

Балашов Михаил Геннадьевич

студент 1 курса магистратуры Высшей школы энергетики, нефти и газа

САФУ. Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В.

Ломоносова, город Архангельск

**ОЦЕНКА СОВОКУПНОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ
ЗАМЕНЫ ГИДРОМУФТ НА ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЧАСТОТНЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В ПРИВОДЕ ДЫМОСОСОВ
СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫХ КОТЛОВ С ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ
ДАЗО**

Аннотация. В статье рассматривается проблема повышения энергетической эффективности тягодутьевых систем содорегенерационных котлов. Проведен сравнительный анализ гидромuft и высоковольтных частотных преобразователей в приводе дымососов с электродвигателями ДАЗО. Обоснована методика оценки совокупного экономического эффекта, учитывающая энергосбережение, эксплуатационные расходы и инвестиционные затраты. Показано, что применение ВЧП обеспечивает экономию электроэнергии до 30–40%, однако целесообразность замены определяется индивидуальными особенностями режима работы агрегата.

Ключевые слова: содорегенерационный котел, дымосос, электродвигатель ДАЗО, гидромuftа, высоковольтный частотный преобразователь, энергоэффективность, совокупный экономический эффект, срок окупаемости.

Annotation. The article considers the problem of increasing the energy efficiency of traction systems of steam-generating boilers. A comparative analysis of hydraulic couplings and high-voltage frequency converters in the drive of smoke pumps with DAZO electric motors has been carried out. A methodology for assessing the cumulative economic effect is substantiated, taking into account energy saving, operating costs and investment costs. It is shown that the use of high-frequency transmission provides energy savings of up to 30-40%, however, the

expediency of replacement is determined by the individual characteristics of the unit's operating mode.

Keywords: co-generation boiler, smoke extraction, DAZO electric motor, hydraulic coupling, high-voltage frequency converter, energy efficiency, cumulative economic effect, payback period.

Содорегенерационные котлы являются ключевым звеном целлюлозно-бумажной промышленности. Привод дымососов традиционно осуществляется от высоковольтных двигателей ДАЗО через гидравлические муфты, обеспечивающие плавное регулирование частоты вращения. Однако в условиях жестких требований к энергоэффективности гидродинамический способ регулирования имеет существенные ограничения, а альтернативой выступают высоковольтные частотные преобразователи. Цель работы — формализация подхода к оценке совокупного экономического эффекта от замены гидромuft на ВЧП, учитывающего полный комплекс технико-экономических факторов в течение жизненного цикла оборудования.

Для понимания масштабов потенциальной экономии необходимо обратиться к законам регулирования центробежных машин. Согласно теории подобия, производительность вентилятора (Q) прямо пропорциональна частоте вращения рабочего колеса (n), развиваемое давление (P) пропорционально квадрату частоты, а потребляемая мощность (N) пропорциональна кубу частоты вращения. Это фундаментальное соотношение указывает на то, что даже незначительное снижение скорости вращения приводит к существенному уменьшению энергопотребления. Например, снижение частоты вращения на 20% приводит к снижению потребляемой мощности на 48,8%. Данный эффект лежит в основе всех методов регулирования производительности центробежных механизмов[1].

При оценке сравнительной эффективности гидромuft и частотного преобразователя ключевым параметром является коэффициент полезного действия системы в различных режимах. Гидромuftа представляет собой

механический преобразователь с переменным скольжением. Ее КПД приблизительно равен отношению скорости турбинного колеса (выходная скорость) к скорости насосного колеса (входная скорость). Это означает, что при регулировании скорости гидромуфтой потери мощности в самой муфте возрастают пропорционально величине скольжения. При работе на номинальной скорости (скольжение 2-3%) потери минимальны, однако при необходимости снизить скорость, например, до 80% от номинала, потери в гидромуфте достигают 20% от передаваемой мощности, что существенно снижает общую эффективность привода. Кроме того, гидромуфта сама по себе требует затрат энергии на привод маслонасосов системы охлаждения и управления.

