

УДК 62-8

Сравнительный технико-экономический анализ приводных систем для обжиговых печей

*Ганькин Н.А., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Экономика и организация производства»*

*Научный руководитель: Алексеева Е.В., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Экономика и организация производства»
alekseeva@ibm.bmstu.ru*

Приводные системы необходимы для обеспечения непрерывного производства продукции в обжиговых печах. Различные виды приводов обладают своими преимуществами и недостатками. В данной работе рассмотрены два принципиально отличающихся варианта приводов: с редуктором и без редуктора.

Что касается редукторных приводных систем, то тут имеет смысл рассматривать электромеханический привод переменного тока и гидромеханический привод.

Регулируемый привод с асинхронным двигателем переменного тока (Variable-speed AC Drive (ACD))

На рис. 1 приведен внешний вид и основные компоненты электромеханического привода.

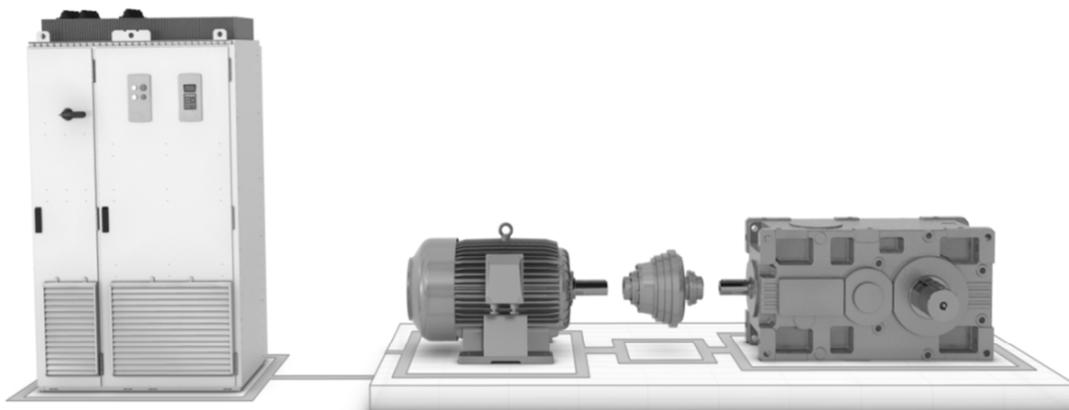


Рис. 1. Внешний вид и основные компоненты электромеханического привода

Привод с электродвигателем переменного тока состоит из преобразователя и высокоскоростного асинхронного двигателя. Также данный тип приводов требует

использования редуктора (обычно используется конический тип редуктора). Для обеспечения плавности пуска между двигателем и редуктором устанавливают гидромуфту. Для гашения момента инерции, возникающего во время вращения, используются дисковые тормоза. Перечень основных преимуществ и недостатков электромеханического привода приведены в табл. 1.

Таблица 1

Преимущества и недостатки электромеханического привода

Преимущества	Недостатки
<ol style="list-style-type: none"> 1. Относительно низкая стоимость 2. Не требует высокой квалификации специалистов 3. Простота в обслуживании 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Низкий пусковой крутящий момент (70% от номинального) 2. Кратковременная работа при крутящем моменте, превышающем номинальное значение (180-200% от номинального) 3. Высокий момент инерции 4. Низкий КПД при одновременной работе двух электродвигателей 5. Высокая нагрузка электрической сети 6. Высокий вес привода 7. Большие габариты установки 8. Сложность монтажа 9. Появление простоев при ремонтных работах 10. Высокая стоимость гидромуфт (обслуживаются, часто выходят из строя)

Регулируемый гидромеханический привод (Variable-speed Hydro-Mechanical Drive (HMD))

Внешний вид и основные компоненты гидромеханического привода приведена на рис. 2.

