

ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Проведено якісний аналіз об'єктивності існуючих методів визначення показників теплової економічності електростанцій з виробництва електричної та теплової енергії в теплофікаційних циклах. Обґрунтовано новий загальний підхід до вирішення задач розподілу витрат палива між продуктами комбінованого виробництва електричної та теплової енергії методами технічної термодинаміки.

Проведен качественный анализ объективности существующих методов определения показателей тепловой экономичности электрических станций по производству электрической и тепловой энергии в теплофикационных циклах. Обоснован новый общий подход к решению задач распределения затрат топлива между продуктами комбинированного производства электрической и тепловой энергии методами технической термодинамики.

Экономичность комбинированного производства электрической и тепловой энергии, как и эффективность отдельных производств, оценивают по удельным затратам условного топлива на производство (отпуск) электрической энергии и тепловой энергии. Такие оценки позволяют наиболее объективно сравнивать установки комбинированного производства между собой и с установками отдельного производства электрической и тепловой энергии по техническим и экономическим показателям [1].

Удельные затраты условного топлива обратно пропорциональны коэффициентам полезного действия соответствующих процессов преобразования энергии и представляют собой величины, обусловленные физическими особенностями работы энергетического оборудования.

Методическое обеспечение объективной оценки показателей эффективности электрических станций, включающее регламентацию и контроль погрешности оценки данных показателей, представляет собой типичную задачу технической термодинамики.

Отраслевые стандарты, действующие в энергетике Украины и других стран мира, предъявляют строгие требования к достоверности определения показателей тепловой экономичности электрических станций, удовлетворение которым требует сведения тепловых балансов оборудования с погрешностью на уровне долей процента. Однако наряду с этими требованиями отсутствуют какие-либо нормативные регламентации методической погрешности оценок экономичности электростанций при комбинированном производстве электрической и тепловой энергии. Объясняется это тем, что данный сугубо термодинамический вопрос, по сути, переведен в плоскость экономических понятий и категорий и решается на основе не общепринятых критериев физической достоверности, а на основе оценки внешней экономической конъюнктуры [2].

Подмена физических соображений конъюнктурными основывается на аксиоматических утверждениях о невозможности объективного решения данного вопроса в термодинамических рамках, оправдывающих произвольные "назначения" показателей эффективности комбинированного производства по соображениям экономической выгоды. Для создания видимой объективности таким соображениям придается форма мето-

дов и методик, использующих термодинамические понятия и терминологию.

В настоящее время известно более десяти методов расчетного распределения затрат условного топлива между электрической и тепловой энергией при комбинированном производстве, практическое использование которых приводит к существенному, физически немотивированному разбросу показателей эффективности теплофикационных установок.

Субъективизм в оценках наиболее экономичных энергетических технологий комбинированного производства видов энергии дестабилизирует экономическое управление электроэнергетикой, нивелирует достижения научно-технического прогресса в данной и смежных отраслях экономики, поскольку обеспечивает возможность улучшения рентабельности энергетических предприятий без приложения инженерных усилий по снижению технологических издержек. Произвол в оценках себестоимости получения электрической и тепловой энергии переносится на уровень потребления и вносит элемент хаоса в оценки себестоимости и энергоёмкости промышленных товаров и услуг.

Цель настоящего раздела работы состоит в попытке качественного анализа достоверности известных методов определения показателей эффективности комбинированного производства электрической и тепловой энергии на основе общепринятых критериев оценки объективности определения физических величин.

Как известно, основная сложность достоверного определения показателей эффективности комбинированной выработки по сравнению с отдельной состоит в том, что здесь требуется знать не только фактические затраты топлива на электростанции в условном выражении, но и их составляющие (долевые затраты), относящиеся к отпуску электрической и тепловой энергии. Такие затраты можно измерить косвенно, на основании пересчета измеренных значений параметров рабочего тела энергоустановки и контролируемых данных ее энергетического баланса. Объективность косвенных измерений определяется достоверностью определения исходных данных и методическими погрешностями пересчета этих данных в искомые величины.