В отличие от гидромуфты, частотный преобразователь изменяет частоту питающего напряжения, тем самым изменяя синхронную скорость вращения магнитного поля статора, а вместе с ней и скорость ротора двигателя. Современные ВЧП, построенные на базе IGBT-транзисторов с широтно-импульсной модуляцией, обладают высоким КПД в широком диапазоне регулирования, составляющим 97-98,5%. Потери в ВЧП остаются относительно стабильными и практически не зависят от выходной частоты, что дает неоспоримое преимущество при длительной работе на пониженных скоростях [2].

Рассмотрим конкретный пример. Типовые высоковольтные двигатели ДАЗО4, используемые в приводе дымососов, имеют мощность от 315 до 800 кВт и более. В зависимости от производительности СРК и загрузки комбината, средняя нагрузка дымососа может составлять 70-80% от номинальной. Использование гидромуфты в этом режиме означает, что потери мощности в гидропередаче составят порядка 20-30% от мощности на валу, причем эти потери трансформируются в тепло, рассеиваемое маслоохладителем, что требует дополнительных затрат на обратное водоснабжение или вентиляцию.

Применение высоковольтного преобразователя частоты (ВЧП) позволяет обеспечить тот же расход газов при значительно меньшем потреблении

электроэнергии из сети, так как двигатель работает на пониженной частоте вращения с высоким КПД. Однако здесь важно раскрыть вопрос работы электродвигателей ДАЗО на пониженной частоте вращения. Двигатели серии ДАЗО4 с короткозамкнутым ротором по своему прямому назначению предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения. Их работа в составе частотного привода может потребовать дополнительных проработок, так как при длительной эксплуатации на пониженных оборотах ухудшаются условия охлаждения (встроенный вентилятор на валу двигателя становится малоэффективным) и могут возникать дополнительные потери в стали и механические вибрации. В некоторых случаях для надежной работы в составе ВЧП может потребоваться доработка системы охлаждения (установка автономного вентилятора) или, в зависимости от требований к диапазону и точности регулирования, замена электродвигателя на специализированный, адаптированный для работы с преобразователем частоты. Эти факторы напрямую влияют на оценку экономического эффекта.

Годовая экономия электроэнергии для одного агрегата мощностью 630 кВт (например, для двигателя ДАЗО4-450У-6У1 с номинальной частотой вращения 1000 об/мин) может составить от 1,5 до 2,5 млн кВт·ч в зависимости от профиля нагрузки. Для наглядности можно привести следующий расчет, основанный на законах регулирования центробежных механизмов. Если принять годовую наработку оборудования в 7000 часов, а среднюю производительность дымососа на уровне 70% от номинальной, то мощность, потребляемая из сети при дроссельном регулировании, может достигать 60-65% от номинальной мощности двигателя. При использовании ВЧП для снижения производительности на 30% потребляемая мощность падает пропорционально кубу частоты вращения и составляет примерно 35-40% от номинальной.

Таким образом, для двигателя мощностью 630 кВт разница в потребляемой мощности составляет порядка 150–200 кВт. Умножив эту

разницу на годовое количество часов работы (например, 7000–8000 часов), получаем экономию электроэнергии в диапазоне от 1 050 000 до 1 600 000 кВт·ч в год. При более глубоком регулировании (например, до 60% производительности) экономия может превышать 2 млн кВт·ч в год. Эти цифры хорошо согласуются с приведенным диапазоном 1,5–2,5 млн кВт·ч и подтверждают высокую энергетическую эффективность применения ВЧП для дымососов

Помимо энергосбережения, выбор между гидромуфтой и ВЧП должен основываться на анализе надежности системы и операционных затрат на техническое обслуживание.