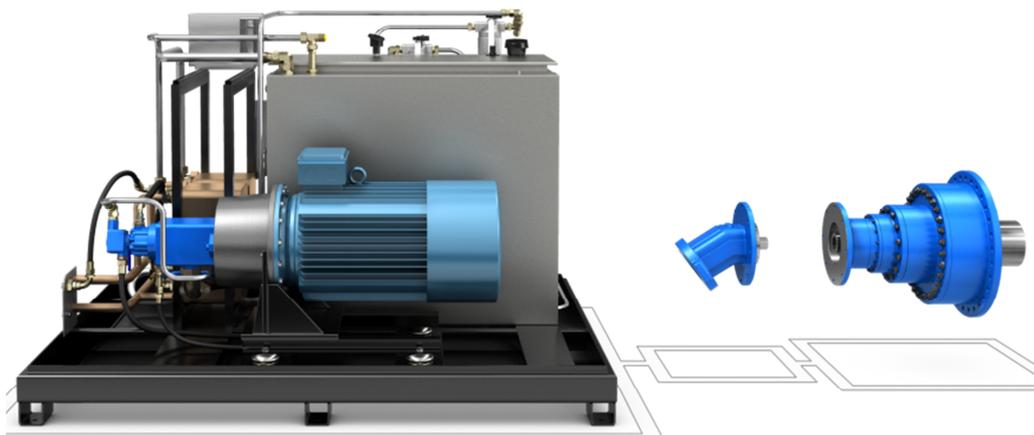


Рис. 2. Внешний вид и основные компоненты гидромеханического привода

В данном типе приводов используется гидравлический мотор средней или высокой скорости. Гидромеханический привод не подключается непосредственно к ведомому валу, а включает в себя редуктор (как правило планетарный), который заметно увеличивает размер приводной системы. Основные преимущества и недостатки гидромеханического привода приведены в табл. 2.

Таблица 2

Преимущества и недостатки гидромеханического привода

Преимущества	Недостатки
<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокий пусковой момент (200-300% от номинального) без ограничения по времени 2. Широкий диапазон регулирования скорости 3. Низкая частота вращения при максимальном моменте 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокий момент инерции 2. Большие габариты установки 3. Сложность монтажа 4. Редуктор является причиной потерь, снижающих крутящий момент

Также существует система привода без редуктора.

Прямой регулируемый гидравлический привод (Variable-speed Hydraulic Direct Drive (HDD))

Внешний вид и основные компоненты безредукторной системы привода показано на рис. 3.

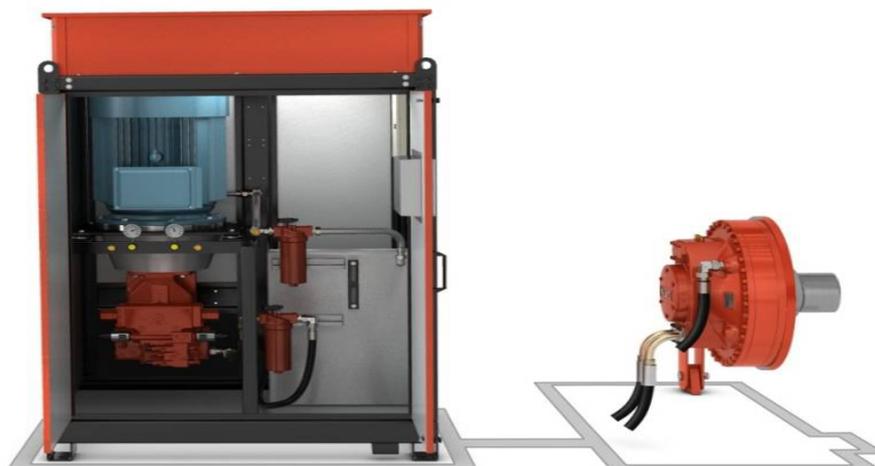


Рис. 3. Внешний вид и основные компоненты прямого гидравлического привода

Приводная система состоит из гидромотора и насосной станции, включающей в себя электродвигатель и насос. Гидродвигатель установлен с помощью специальной дисковой муфты или зубчатого вала непосредственно на самом приводном валу, для чего не требуется возведение фундамента, покупка редуктора или дополнительных муфт. Основные преимущества и недостатки прямого гидравлического привода перечислены в табл. 3.