В зависимости от принципиальных особенностей формирования исходных данных и их последующего пересчета, методы разделения затрат при комбиниро-

данном производстве видов энергии классифицируются на экономические и термодинамические.

Экономические методы предполагают возможность оценки показателей эффективности комбинированного производства на основе его сравнения с системой энергетических установок раздельного производства электрической и тепловой энергии - объектом сравнения. В результате сравнения определяется и распределяется между продуктами экономия топлива, возникающая при условной замене раздельных производств комбинированным производством. Величина экономии топлива исчисляется как разность между затратами топлива на объектах сравнения и на анализируемой электростанции при равных отпусках электрической и тепловой энергии.

По принципу выбора объектов сравнения экономические методы разделяются на внешние (системные) и внутренние (объектные). В системных методах в качестве базы сравнения используются либо конкретные действующие конденсационные электростанции и котельные, либо воображаемые объекты, обладающие типичными или "среднесистемными" свойствами. Системный подход не требует знания внутренней структуры сравниваемых установок. Однако отсутствие объективных критериев выбора свойств объектов сравнения, а также ограничений, накладываемых на результат оценки, определяет заведомый субъективизм системных методов. Действительные изменения свойств объектов сравнения, как и возможные "переназначения" базы сравнения, приводят к немотивированным изменениям эффективности анализируемого производства, не связанным с реальными изменениями его свойств. Недопустимость внешних или системных подходов к объективной оценке показателей тепловой экономичности ТЭЦ оговорена, в частности, в [1].

Внутренние или объектные методы основаны на исчислении экономии топлива по показателям эффективности котельного и турбинного оборудования анализируемой электростанции. Предполагается, что отпуск тепловой энергии возможен непосредственно от энергетических котлов, а электрическая энергия может производиться по чисто конденсационному циклу. Данный условный режим раздельной выработки принимается в качестве базы сравнения с действительными режимами работы электростанции. Объектные экономические методы устраняют возможность внешних влияний на результат оценки работы электростанций, но содержат условные параметры, задание которых связано с определенным произволом. К таким параметрам относятся, в частности, величины, характеризующие конденсационный режим работы теплофикационных турбин. Для турбоустановок без конденсаторов такие режимы нереализуемы и являются чисто условными. Для прочих установок конденсационные режимы реализуются в условиях, заведомо отличающихся от фактических условий работы последних ступеней и конденсаторов турбин в теплофикационном режиме. Таким образом, величина экономии топлива в объектных методах является величиной условной, зависящей от задания свойств конденсационных режимов работы турбин.

Все экономические методы приводят к единой форме записи соотношений для расчета долевых затрат (индекс * относится к раздельным производствам):

$$B_T = B_T^* - m_T \cdot \Delta B, \quad B_E = B_E^* - m_E \cdot \Delta B$$

где B_E - долевой расход топлива на производство электроэнергии; B_T - долевой расход топлива на отпуск тепловой энергии; ΔB - экономия условного топлива; m_E - коэффициент отнесения экономии топлива на отпуск электроэнергии; m_T - коэффициент отнесения экономии топлива на отпуск тепловой энергии.

Различия между ними связаны с определением коэффициентов отнесения экономии топлива на электрическую энергию m_E и на тепловую энергию m_T . По этому признаку экономические методы разделяются на методы крайних оценок и дистрибутивные [3]. Методы крайних оценок, называемые также методами остаточной стоимости, относят всю экономию топлива на один продукт комбинированного производства, а дистрибутивные предполагают деление экономии между обоими продуктами. К крайним принадлежит метод эквивалентной КЭС, относящий всю экономию топлива на тепловую энергию ($m_T = 1$) и физический метод, относящий всю экономию на электрическую энергию ($m_T = 0$) [2, 3, 6]. В последние годы крайние методы уступают место дистрибутивным, среди которых наиболее известны следующие:

1. Метод деления экономии пропорционально затратам раздельных производств, известный также как "треугольник Гинтера" [2]:

$$m_E = \frac{B_E^*}{B_E^* + B_T^*}, \quad m_T = \frac{B_T^*}{B_E^* + B_T^*}.$$

2. Метод деления экономии пропорционально отпускам продукции, или метод АО "Мосэнерго" [4]:

$$m_E = \frac{E}{E + Q}, \quad m_T = \frac{Q}{E + Q}.$$

3. Метод равной экономии, применяемый в действующем отраслевом руководящем документе [5], разработанном АО "ЛьвовОРГРЭС":

$$m_E = \frac{1}{2}; \quad m_T = \frac{1}{2}.$$

Дистрибутивные экономические методы, как и методы крайних оценок, не имеют строгой физической основы, и сравнительные оценки степени их объективности производятся эмпирически. Опыт таких оценок для теплофикационных установок ТЭЦ различных типов показывает, что оба метода пропорционального деления экономии приводят к менее реалистичным результатам, чем метод равной экономии, дающий приемлемые значения удельных затрат для многих теплоэлектроцентралей. Однако данный метод не позволяет в должной мере "уменьшить" удельные затраты топлива на отпуск тепла с паром нерегулируемых отборов конденсационных энергоблоков ТЭС. Можно предположить, что одной из причин недостаточно эффективного применения метода равной экономии является не вполне удачное задание условных параметров конденсационного режима сравнения. Этот недостаток может быть устранен на основе сравнения с точными методами деления затрат.

Термодинамические методы деления затрат - первый и второй эксергетические методы и собственно термодинамический метод - не связаны с определением экономии топлива и используют объективную исходную информацию о работе анализируемой установки. Общей основой данных методов служит второе начало термодинамики, а объектом рассмотрения - расширен-

ная система, включающая процессы преобразования энергии, ее использования и отвода в окружающую среду.

В основе эксергетических методов разделения лежит принцип эквивалентности или полной взаимной преобразуемости механической энергии и максимальной работоспособности (эксергии) тепловой энергии по второму началу термодинамики. Исходя из этого, для идеальной установки комбинированного производства, работающей без потерь, справедлив закон распределения затрат топлива пропорционально эксергии продуктов [2]. Для обычных комбинированных производств, имеющих потери, закон пропорционального разделения затрат не действует. Здесь необходимы дополнительные допущения о разделении потерь энергии. В первом эксергетическом методе все потери относят на электрическую энергию. Во втором методе они распределяются пропорционально эксергии полезных продуктов, как и для идеальной установки. Оба способа разделения потерь не имеют строгого доказательства и являются априорными [6].

Практические расчеты показателей тепловой экономичности показали, что эксергетические методы качественно верно описывают зависимость удельных затрат топлива от начальных и конечных параметров пара, но несколько завышают удельные затраты топлива на производство электрической энергии. Первый эксергетический метод, дающий менее реалистичные результаты, на практике не используется, и термин "эксергетический метод разделения затрат" относится ко второму эксергетическому методу.

Определенный произвол разделения энергетических потерь эксергетическими методами устраняется термодинамическим методом. Основные положения собственно термодинамического метода определения показателей тепловой экономичности комбинированного производства электрической и тепловой энергии описаны в [7]. Там же приведено обоснование принципиальной возможности прямых измерений долевых затрат тепла и установлена общая связь между долевыми затратами и рабочими параметрами комбинированного производства, обеспечивающая возможность косвенных измерений долевых затрат топлива с контролируемой погрешностью. Объективность принципиальных соотношений термодинамического метода определяется тем, что они непосредственно, без упрощающих предпосылок, вытекают из точных физических законов - первого и второго начал термодинамики. Т.е. по определению, выражают точный физический закон, определяющий общую закономерность перехода энергии рабочего тела адиабатического процесса в техническую работу и полезную теплоту. В частных случаях обратимых тепломеханических процессов и чисто механических процессов термодинамический метод асимптотически переходит в эксергетический закон разделения и закон сохранения и превращения механической энергии, соответственно. Дополнительным подтверждением объективности термодинамического метода может служить его инвариантность по отношению к обосновывающим подходам.

