

О ВЫБОРЕ ТИПА ПРИВОДА ДЛЯ РАБОЧИХ МАШИН

В. А. БРАГИН

Представлено проф.-доктором И. Н. БУТАКОВЫМ

В настоящее время во многих отраслях промышленности (машиностроение, металлургия, химия) наряду с электрическими двигателями для привода рабочих машин широко используется паровой привод. Последний, особенно при небольших мощностях, предполагает применение противодавленческих паровых двигателей. Это понижает их стоимость и повышает надежность работы. Но экономичность паровых двигателей в основном определяется возможностями утилизации тепла отработавшего пара. Возможности же эти обычно являются ограниченными, особенно при наличии заводской ТЭЦ. Использование отработавшего в двигателе привода пара для отопительных или технологических нужд связано с перераспределением выработки конденсационных и теплофикационных квтч на ТЭЦ, что значительно понижает эффективность парового привода. Поэтому представляется интересным провести сравнение электрического привода с паровым при различных схемах утилизации тепла отработавшего пара. Такое сравнение проделано Л. А. Мелентьевым [1, 2]. В основу методики сравнения он положил приведение сравнимых схем (с электрическим и паровым приводом) к равному отпуску тепла от котельной ТЭЦ и сопоставление их по полезному отпуску электроэнергии. При этом экономичность типа привода определяется отношением $\xi = \frac{W_{\text{э}} - W_{\text{нп}}}{W_{\text{н}}}$. Если $\xi > 1,0$, то более эффективен электрический привод и наоборот.

Но при выводе формулы для определения экономии топлива от применения электрического привода допускается целый ряд неточностей. Например, из сравнения выпадают все к.п.д. ТЭЦ и привода за исключением к.п.д. котельной и внутреннего относительного к.п.д. Принятие за основу указанной методики значительно схематизирует при некоторых режимах работы ТЭЦ сравнение выбранных схем. Затем приближенно принимается, что расход пара на паровой двигатель привода равен расходу пара из отбора турбины для тепловых потребителей. Наконец, полученная формула не дает возможности судить об изменении относительной эффективности привода с перспективным изменением энергетического коэффициента заводской ТЭЦ или энергосистемы.

Указанные неточности в основном могут быть устранены, если использовать для сравнения различных типов приводов метод теплового баланса [3, 4].

Тепловой баланс составляется для системы: заводская ТЭЦ — привод. При этом предполагается, что как при электрическом приводе, так

и при паровом, указанная система выдает внешним потребителям одно и то же количество продукции (электроэнергию и теплоэнергию). Тогда разница в расходах тепла топлива в системе покажет, какой привод является более эффективным в данных условиях.

Рассмотрим это на наиболее сложном примере, когда пар к паровому приводу подается из отборов главных турбин ТЭЦ, а тепло его отработавшего пара частично используется для вытеснения теплофикационных отборов турбин ТЭЦ и частично для вытеснения пара от РОУ.

При наличии электрического привода тепловой баланс указанной системы будет иметь вид:

$$\frac{860\mathcal{E}'_T + Q'_{отб}}{\eta'_T} + \frac{860\mathcal{E}''_T + Q''_{отб}}{\eta''_T} + \frac{860(\mathcal{E} - \mathcal{E}'_T - \mathcal{E}''_T)}{\eta_K} + \frac{Q_{роу}}{\eta_{ку} \cdot \eta_n} + \frac{860\mathcal{E}_{пр}}{\eta_K \cdot \eta_c \cdot \eta_{дв}} = \frac{860\mathcal{E} + Q_{отп} + 860\mathcal{E}_{пр}}{\eta'}, \quad (1)$$