Таблица 3

Преимущества и недостатки прямого гидравлического привода

Преимущества	Недостатки
1. Высокий пусковой момент (200-300% от номинального) без ограничения по времени	1. Высокая стоимость
2. Широкий диапазон регулирования скорости	2. Возможные утечки рабочей жидкости
3. Резервирование и высокий ресурс гидромоторов	3. Необходимость обеспечения чистоты рабочей жидкости
4. Равномерное распределение нагрузки	4. Потребность в высококвалифицированные специалисты
5. Низкая частота вращения при максимальном моменте	
6. Простота монтажа	
7. Непрерывная работа во время ремонтных работ	

8. Прямой привод	
9. Низкий момент инерции	
10. Низкий уровень шума	
11. Малый вес (по сравнению с редукторными приводами)	

По основным техническим характеристикам гидромеханический привод практически ничем не уступает прямому гидравлическому. Однако наличие дополнительного элемента – редуктора, резко уменьшает КПД системы, при том что ее габариты значительно увеличиваются. Поэтому уже на стадии первоначального сравнения можно сказать, что данная приводная система не конкурентоспособна и в дальнейшем в работе будут рассматриваться два принципиально разных вида приводов: электромеханический и прямой гидравлический.

Расчет технических показателей приводных систем

Экспертами из ряда предложенных технических характеристик приводных систем было выбрано пять наиболее важных:

- Пусковой момент
- КПД
- Момент инерции на валу
- Масса привода
- Мощность на валу

Рассмотрим каждый показатель в разрезе определенного вида приводной системы.

Пусковой момент

На рис. 4 представлен график, отражающий зависимость крутящего момента от скорости вращения обжиговой печи при использовании электромеханического привода переменного тока.

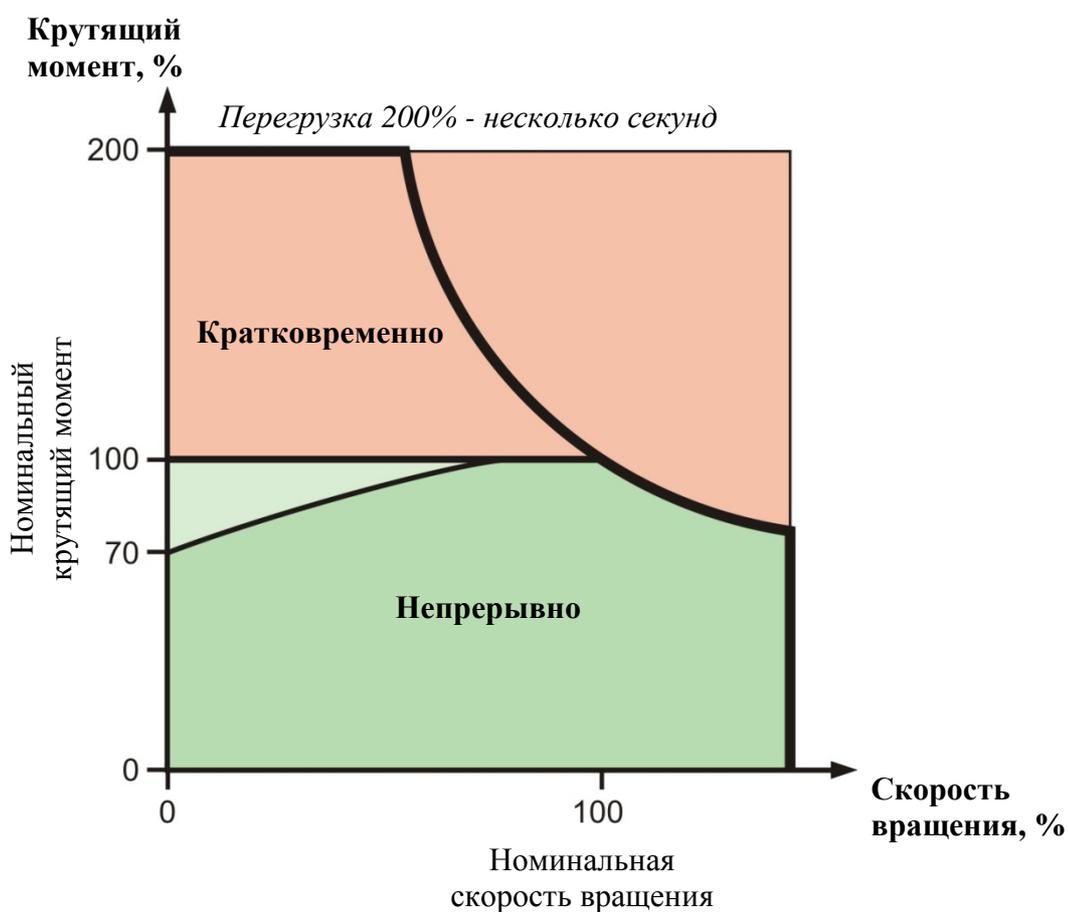


Рис. 4. График зависимости крутящего момента от скорости вращения электромеханического двигателя

