качестве аргумента математической модели выступает формализация наперёд задаваемых свойств ТЭС, а сочетание получаемых значений функции и её аргументов даёт необходимую информацию для получения облика проектируемого объекта.

Для решения таких задач наиболее полно подходит использование теории критериального выбора.

Обоснование решений с помощью критериев как количественной меры качества сравниваемых альтернатив занимает центральное место среди всех известных подходов к решению задачи выбора [2]. Критериальное правило чаще других используется в практической деятельности, а его механизм обеспечивается наиболее развитым математическим

аппаратом и лучше всего изучен. В этом смысле не является исключением и обоснование выбора наиболее предпочтительного облика перспективных промышленных ТЭС.

В основу практических задач с критериальными правилами выбора положено предположение о том, что между качественной и количественной оценкой каждого элемента предъявления может быть установлено такое соответствие, которое обеспечивало бы выбор предпочтительной альтернативы. Строго говоря, такое предположение несправедливо. Однако в практической жизни применение критериальных правил, построенных на этом принципе, часто даёт хорошие результаты. Этим и обуславливается их распространённость в задачах обоснования решений.

Принцип, положенный в основу критериального выбора, называют аксиомой выбора Цермело. Однако аксиома выбора определяет самые общие принципы выбора элементов (упорядочения) множеств и не имеет отношения к количественно-качественному переходу. В соответствии с этой аксиомой предполагается существование такой функции $g(x)$, что как только одна альтернатива предъявления x_1 становится в некотором смысле предпочтительнее какой-либо другой альтернативы x_2 того же предъявления, то сразу же значение этой функции, вычисленное относительно первой альтернативы, становится меньше (или, в противном случае, больше) значения функции, вычисленной относительно второй альтернативы. Приведённое утверждение можно записать следующим образом [2]:

$$x_1 > x_2 \leftrightarrow g(x_1) <(>) g(x_2),$$

где $>$ – знак предпочтения.

Функцию $g(x)$ обычно называют критерием или целевой функцией, а правило, связанное с применением этой аксиомы, – правилом критериального выбора. Можно также сказать, что функция $g(x)$ представляет собой количественную меру качества элементов предъявления и отражает цель оперирующей стороны.

Нередко можно встретить определение критерия как совокупности условий, определяющих решение задачи. Такая трактовка, скорее всего, связана с терминологией, исторически сложившейся в математической статистике, в которой заметное место занимают так называемые критерии согласия. Не исключено также, что значительный вклад в такое толкование определения критерия внёс сам механизм получения предпочтительного решения с использованием критериального правила выбора. Обычно действие этого механизма записывается в виде условия, которое с учётом приведённого выражения имеет вид [2]:

$$g(\hat{x}) \leq g(x), \forall x, \hat{x} \in \{X^f\},$$

где $\forall$ – квантор общности, который говорит о том, что написанное от него слева условие должно проверяться для всех без исключения альтернатив x из допустимого предъявления $\{X^f\}$;

$\hat{x}$ – альтернатива x , являющаяся выбранным элементом предъявления, то есть решения задачи.

Особое место среди задач выбора, использующих сложные механизмы, занимают многокритериальные задачи. Проблема выбора с использованием нескольких критериев заключается в отыскании решения на основе решений частных задач критериального выбора. Для получения такого решения необходимо, помимо правил критериального выбора, с помощью которого можно получить частные оценки альтернатив, иметь дополнительное условие (условия), связывающее между собой эти частные оценки. При несомненной новизне по отношению к задачам однокритериального выбора рассматриваемая проблема обладает определённой спецификой, сужающей общую постановку задачи. Смысл сужения заключается в том, что при постановке многокритериальной задачи внимание исследователя сосредоточено на поиске некоторого компромиссного решения, отвечающего распределению обобщённого ресурса между противоречивыми интересами сторон.