Ниже приведен вывод основных соотношений метода на основе сравнительного анализа комбинированного и отдельных производств электрической и тепловой энергии с применением тепловых машин.

Рассмотрим систему производства электрической и тепловой энергии, приведенную на рис. 1, которая включает источник тепла 1, приемник тепла 2, тепловые двигатели 3а и 3б, генератор 4, приемник электрической энергии 5, окружающую среду 6.

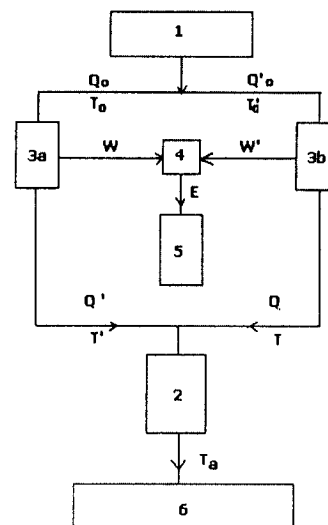


Рис. 1

Энергетические потоки, поступающие в приемник тепла и приемник электрической энергии, будем рассматривать как виды полезной продукции. Для определенности будем считать, что тепловой двигатель 3а, именуемый в дальнейшем объектом замещения, представляет собой установку комбинированного производства тепловой энергии и внешней технической работы. Тепловой двигатель 3б имеет иную внутреннюю структуру и именуется в дальнейшем объектом сравнения. Предположим, что тепловые двигатели 3а и 3б могут включаться в работу попеременно в произвольные моменты времени. При этом факт включения в работу каждого из них может быть установлен только на основании периодического контроля изменений установившихся параметров входных и выходных потоков энергии, в дальнейшем - макропараметров.

Предположим, что свойства объекта замещения фиксированы, а свойства объекта сравнения могут изменяться. Тогда специальным подбором этих свойств можно добиться состояния, при котором объект сравнения окажется внешне неотличимым от объекта замещения в том смысле, что контроль изменений любого из макропараметров не позволит различить объект, находящийся в работе в момент контроля. Факт внешней неразличимости означает, что все внешние свойства объектов сравнения и замещения тождественны.

Этот факт устанавливается на основе равенства основных макропараметров, характеризующих работу каждого из объектов:

$$Q_0 = Q'_0; \quad Q = Q'; \quad W = W' \quad (1)$$

$$T_0 = T'_0; \quad T = T' \quad (2)$$

Индивидуальные свойства объектов замещения и сравнения характеризуются определенными значениями энергетических потерь:

$$w_p = W_o - W, \quad (3)$$

$$w'_p = W'_o - W', \quad (4)$$

где W_o и W'_o максимально возможные значения технической работы.

Максимально возможные значения технической работы обоих объектов определяются только температурами и величинами входящих и выходящих потоков тепла по теореме Карно, поэтому при равенстве этих параметров они должны совпадать между собой. Отсюда следует, что потери технической работы объекта сравнения в состоянии внешней неразличимости равны соответствующим потерям объекта замещения:

$$w_p = w'_p \quad (5)$$

Сравним между собой уравнения баланса энтропии обоих объектов (уравнения второго начала термодинамики):

$$\dot{S}_p = \frac{Q_T}{T} - \frac{Q}{T_o} \quad (6)$$

$$\dot{S}'_p = \frac{Q'_T}{T'} - \frac{Q'}{T'_o} \quad (7)$$

Учитывая здесь условия (1) и (2), заключаем, что в случае внешней неразличимости должны совпадать не только потери энергии, но и скорости внутреннего производства энтропии в объектах замещения и сравнения:

$$\dot{S}_p = \dot{S}'_p \quad (8)$$

Уравнения баланса энергии объекта замещения (первого начала термодинамики) при фиксированном и нулевом значении потерь технической работы имеют вид:

$$Q = W + Q_T \quad (9)$$

$$Q = W + w_p + Q_{T_o} \quad (10)$$

Рассматривая данные уравнения вместе с уравнением второго начала термодинамики (6) и принимая во внимание, что в случае нулевых потерь энергии скорость внутреннего производства энтропии равна нулю, не трудно прийти к соотношению:

$$\dot{S}_p = \frac{W_p}{T} \quad (11)$$

Теперь предположим, что объект сравнения (Зв) состоит из двух установок раздельного производства технической работы и тепловой энергии (рис. 2): установки 7, предназначенной для производства только внешней технической работы в термодинамическом цикле между температурами источника тепла и окружающей среды с отводом тепла в окружающую среду, и установки 8, предназначенной для производства только тепловой энергии в обратном термодинамическом цикле между температурой окружающей среды и температурой приемника тепловой энергии с затратой части технической работы, производимой установкой 7.

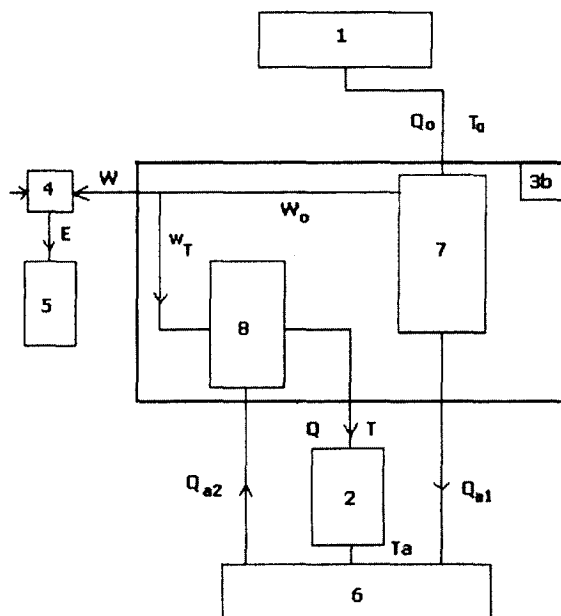


Рис. 2

Отметим, что только такая структура объекта сравнения в состоянии обеспечить внешнюю неразличимость с объектом замещения при произвольном задании потерь его технической работы.

Возможные потери технической работы в установках 7 и 8 обозначим, соответственно, через w_{p1} и w_{p2} . Из условия внешней неразличимости объектов замещения и сравнения (5) находим:

$$w_{p1} + w_{p2} = w_p \quad (12)$$

С другой стороны, из анализа уравнений первого и второго начал термодинамики для каждой из установок 7 и 8 в состояниях с данным и нулевым уровнем потерь технической работы, выполненного так же, как это сделано выше для объекта замещения, не трудно определить значения скорости внутреннего производства энтропии в данных установках:

$$\dot{S}_{p1} = \frac{w_{p1}}{T_a} \quad (13)$$

$$\dot{S}_{p2} = \frac{w_{p2}}{T} \quad (14)$$

Внутреннее производство энтропии в объекте сравнения представляет собой сумму производств энтропии в установках, составляющих объект:

$$\dot{S}_p = \dot{S}_{p1} + \dot{S}_{p2} = \frac{w_{p1}}{T_a} + \frac{w_{p2}}{T} \quad (15)$$

Сравнив это выражение с соотношением (11) для скорости производства энтропии в объекте замещения и учитывая при этом соотношение (12), приходим к уравнению:

$$\frac{w_p}{T} = \frac{(w_{p1} + w_{p2})}{T} = \frac{w_{p1}}{T_a} + \frac{w_{p2}}{T} \quad (16)$$

Решая (16) совместно с (12), находим:

$$w_{p1} \equiv 0; \quad w_{p2} \equiv w_p \quad (17)$$

Физический смысл полученного решения состоит в том, что состояние внешней неразличимости объектов замещения и сравнения достигается только тогда, когда все потери технической работы в установке замещения относятся на производство тепловой энергии, а производство технической работы осуществляется без потерь.