Электромеханический привод переменного тока имеет ряд ограничений величины крутящего момента при малой скорости. В частности, при увеличении крутящего момента от 70% до номинальных 100%, электродвигателю требуется принудительное охлаждение, чтобы избежать его перегрева и, соответственно, преждевременного выхода из строя. Еще одним недостатком электромеханических приводов является ограничение пускового крутящего момента, так как при непосредственном запуске обжигowych печей (то есть когда скорость вращения близка к нулевой) крутящий момент максимален и достигает 200-300% от номинального. В режиме превышения номинального крутящего момента на 200% данный вид приводов может работать всего несколько секунд.

На рис. 5 представлен график зависимости величины крутящего момента от скорости вращения обжиговой печи при использовании прямого гидравлического привода.

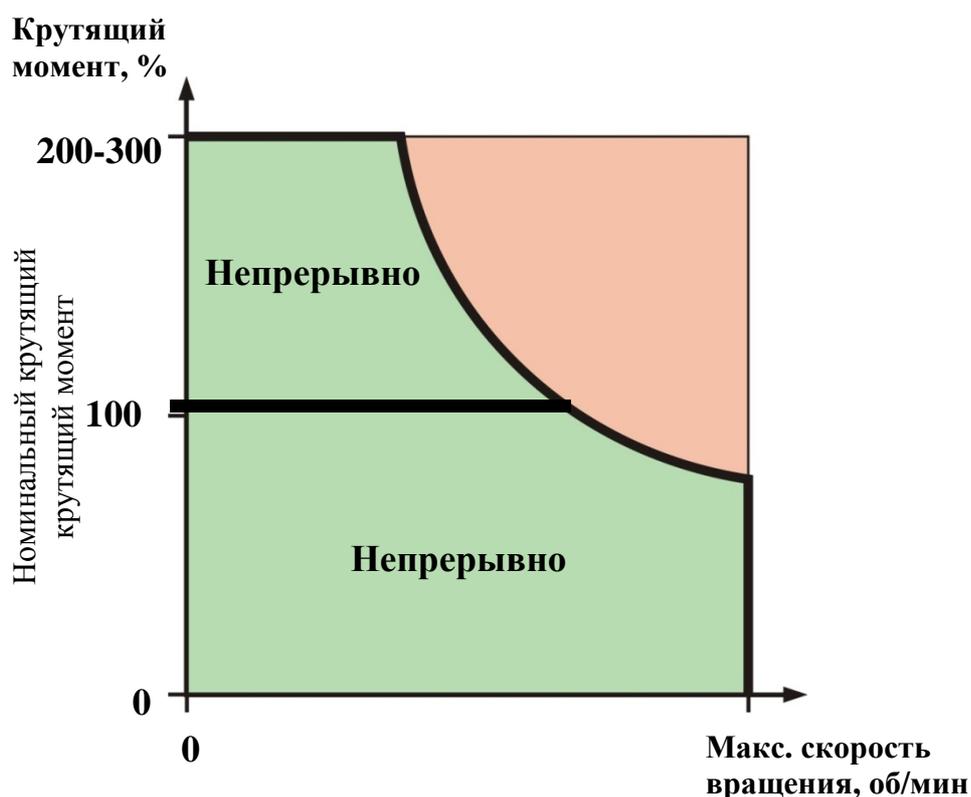


Рис. 5. График зависимости крутящего момента от скорости вращения прямого гидравлического привода

Главным преимуществом прямого гидравлического привода является его способность достигать величины крутящего момента, составляющую 200-300% от номинального, без каких-либо ограничений по времени.

Коэффициент полезного действия (КПД)

Следующим показателем качества приводной системы является ее суммарный коэффициент полезного действия (КПД). Для того, чтобы корректно посчитать суммарный КПД, необходимо учесть целый ряд дополнительных составляющих приводов.

Рассмотрим сначала электромеханический привод переменного тока. Данные по потерям на различных участках данной системы приведены в табл. 4.