а при паровом приводе:

$$\begin{aligned} & \frac{860\mathcal{E}'_T + Q'_{отб}}{\eta'_T} + \frac{860\mathcal{E}''_T + Q''_{отб}}{\eta''_T} + \frac{860(\mathcal{E} - \mathcal{E}'_T - \mathcal{E}''_T)}{\eta_K} + \frac{Q_{роу}}{\eta_{ку} \cdot \eta_n} + \\ & + \frac{860(\mathcal{E}_{пр} - \mathcal{E}^T_{пр})}{\eta^B_{пр}} + \frac{860\mathcal{E}^T_{пр} + Q'_{пр} + Q''_{пр}}{\eta^T_{пр}} - \frac{860\Delta\mathcal{E}'_T + Q'_{пр}}{\eta'_T} + \frac{860\Delta\mathcal{E}''_T}{\eta''_T} - \\ & - \frac{860\Delta\mathcal{E}_T}{\eta_K} + \frac{860\Delta\mathcal{E}''_T}{\eta''_T} - \frac{Q_{пр}}{\eta_{ку} \cdot \eta_n} = \frac{860\mathcal{E} + Q_{отп} + 860\mathcal{E}_{пр}}{\eta''} \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь соответственно обозначено:

$\mathcal{E}'_T$ и $\mathcal{E}''_T$ — выработка электроэнергии на базе теплофикационного и технологического отборов, *квтч/год*;

$\mathcal{E}$ — общая выработка электроэнергии на ТЭЦ, потребная для внешних потребителей, *квтч/год*;

$\Delta\mathcal{E}'_T$ и $\Delta\mathcal{E}''_T$ — те изменения выработки электроэнергии ($\mathcal{E}'_T$ и $\mathcal{E}''_T$), которые произошли на ТЭЦ вследствие появления парового привода, *квтч/год*;

$Q'_{отб}$ и $Q''_{отб}$ — тепло, отпущенное из отборов турбин, *ккал/год*;

$Q_{роу}$ — тепло, отпущенное из РОУ, *ккал/год*;

$\mathcal{E}_{пр}$ — количество энергии, потребное для привода рабочей машины, *квтч/год*;

$\mathcal{E}^T_{пр}$ — то же, но при использовании тепла выхлопного пара, *квтч/год*;

$Q'_{пр}$ и $Q''_{пр}$ — тепло выхлопа парового привода, использованное для замещения части $Q'_{отб}$ и $Q_{роу}$, *ккал/год*;

при этом $Q'_{пр} + Q''_{пр} = Q_{пр}$, а $Q'_{пр} = \psi \cdot Q_{пр}$ и $Q''_{пр} = (1 - \psi) Q_{пр}$.

Здесь коэффициент ψ показывает, какая доля из всего использованного тепла выхлопа пошла на замещение части $Q'_{отб}$

$Q_{отп} = Q'_{отб} + Q''_{отб} + Q_{роу} = Q'_{отб} + Q''_{отб} + Q_{роу} - Q'_{пр} - Q''_{пр} + Q_{пр}$ — общее количество теплоэнергии, отпущенной для внешних потребителей, *ккал/год*;

η'_T , η''_T , η_K , $\eta_{ку}$, η_n — к. п. д. по выработке тепла для отопления, технологических целей, по выработке конденсационных квтч. котельной и потока тепла внутри ТЭЦ [3, 4];

$\eta_{\text{с}}$, $\eta_{\text{дв}}$ — к.п.д. электрической сети и двигателя;
 $\eta_{\text{нр}}^{\text{с}}$, $\eta_{\text{нр}}^{\text{т}}$ — к.п.д. парового двигателя при работе на выхлоп и с использованием отработавшего пара. Определяются так же, как $\eta_{\text{к}}$ и $\eta_{\text{т}}$ [3], но только вместо произведения $\eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{н}}$ подставляется $\eta_{\text{т}}^{\text{с}} \cdot \eta_{\text{н}}^{\text{с}}$.

$\eta_{\text{н}}^{\text{с}}$ — к.п.д., учитывающий дополнительные потери тепла паропроводом от ТЭЦ до двигателя привода;

η' , η'' — общие к.п.д. системы при электрическом и паровом приводах.