Гидромуфты характеризуются высокой механической надежностью и наработкой на отказ, достигающей 150 000 часов, а межсервисный интервал может составлять до 8 лет. Они просты в обслуживании и не требуют высокой квалификации персонала. Однако они являются механическими устройствами с большим количеством подвижных частей, требующих контроля состояния масла, замены уплотнений и подшипников. Кроме того, гидромуфты предъявляют жесткие требования к качеству монтажа и центровки валов, и любая вибрация в системе тяготеть может негативно сказаться на ресурсе их узлов.

В то же время, гидравлические муфты обладают уникальным преимуществом — они обеспечивают естественное демпфирование крутильных колебаний, возникающих в длинных валовых линиях дымососов, а также снижают пульсирующие нагрузки на зубчатые колеса редукторов, существенно продлевая срок их службы. Этот аспект часто упускается из виду при прямом сравнении, но имеет критическое значение для механизмов с большой инерцией [3].

Высоковольтные частотные преобразователи, с другой стороны, являются сложными электронными системами с более коротким ресурсом компонентов. Нарботка на отказ для некоторых типов ВЧП может составлять около 30 000 часов, а межсервисный интервал в среднем в два раза меньше,

чем у гидромуфт. Они требуют квалифицированного обслуживания силами специализированных сервисных служб, которые могут обеспечить диагностику и замену силовых модулей, а также требуют создания определенных микроклиматических условий для работы (чистота воздуха, температурный режим, кондиционирование). Установка ВЧП требует также решения задач электромагнитной совместимости с сетью, что влечет за собой применение фильтров гармоник и компенсирующих устройств. Как следствие, ВЧП занимают значительно больше площади для размещения оборудования. Однако современные ВЧП предоставляют возможности, недоступные для гидромуфт: высокая точность поддержания частоты вращения, позволяющая оптимизировать процесс горения в топке СРК и снизить выбросы вредных веществ; возможность реализации энергоэффективных алгоритмов управления несколькими параллельно работающими агрегатами; дистанционный мониторинг состояния двигателя и механизма в реальном времени; а также встроенная многоуровневая система защит электродвигателя от перегрузок, коротких замыканий, обрыва фаз и перегрева.

Для объективной оценки целесообразности замены гидромуфты на ВЧП предлагается использовать показатель совокупной стоимости владения (ТСО). Расчет совокупного экономического эффекта (Э) за расчетный период целесообразно осуществлять по формуле, учитывающей основные составляющие затрат и доходов:

$$\mathbf{\mathcal{E} = \Delta\mathcal{E}\mathcal{e} + \Delta\mathcal{E}\mathcal{p} - \mathcal{I} - \Delta\mathcal{E}\mathcal{r} + \mathcal{E}\mathcal{d}\mathcal{o}\mathcal{p}}$$

где $\Delta\mathcal{E}\mathcal{e}$ — экономия электроэнергии, определяемая как разность годового потребления при работе с гидромуфтой и с ВЧП, приведенная к денежному выражению по действующему тарифу; $\Delta\mathcal{E}\mathcal{p}$ — изменение эксплуатационных расходов, включающее экономию на ремонтах, запасных частях и маслах (гидромуфта требует периодической замены масла) за вычетом роста затрат на обслуживание высоковольтного оборудования и возможного удорожания ремонта при отказе; $\mathcal{I}$ — инвестиционные затраты на приобретение, доставку, монтаж и пусконаладку ВЧП, а также на

строительство помещений, системы кондиционирования и фильтрокомпенсирующие устройства (эти затраты доминируют и в 3–5 раз превышают стоимость гидромурфты); $\Delta \text{Эг}$ — потери на собственные нужды, связанные с охлаждением гидромурфты (маслонасосы, вентиляторы), которые при переходе на ВЧП полностью исключаются; Эдоп — дополнительный эффект, трудно выражаемый в денежной форме: снижение износа регулирующей арматуры, повышение точности регулирования параметров котла, уменьшение теплопотерь с уходящими газами, сокращение экологических платежей и повышение надежности (при отказе ВЧП возможен байпасный режим, тогда как отказ гидромурфты полностью останавливает дымосос)[4].