Таблица 4

Суммарный КПД электромеханического привода переменного тока

Компоненты	КПД (100% номинальной мощности)	КПД (50% номинальной мощности)
Электродвигатель + преобразователь	94%	93%
Редуктор	93-97%	90-95%
Гидромуфта	96-99%	96-99%
Охлаждение и смазка	-	95-99%
Потери из-за гармонических волн	-	98-99%
ИТОГО	84-90%	74-85%

Так как электромеханический привод переменного тока имеет ряд ограничений по величине крутящего момента, то есть смысл также рассматривать КПД в разрезе крутящего момента ниже номинального. В итоге суммарный КПД при 100% мощности составляет 84-90%, а при 50% мощности – 74-85%.

Теперь рассмотрим прямой гидравлический привод, данные по суммарному КПД которого приведены в табл. 5.

Таблица 5

Суммарный КПД прямого гидравлического привода

Компоненты	КПД
Электродвигатель	95-96%
Насос	86-90%
Трубы	95-99%
Гидромотор	95-96%
Воздушный теплообменник	99%
ИТОГО	73-82%

Так как у прямого гидравлического привода нет никаких ограничений по величине крутящего момента на малых скоростях вращения, то имеет смысл рассчитывать единственно возможный суммарный КПД. Из табл. 5 видно, что суммарный КПД для данного типа приводов составляет 73-82%.

Суммарный момент инерции

При сравнении различных видов приводных систем, необходимо обратить внимание на расчет суммарного момента инерции. Данный показатель очень важен, особенно при остановке обжиговой печи, так как может возникнуть ситуация, когда из-за слишком большого момента инерции печь просто «поведет», что может вызвать не только поломку привода, но и самой обжиговой печи. Последствия такой аварии принесут предприятию большие убытки из-за длительной остановки печи и значительные капитальные затраты на ремонт оборудования.

Рассчитаем суммарный момент инерции для электромеханического привода переменного тока:

$$J_{\Sigma} = J_1 \cdot i_{12}^2, \quad (1)$$

J_1 – момент инерции электродвигателя, кгм²

i_{12} – передаточное отношение между электродвигателем и редуктором

$$J_{\Sigma} = 2,9 \cdot 87,8^2 = 22336 \text{ кгм}^2.$$

Суммарный момент инерции прямого гидравлического привода возьмем из технического описания.

$$J_{\Sigma} = 18,3 \text{ кгм}^2.$$

Масса приводной системы

Масса приводной системы также является важным показателем при выборе привода, так как она характеризует габариты привода и влияет на затраты и время на монтаж.

Рассчитаем массу электромеханического привода переменного тока. Основную долю здесь составляет масса редуктора. Масса редуктора для электромеханического привода равна 47,4 т. Добавим к этому массу электродвигателя, равную 1,5 т. Итого получим суммарную массу привода – 48,9 т.

Рассчитаем массу прямого гидравлического привода. Основные составляющие данного привода следующие: электродвигатель - 1,5 т, насосы - 0,2 т и гидромотор - 1,5 т. Итого суммарная масса привода – 3,2 т.

Мощность на валу

Мощность на выходном валу зависит от суммарного КПД. Следовательно, чем меньше потери, тем больше мощность. Также необходимо добавить, что для обеспечения

вращательного движения печи, приводная система должна обеспечить крутящий момент равный 258 900 Нм и скорость вращения печи 1,1 об/мин.

Рассчитаем мощность на выходном валу для электромеханического привода переменного тока.

$$P_1 = \frac{M_1 \cdot n}{9549} \cdot \eta_1, \quad (2)$$

M_1 – номинальный крутящий момент печи, Нм

n – число оборотов в минуту

η_1 – суммарный КПД

$$P_1 = \frac{258900 \cdot 8,36}{9549} \cdot 0,87 = 197,2 \text{ кВт.}$$

Рассчитаем мощность на выходном валу для прямого гидравлического привода.

$$P_1 = \frac{258900 \cdot 8,36}{9549} \cdot 0,775 = 175,7 \text{ кВт.}$$

Расчет комплексного показателя качества

Для оценки уровня качества привода необходимо выбрать комплексный метод оценки уровня качества, для которого рассчитаем комплексный показатель качества.

Для расчета комплексного показателя качества сведем все полученные данные в табл. 6.