Обозначенные выше величины $\mathcal{E}'$, $\mathcal{E}''$ и $\mathcal{E}_{\text{нр}}^{\text{т}}$ определяются как $\mathcal{E}' = \frac{Q_{\text{омб}}}{q'}$,

$\mathcal{E}'' = \frac{Q_{\text{омб}}}{q''}$ и $\mathcal{E}_{\text{нр}}^{\text{т}} = \frac{Q_{\text{нр}}}{q_{\text{нр}}}$, q' , q'' и $q_{\text{нр}}$ показывают, какое количество

ккал тепла отпускается из отборов и противодействия двигателя привода на каждый квтч энергии, выработанной на базе соответствующих отборов [3].

Если теперь вычесть из левой и правой части уравнения (2) соответствующие части уравнения (1), то разница покажет эффективность применения того или иного привода. При положительной разнице будет более экономичным электрический привод, а при отрицательной — паровой.

Пропуская простые промежуточные преобразования и обозначая через

$$A' = \frac{1}{\eta_{\text{т}}} - \frac{860}{q'} \left(\frac{1}{\eta_{\text{к}}} - \frac{1}{\eta_{\text{т}}} \right); \quad (3)$$

$$A'' = \frac{1}{\eta_{\text{т}}^{\text{с}}} - \frac{860}{q''} \left(\frac{1}{\eta_{\text{к}}} - \frac{1}{\eta_{\text{т}}^{\text{с}}} \right); \quad (3')$$

$$A_{\text{нр}} = \frac{1}{\eta_{\text{нр}}^{\text{т}}} - \frac{860}{q_{\text{нр}}} \left(\frac{1}{\eta_{\text{нр}}^{\text{с}}} - \frac{1}{\eta_{\text{нр}}^{\text{т}}} \right); \quad (3'')$$

$z = \frac{Q_{\text{омн}}}{860\mathcal{E}}$ — энергетический коэффициент;

$\varphi_{\text{нр}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{нр}}}{\mathcal{E}}$ — доля энергии, затраченной на привод, от общей выработки квтч на ТЭЦ;

$$\omega_{\text{нр}} = \frac{Q_{\text{нр}}}{860\mathcal{E}_{\text{нр}}} = \frac{q_{\text{нр}}}{860} \cdot \delta, \quad \text{где} \quad (4)$$

$\delta = \frac{D'_{\text{нр}}}{D_{\text{нр}}}$ — доля отработавшего пара двигателя привода, использованного для внешних потребителей;

получаем:

$$\begin{aligned} (1 + \varphi_{\text{нр}} + z) \left(\frac{1}{\eta''} - \frac{1}{\eta'} \right) &= (1 + \varphi_{\text{нр}} + z) \Delta \frac{1}{\eta} = \\ &= \varphi_{\text{нр}} \left[\left(A_{\text{нр}} \cdot A'' \cdot \eta_{\text{т}}^{\text{с}} - \psi \cdot A' - \frac{1 - \psi}{\eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{н}}} \right) \omega_{\text{нр}} + \frac{1}{\eta_{\text{нр}}^{\text{с}}} \cdot A'' \cdot \eta_{\text{т}}^{\text{с}} - \frac{1}{\eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{с}} \cdot \eta_{\text{дв}}} \right], \text{ или} \\ \text{окончательно} \quad \Delta \frac{1}{\eta} &= (A_0 \cdot \omega_{\text{нр}} + B_0) \frac{\varphi_{\text{нр}}}{1 + \varphi_{\text{нр}} + z}. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{Здесь } A_0 = A_{\text{нр}} \cdot A'' \cdot \eta_{\text{т}}^{\text{с}} - \psi \cdot A' - \frac{1 - \psi}{\eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{н}}} \text{ и} \quad (6)$$

$$B_0 = \frac{1}{\eta_{np}^e} \cdot A'' \cdot \eta_T'' - \frac{1}{\eta_{\kappa} \cdot \eta_c \cdot \eta_{\partial\theta}}. \quad (7)$$

Величина Δ^1/η в формуле (5) показывает экономию или перерасход тепла топлива в системе при использовании того или иного привода на каждую *ккал*, отпущенную в виде электроэнергии и тепла.

Если Δ^1/η положительно, то более эффективен электрический привод, в противном случае — паровой.