Но внешняя техническая работа, производимая установкой 7 при отсутствии потерь, определяется теоремой Карно:

$$W_0 = Q_0 \cdot \eta_0, \quad (18)$$

где $\eta_0 = \frac{T_0 - T_a}{T_0}$ - КПД цикла Карно.

Удельный расход тепла на получение технической работы в установке 7 определяется формулой:

$$q_E = \frac{Q_0}{W_0} = \frac{1}{\eta_0} = \frac{T_0}{T_0 - T_a} \quad (19)$$

Расход тепла на производство электрической энергии пропорционален части технической работы, затрачиваемой на привод генератора:

$$Q_E = q_E \cdot W = \frac{W}{\eta_0} \quad (20)$$

При этом расход тепла источника на получение тепловой энергии в установке 8 составит:

$$Q_T = Q_0 - Q_E = Q_0 - \frac{W}{\eta_0} \quad (21)$$

Поскольку свойства объектов замещения и сравнения в условиях внешней неразличимости по определению тождественны, полученные соотношения определяют точный алгоритм разделения затрат тепла между продуктами комбинированного производства электрической и тепловой энергии.

Соотношения (20) и (21) совпадают с выражениями для долевых затрат тепла, полученными в [7] на основе принципиально иного подхода, что подтверждает объективность данных соотношений и их пригодность для количественной оценки методической погрешности определения показателей эффективности комбинированного производства электрической и тепловой энергии.

Условные обозначения и сокращения

T_0 - средняя температура подвода тепла; T - средняя температура отвода тепла к потребителям тепловой энергии; T_a - температура окружающей среды; Q_0 - расход тепла; Q_E - расход тепла на производство электрической энергии; Q_T - расход тепла на производство тепловой энергии; Q - отвод тепла к приемнику тепла; W - механическая энергия, техническая работа; w_p - потери механической энергии, технической работы; W_0 - максимально возможная техническая работа; E - электрическая энергия; s - скорость производства энтропии; B - суммарный расход условного топлива; B_E - долевой расход топлива на производство электроэнергии; B_T - долевой расход топлива на отпуск тепловой энергии; ΔB - экономия условного топлива; m_E - коэффициент отнесения экономии топлива на отпуск электроэнергии; m_T - коэффициент отнесения экономии топлива на отпуск тепловой энергии.

1. Горшков А.С. *Технико-экономические показатели тепловых электростанций*. -М.: Энергия. -1974. -239 с.
2. Pustovalov Ju. V. *Exergetic Method of Cost Distribution for Co-generation Plants from Idea (1926) up to the Present Day // Energy System and Ecology. -Proc. of the Int. Conf.-Cracow, Poland. -July 5-9. -1993. -P. 513-526.*
3. Обущаров А., Геновски И. *Распределение на разходите при комбинирано производство на електро- и топоенергия // Энергетика. -1998. -№ 2,3. -С. 8-15.*
4. Александров А.П. *Определение топливных затрат на энергию, отпускаемую с ТЭЦ // Энергетик. -1995. -№ 1. -С. 7-8.*
5. ГКД 34.08.108-98. *Розподіл витрат палива на теплових електростанціях на відпущену електричну і теплову енергію при їх комбінованому виробництві. -Київ. -НДІЕнергетики. -1998.*
6. Нитч Р. *Эксергетическое разделение затрат комбинированной выработки тепла и электрической энергии и введение эксергетического тарифа на тепло для отопления // Энергия и эксергия. Под редакцией В.М. Бродянского. -М: Мир. -1968. -С. 106-121.*
7. Дубовской С.В. *Термодинамический метод разделения затрат в комбинированных энергетических процессах // Промышленная теплотехника. -1995. -Т. 17. -№ 1-3. -С. 85-91.*