Решая относительно частных интересов сторон задачи однокритериального выбора, можно получить альтернативы, ограничивающие некоторую область, более узкую, чем область допустимых решений. При этом каждой точке такой области будет соответствовать некоторое компромиссное распределение интересов противодействующих сторон. Эта область компромиссов, по существу представляющая собой новую область допустимых решений, получила название области Парето, которую также называют областью неухудшаемых решений. Данное название объясняется свойством области Парето: внутри неё нельзя найти другой такой точки, чтобы улучшался какой-либо из частных критериев, а остальные при этом ухудшались. Таким образом, механизм многокритериальной задачи выбора на первом этапе должен обеспечивать построение области Парето, а затем, на втором этапе её решения, – получение самого решения многокритериальной задачи. Это решение будет количественно отражать факт предпочтения одних интересов сторон в задаче перед другими и занимать промежуточное положение между частными решениями однокритериальных задач [2, 3].

Задачи синтеза представляют собой прогнозные модели, позволяющие предполагать с той или иной степенью достоверности облик объекта или процесса, отвечающего некоторым заданным свойствам. Здесь в качестве аргумента модельной функции выступает формализация задаваемых свойств, а сочетание получаемых значений функции и её аргументов даёт необходимое количество информации для получения облика объекта (процесса).

В теории принятия решений задачи синтеза делятся на два существенно различающихся подкласса: задачи направленного и ненаправленного

синтеза. Модели задач ненаправленного синтеза в основном строятся на законах подобия. При этом моделируемый объект или процесс получается из одного или нескольких известных прототипов с использованием тех или иных правил пересчёта в зависимости от того, какие изменения претерпели свойства нового объекта (процесса) по отношению к старому. Модели направленного синтеза также используют информацию о существующих аналогах, но в отличие от моделей ненаправленного синтеза, трансформация их собирательного образа происходит целенаправленно, например под воздействием целевой функции (критерия).

Использование критериального подхода в задачах направленного синтеза при обосновании облика перспективных промышленных ТЭС позволяет подобрать такое рациональное сочетание характеристик проектируемой или модернизируемой ТЭС (технических, стоимостных, технико-экономических), которое в наибольшей степени будет удовлетворять целевому назначению ТЭС, имея при этом высокие значения показателей технико-экономической эффективности.

Для реализации методологии направленного синтеза в задачах обоснования наиболее предпочтительных обликов перспективных ТЭС необходима разработка математической модели на базе теории опти-

мизации. Частными фрагментами такой математической модели являются:

- общая постановка задачи оптимизации технико-экономических характеристик ТЭС;
- содержательная постановка задачи оптимизации;
- обоснование метода оптимальных решений.

Таким образом, изложенные подходы целесообразно использовать при обосновании выбора состава оборудования в процессе модернизации или при проектировании промышленных ТЭС. Дальнейшее развитие указанного направления будет связано с разработкой теоретического и методологического аппарата, позволяющего практически выполнять такие обоснования, которые существенно сократят расходы на производство тепловой и электрической энергии промышленными ТЭС, повысят рентабельность предприятий и конкурентоспособность выпускаемой ими продукции. Иначе говоря, для принятия решений в области создания и совершенствования промышленных ТЭС будут предприняты попытки обосновать объём полезной информации и механизмы, с использованием которых на основании обработки указанной информации можно получить предпочтительное решение по выбору облика перспективной ТЭС.

Литература

1. Турбины и дизели. Каталог энергетического оборудования. – Рыбинск: ООО «Турбомашин», 2014.
2. Захаров И. Г. Обоснование выбора. Теория практики. – СПб.: Судостроение, 2006.
3. Блауберг И. В., Садовский В. Н., Юдин Э. Г. Системный подход в современной науке // Проблемы методологии системного исследования. – М.: Мысль, 1970.
4. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. – М.: Радио и связь, 1990.
5. Месарович М., Такахага Я. Общая теория систем: Математические основы. – М.: Мир, 1978.

Feasible choice of industrial power station equipment before modernization

V. V. Baranovsky,

Saint Petersburg State technological university of plant polymers, Doctor of Science, professor

T. Yu. Korotkova,

Saint Petersburg State technological university of plant polymers, PhD, associate professor

M. Yu. Konovalov,

Ministry of Defence of the Russian Federation

Our new approach is intended to make a feasible choice of industrial power station equipment before modernization. This choice is a complicated problem which can be resolved with the system approach using a criterion choice and a mathematical model based of the optimization theory.

Keywords: industrial power station, modernization, equipment, criterion choice, objective function.