Формула (5) позволяет проследить за изменением Δ^1/η при увеличении или уменьшении энергетического коэффициента. В общем случае с изменением z могут меняться величины φ_{np} и ω_{np} , а A_0 и B_0 остаются примерно постоянными.

Исследование показывает, что формула (5) является справедливой для самых разнообразных случаев использования парового привода. Действительно, на практике могут встретиться следующие условия:

1) Двигатель привода получает пар из отборов турбин ТЭЦ, но тепло выхлопа Q_{np} используется только для вытеснения части $Q'_{омб}$. Тогда $\psi = 1,0$ и

$$A_0 = A_{np} \cdot A'' \cdot \eta_T'' - A'. \quad (6^I)$$

2) То же, но Q_{np} вытесняет только часть $Q_{роу}$. Тогда $\psi = 0$ и

$$A_0 = A_{np} \cdot A'' \cdot \eta_T'' - \frac{1}{\eta_{\kappa y} \cdot \eta_n}. \quad (6^{II})$$

3) Тепло выхлопного пара не используется совсем. Тогда $Q_{np} = 0$, $\delta = 0$ и $A_0 \cdot \omega_{np} = 0$, а

$$\Delta \frac{1}{\eta} = B_0 \cdot \frac{\varphi_{np}}{1 + \varphi_{np} + z}. \quad (5^I)$$

4) Паровой привод питается паром из котла. Пусть $\psi = 1,0$. Тогда произведение $A'' \cdot \eta_T'' = 1,0$ и

$$A_0 = A_{np} - A'. \quad (6^{III})$$

$$B_0 = \frac{1}{\eta_{np}^e} - \frac{1}{\eta_{\kappa} \cdot \eta_c \cdot \eta_{\partial\theta}}. \quad (7^I)$$

Равенство $A'' \cdot \eta_T''$ единице просто доказать:

$$A'' \cdot \eta_T'' = \eta_T'' \cdot \left[\frac{1}{\eta_T''} - \frac{860}{q''} \left(\frac{1}{\eta_{\kappa}} - \frac{1}{\eta_T''} \right) \right] = 1 - \frac{h_a'' \cdot \eta_{oi}'' \cdot \eta_{ж} \cdot \eta_{iz}}{i_{омб}'' - t_{\kappa}} \cdot \left(\frac{\eta_T''}{\eta_{\kappa}} - 1 \right).$$

Но при питании привода свежим паром использованный в турбине на базе этого пара перепад тепла $h_a'' \cdot \eta_{oi}'' = 0$ и $A'' \cdot \eta_T'' = 1$. Кроме этого, в выражениях для η_{np}^T и η_{np}^e вместо η_T'' необходимо подставить произведение $\eta_{\kappa y} \cdot \eta_n$.

5) То же, но тепло выхлопа используется круглый год. Тогда $\delta = 1,0$ и $\eta_{np}^e = \eta_{np}^T$,

$$A_0 = \frac{1}{\eta_{np}^T} - A' \quad (6^{IV})$$

$$B_0 = \frac{1}{\eta_{np}^T} - \frac{1}{\eta_{\kappa} \cdot \eta_c \cdot \eta_{\partial\theta}}. \quad (7^{II})$$

6) Если для целей привода используется конденсационный паровой двигатель, то при питании его свежим паром имеем $A'' \cdot \eta_T'' = 1,0$, $\omega_{np} = 0$ и $A_0 \omega_{np} = 0$, а

$$B_0 = \frac{1}{\eta_{np}^k} - \frac{1}{\eta_{кк} \cdot \eta_{с} \cdot \eta_{дв}}. \quad (7^{III})$$

7) Если отработавший пар двигателя привода используется для производства электроэнергии в турбине мягкого пара, то легко доказать, что все величины в формуле (5) примут вид:

$$A_0 = \frac{1}{\eta_{кк}^M} - \frac{1}{\eta_{кк}}, \quad (6^V)$$

$$\omega_{np} = \frac{\mathcal{E}_{кк}}{\mathcal{E}_{np}}, \quad (4^I)$$

где $\mathcal{E}_{кк}$ — количество квтч энергии, получаемое от турбогенератора типа МК с к.п.д. $\eta_{кк}^M$, квтч/год.