Таблица 6

Показатели качества приводных систем

Показатели	Электромеханический привод	Прямой гидравлический привод	ξ
Пусковой крутящий момент, кНм	258,9	776,7	1
КПД, %	87	77	1
Момент инерции, кгм ²	22336	18,3	-1
Масса, т	48,9	3,2	-1
Мощность, кВт	197,2	175,7	1

Примем за базовый прямой гидравлический привод. Рассчитаем относительные показатели качества и составим табл. 7.

$$q_i = \left(\frac{P_i}{P_{iБ}} \right), \xi \quad (3)$$

где $\xi = 1$, если росту P_i соответствует повышение качества

где $\xi = -1$, если росту P_i соответствует снижение качества

Таблица 7

Относительные показатели качества приводных систем

Показатели	Электромеханический привод	Прямой гидравлический привод
Пусковой крутящий момент, кНм	0,33	1
КПД, %	1,12	1
Момент инерции, кгм ²	0,001	1
Масса, т	0,07	1
Мощность, кВт	1,12	1

Для определения весовых коэффициентов показателей качества используем метод экспертных оценок. Было опрошено 5 экспертов крупной промышленной компании, которым предложили оценить характеристики приводных систем по 10-балльной шкале, где 10 – наиболее важный показатель, 1 – наименее важный показатель. Данные опроса показаны в табл. 8.

Таблица 8

Определение весовых коэффициентов методом экспертных оценок

Показатели \ Эксперты	Эксперты					Сумма баллов	Ранг оценки	Вес оценки
	№1	№2	№3	№4	№5			
Пусковой крутящий момент, кНм	10	9	10	9	10	48	1	0,23
КПД, %	8	8	9	9	8	42	3	0,20
Момент инерции, кгм ²	8	7	7	7	7	36	5	0,17
Масса, т	9	8	9	9	9	44	2	0,21
Мощность, кВт	8	8	9	8	8	41	4	0,19

На основании данных, приведенных в табл. 8, рассчитаем комплексный показатель качества.

$$K = \sum_{i=1}^n m_i * q_i, \quad (4)$$

где m_i – весовые коэффициенты ($\sum m_i = 1$)

q_i – показатель качества

$$K_1 = 0,33 \cdot 0,23 + 1,12 \cdot 0,2 + 0,001 \cdot 0,17 + 0,07 \cdot 0,21 + 1,12 \cdot 0,19 = 0,08 + 0,22 + 0,0002 + 0,02 + 0,21 = 0,53.$$

$$K_2 = 1 \cdot 0,23 + 1 \cdot 0,2 + 1 \cdot 0,17 + 1 \cdot 0,21 + 1 \cdot 0,19 = 1$$

Итоговые комплексные показатели качества приводных систем представлены в табл. 9.

Таблица 9

Комплексный показатель качества приводных систем

Показатели	Электромеханический привод	Прямой гидравлический привод
Комплексный показатель качества (К)	0,53	1

Построим для наглядного сравнения циклограмму качества различных видов приводных систем (рис. 6):

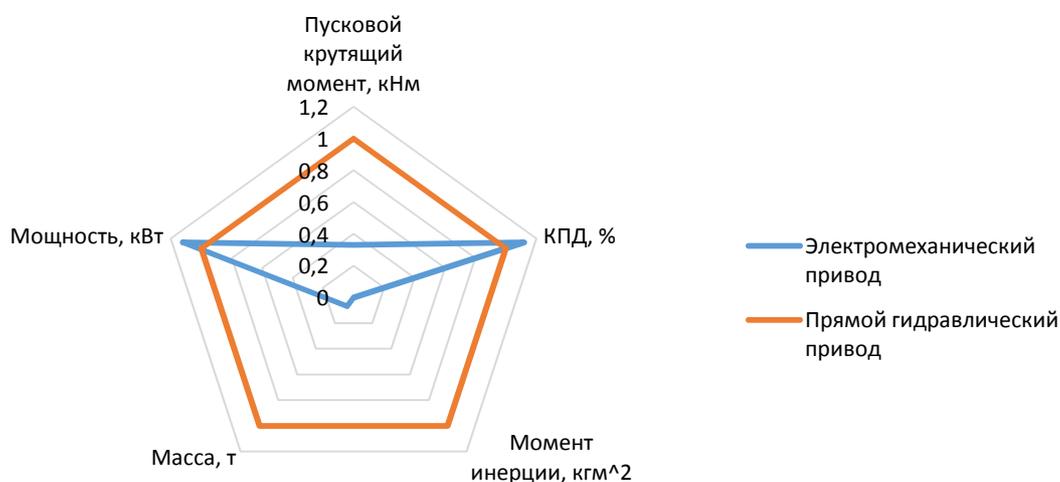


Рис. 6. Циклограмма качества приводных систем

Исходя из данных, представленных в табл. 9 и на рис. 6, можно сделать вывод, что прямой гидравлический привод значительно превосходит электромеханический по техническим характеристикам.