Срок окупаемости ВЧП для двигателей свыше 1 МВт в условиях переменной нагрузки редко превышает 2–3 года. Однако для двигателей ДАЗО мощностью 315–800 кВт при узком диапазоне регулирования и работе, близкой к номинальной, срок окупаемости может достигать 5–7 лет, ставя под сомнение целесообразность модернизации. В таких случаях гидромурфта остается экономически оправданным решением благодаря низкой первоначальной стоимости и высокому КПД на номинальном режиме[5].

Таким образом, замена гидромурфт на ВЧП в приводе дымососов СРК с двигателями ДАЗО является технически зрелым и высокоэффективным энергосберегающим решением. Применение ВЧП позволяет реализовать потенциал, заложенный в кубической зависимости мощности центробежного механизма от скорости, обеспечивая экономию электроэнергии на собственные нужды до 30–40% в зависимости от глубины регулирования, а также улучшает качество управления технологическим процессом и экологичность производства.

Для наглядной оценки эффекта рассмотрим пример работы котла СРК на двух дымососах с электродвигателями ДАЗО4-450У-6У1 (номинальная мощность 630 кВт, частота вращения 1000 об/мин). При работе с гидромурфтами, даже в типичном диапазоне регулирования 80–100% от

номинальной скорости, КПД привода снижается, и потери электроэнергии могут быть существенными. При замене гидромффт на ВЧП перерасход электроэнергии для одного дымососа подобной мощности, как показывают расчеты для аналогичного оборудования, может составлять порядка **700 000 кВт·ч в год**. С учетом работы на двух дымососах суммарная годовая экономия электроэнергии может достигать **1,4 млн кВт·ч**. При этом, несмотря на более высокие первоначальные инвестиции в ВЧП по сравнению с гидромффтами, получаемая экономия электроэнергии обеспечивает возврат дополнительных вложений, что подтверждает высокую эффективность данного технического решения.

Однако при принятии решения необходимо учитывать значительные первоначальные инвестиции, повышенные требования к условиям эксплуатации и обслуживанию ВЧП, а также меньшую надежность электронных компонентов по сравнению с проверенными гидромффтами. Для двигателей ДАЗО средней мощности с большим диапазоном переменных нагрузок эффект от внедрения ВЧП максимален, а срок окупаемости минимален; при редком регулировании или узком диапазоне гидромффта остается экономически более устойчивым решением. Окончательный выбор должен основываться на технико-экономическом расчете для каждого агрегата с учетом его индивидуальных особенностей, графика нагрузки и стоимости энергоресурсов.

Список источников:

1. Ширинов, А. А. Способ оптимизации режимов работы дымососов и энергетических параметров их асинхронных двигателей Ташкентской ТЭС / А. А. Ширинов, А. А. Хашимов. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 19 (153). — С. 87-89.
2. Даниленко Ю.И., Сапожников С.С. Энергоэффективное решение проблемы применения регулируемого электропривода на дымососах котлоагрегатов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2011. № Спецвыпуск. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoeffektivnoe->

reshenie-problemy-primeneniya-reguliruemogo-elektroprivoda-na-dymososah-kotloagregatov (дата обращения: 05.08.2026).

3. Панов А. С., Куцый К. Л., Горбачевский Н. К., Осипов О. Н. Модернизация электротехнического комплекса производства резиновых смесей // Труды V Международной (16-всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу. 2007. - СПб., 2007. - С. 406-407.

4. Хакимьянов М.И. Повышение энергоэффективности и оптимизация режимов работы электроприводов в нефтедобывающей промышленности : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.03. Уфа, 2018. 42 с.

5. Иванов В. Б., Рихтер М., Ситас В. И. К вопросу о сравнительной эффективности механотронного и частотно-регулируемого приводов // ВЕЖПТ. 2012. №10 (57). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-sravnitelnoy-effektivnosti-mehanotronnogo-i-chastotno-reguliruemogo-privodov> (дата обращения: 05.08.2026).