B_0 определяется выражением (7'').

Это почти все случаи, которые могут встретиться в условиях промышленных предприятий.

Так как величина Δ^1/η в формуле (5) пропорциональна расходу топлива, то легко подсчитать абсолютную экономию его или перерасход в случае применения того или иного типа привода. Для этого правую и левую части выражения (5) разделим на $\frac{\varphi_{np}}{1 + \varphi_{np} + z}$ и умножим на $\frac{860}{Q_p^H}$.

Тогда получаем выражение для подсчета абсолютной экономии топлива (или его перерасход) на каждый квтч энергии, затраченной на привод ($Q_p^H = 7000$ ккал/кг):

$$b_{эк}^y = 0,123 (A_0 \cdot \omega_{np} + B_0) \text{ кг/квтч}. \quad (8)$$

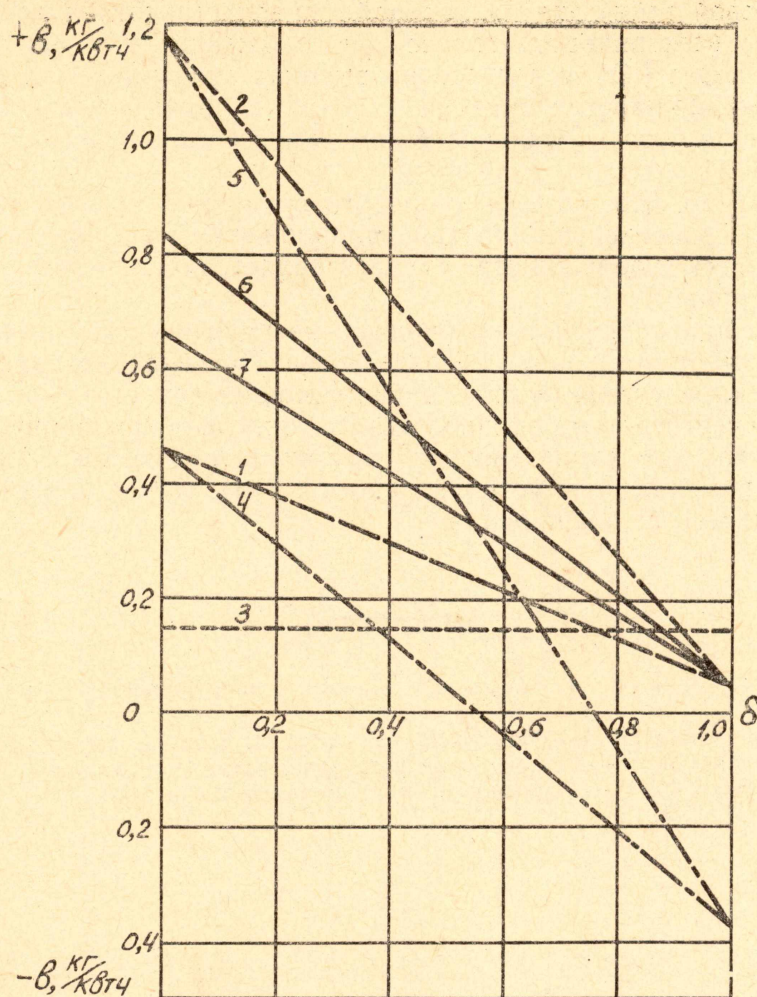
Полученные выражения (5) и (8) позволяют сравнить не только эффективности электрического или парового приводов, но и установить зависимость эффективности от целого ряда факторов (начальные и конечные параметры пара привода, начальные параметры пара на ТЭЦ, мощность двигателя привода и т. д.).

На фиг. 1 для ряда разобранных выше случаев показаны зависимости $b_{эк}^y$ экономии топлива от применения электрического привода по сравнению с паротурбинным от δ — степени использования отработавшего пара для тех или иных целей ($N_{np} = 700$ квт).