Расчет индекса стоимостных параметров

Помимо комплексного показателя качества при сравнении приводных систем необходимо также учитывать экономические (стоимостные) показатели.

Рассчитаем индекс стоимостных параметров для различных приводных систем по формуле:

$$I_{ст} = \frac{S_{пр1}}{S_{пр2}}, \quad (5)$$

$S_{пр1}$ – приведенные затраты использования электромеханического привода

$S_{пр2}$ – приведенные затраты использования прямого гидравлического привода

$$S_{прj} = \sum_{i=1}^n K_i \cdot E_i + S_{эксj}^{ср.год} \quad (6)$$

$$E_i = \frac{1}{T_{экс_i}} \quad (7)$$

K – капитальные вложения

E – коэффициент эффективности капитальных вложений

$S_{экс}^{ср.год}$ – среднегодовые расходы на эксплуатацию

$T_{экс}$ – период эксплуатации

Для расчета приведенных затрат необходимо составить смету капитальных вложений. Рассчитаем суммарные расходы на внедрение различных видов приводных систем в табл. 10.

Таблица 10

Капитальные вложения

Компоненты	Электромеханический привод, руб.	Прямой гидравлический привод, руб.
Электродвигатель	500 000	-
Редуктор	10 000 000	-
Гидромотор	-	13 200 000
Насосная станция	-	14 575 000
Гидромурфта	150 000	-
Защита от гаармонических искажений	150 000	-
Преобразователь	700 000	-
ИТОГО	11 500 000	27 775 000

Рассчитаем приведенные суммарные затраты потребителя за 1 год эксплуатации приводных систем в табл. 11. Стоит отметить, что расчет именно приведенных затрат принципиален, так как капитальные вложения показывают совершенно противоположную картину и не отражают реальной ситуации при внедрении оборудования на производстве.

Таблица 11

Приведенные затраты

Компоненты	$T_{\text{экс}}$, лет	Электромеханический привод, руб.	$T_{\text{экс}}$, лет	Прямой гидравлический привод, руб.
Электродвигатель	10	$\frac{500\ 000}{10} = 50\ 000$	-	-
Редуктор	5	$\frac{10\ 000\ 000}{5} = 2\ 000\ 000$	-	-
Гидромотор	-	-	20	$\frac{13\ 200\ 000}{20} = 660\ 000$
Насосная станция	-	-	20	$\frac{14\ 575\ 000}{20} = 728\ 750$
Гидромуфта	5	$\frac{150\ 000}{5} = 30\ 000$	-	-
Защита от гаармонических искажений	10	$\frac{150\ 000}{10} = 15\ 000$	-	-
Преобразователь	15	$\frac{700\ 000}{15} = 46\ 000$	-	-
Замена расходников		200 000		200 000
ИТОГО		2 341 000		1 538 750

Рассчитаем индекс стоимостных параметров приводных систем:

$$I_{\text{ст1}} = \frac{2341000}{1538750} = 1,52.$$

Данный параметр показывает, что затраты на внедрение электромеханического привода в 1,52 раза больше, чем для прямого гидравлического.

Расчет показателя конкурентоспособности

Для принятия решения о выборе приводной системы необходимо учитывать как технические показатели, так и экономические. В качестве критерия выбора привода будем использовать показатель конкурентоспособности.

Рассчитаем показатель конкурентоспособности приводных систем:

$$КС = \frac{I_{\text{тех}}}{I_{\text{ст}}}, \quad (8)$$

$I_{\text{тех}}$ – индекс технических параметров

$I_{\text{ст}}$ – индекс стоимостных параметров

$$КС_1 = \frac{0,53}{1,52} = 0,35.$$

Для наглядной демонстрации полученных результатов, построим диаграмму, приведенную на рис. 7.