Остановимся на отдельных кривых. Кривые 1 и 2 ($P_o^{np} = 29$ ата; $t_o^{np} = 425^\circ \text{C}$; $P_k^{np} = 1,2$ и $7,0$ ата; $\psi = 1,0$; $A'' \cdot \eta_T'' = 1,0$) показывают, что с уменьшением теплового перепада на двигатель парового привода его эффективность падает и тем сильнее, чем меньше δ .

Кривые 4 и 5 представляют то же, но при $\psi = 0$. Здесь для определенных значений δ (больше 5,5 при $P_k^{np} = 1,2$ ата и 7,75 при $P_k^{np} = 7,0$ ата) более экономичным становится уже паровой привод. Объясняется это тем, что в случае электрического привода тепловые потребители обеспечиваются теплом через РОУ и определенный перепад тепла не используется для совершения работы.

Ординаты соответственно между кривыми 1—4 и 2—5 показывают изменение эффективности парового привода для разных δ от значений ψ (при его изменении от нуля до единицы). Чем выше значение ψ , тем ниже эффективность парового привода. Это понятно, так как при



Фиг. 1. Зависимость экономии топлива от применения электрического привода по сравнению с паровым от степени использования его отработавшего пара.

росте ψ все больше вытесняются теплофикационные кВтч , вырабатываемые с высоким к.п.д. на заводской ТЭЦ. Кривая 3 показывает эффективность использования для привода конденсационного двигателя ($P_o^{np} = 29 \text{ ата}$; $t_o^{np} = 425^\circ \text{C}$; $P_k^{np} = 0,05 \text{ ата}$). Для большинства значений δ такой привод является более экономичным, чем противогазительные двигатели.

Кривые 6 и 7 для разных δ показывают, как изменяется эффективность привода от начальных параметров пара на ТЭЦ (для кривой 6: $p_o = 29 \text{ ата}$; $t_o = 425^\circ \text{C}$; для кривой 7: $p_o = 90 \text{ ата}$; $t_o = 500^\circ \text{C}$; в обоих случаях $\psi = 1,0$; $P_o^{np} = 7 \text{ ата}$; $P_k^{np} = 1,2 \text{ ата}$; $F_{отб}'' = 8 \text{ ата}$). Видно, что экономичность парового привода возрастает с увеличением начальных параметров пара перед турбинами ТЭЦ.

Как видно из фиг. 1, в большинстве случаев (даже для $\delta = 1,0$), более выгодным является электрический привод. Экономия топлива будет тем больше, чем а) меньше значение δ ; б) больше величина ψ ; в) ниже мощность, необходимая для привода рабочей машины; г) ниже начальные параметры пара ТЭЦ; д) меньше перерабатываемый тепловой перепад в паровом двигателе привода или, что то же самое, чем выше противогазительное его; е) дальше двигатель привода расположен от источника энергии.

С тепловой точки зрения паровой привод становится конкурентно-способным с электрическим только при снабжении тепловых потребителей теплом через РОУ и достаточно высоких значениях δ , а также при значительных мощностях привода. В этих условиях эффективность парового привода будет тем большей, чем выше δ и больше мощность привода.

Естественно, что, помимо теплового сравнения, всегда необходимо производить сопоставление по капиталовложениям и ежегодным расходам. Но и здесь в большинстве случаев является более выгодным электрический привод [1].

Однако при сравнении необходимо не упускать еще одного очень важного во многих случаях обстоятельства. При использовании парового привода (при сравнительно больших мощностях его) на заводской ТЭЦ или в энергосистеме высвобождается определенное количество квтч электроэнергии для удовлетворения других потребителей. Это особенно важно при напряженных условиях работы ТЭЦ, если в ближайшее время не ожидается ее расширения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелентьев Л. А.— Основные вопросы промышленной теплоэнергетики, ГЭИ, 1954.
2. Мелентьев Л. А.— Теплофикация, часть II, издание АН СССР, 1948.
3. Бутаков И. Н.— Теплосиловые установки, часть I, II, издание ГПИ, 1954.
4. Бутаков И. Н.— О разногласиях при определении к.п.д. ТЭЦ, Сборник о к.п.д. ТЭЦ, ГЭИ, 1953.