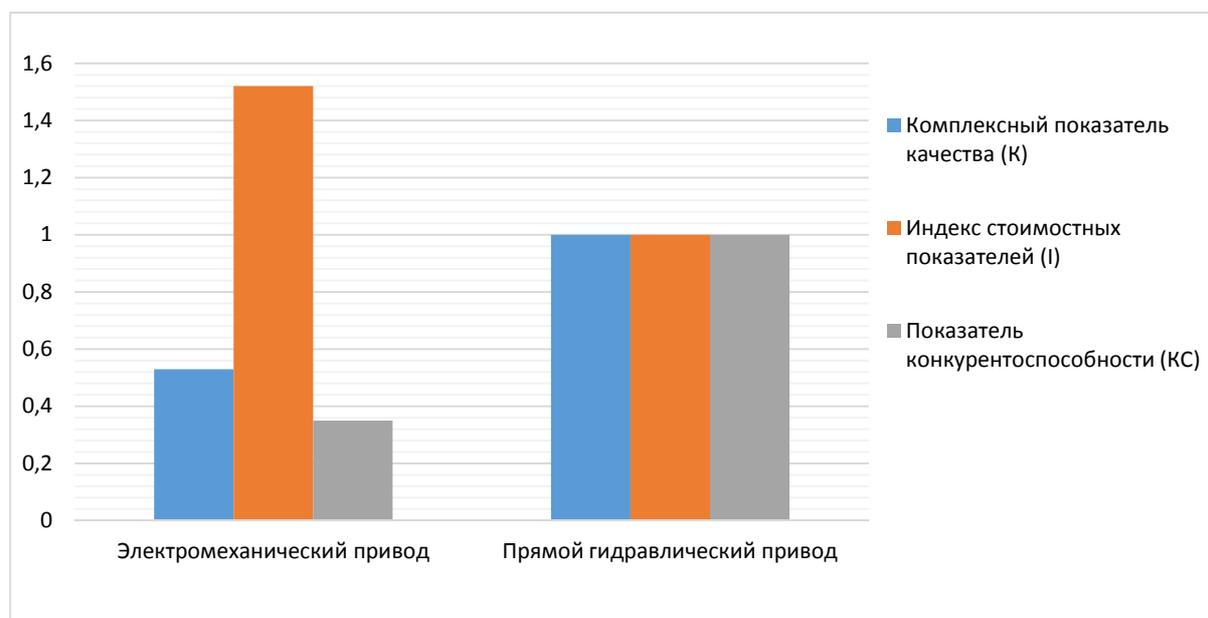


Рис. 7. Итоговое сравнение приводных систем

Из рис. 7 можно сделать вывод, что несмотря на высокую цену покупки, прямой гидравлический привод гораздо более выгодно использовать, о чем и говорит его приведенная цена потребления. В итоге прямой гидравлический привод превзошел электромеханический как по техническим характеристикам, так и по стоимостным. Анализируя полученный показатель конкурентоспособности, очевидно, что при выборе между данными видами приводных систем необходимо остановиться на прямом гидравлическом приводе.

Выводы

Анализ возможных альтернатив показал, что для внедрения приводных систем обжиговых печей имеет смысл рассматривать два принципиально разных вида приводов: электромеханический и прямой гидравлический.

Сравнительный анализ технических показателей приводных систем определил преимущество прямого гидравлического привода ($K_{\text{ПГ}}=1$) над электромеханическим ($K_{\text{ЭМ}}=0,53$).

Сравнительный анализ стоимостных показателей приводных систем показал, что выгоднее приобрести прямой гидравлический привод ($I_{\text{ПГст}}=1$), а не электромеханический ($I_{\text{ЭМст}}=1,52$).

В качестве критерия выбора приводной системы использовался показатель конкурентоспособности ($KС_{\text{ЭМ}}=0,35$; $KС_{\text{ПГ}}=1$). В итоге для внедрения на предприятии был выбран прямой гидравлический привод.

Список литературы

1. Савченко Н.Н. Техничко-экономический анализ проектных решений: учебное пособие. М.: Экзамен, 2002. 120 с.
2. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование: теория принятия решений. М.: КНОРУС, 2010. 568 с.
3. Орлов А.И. Эконометрика. М.: Издательство «Экзамен», 2002. 576 с.
4. Клементьева С.В. Оценка эффективности инноваций при создании наукоемкой продукции: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 28 с.