

Савицкий А.И., к.т.н.
(ПАО НИПИ «Механобрчермет»)
Осадчук Ю.Г., к.т.н., доц.,
Сёмочкин А.Б., к.т.н., доц.,
Федотов В.А., Макодзев В.Н.
(ДВНЗ «КНУ»)

ВАРИАНТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОНВЕЙЕРОВ ДФ № 2 И ДФ № 3 ПАО «СЕВГОК»

В работе решалась задача, где требовалось изыскать экономически обоснованные варианты модернизации тяжелых конвейеров с целью снижения энергопотребления, при сохранении прочих технологических показателей.

В результате проведенных в течение трех лет на предприятии KWK ANNA (Польша) исследований эксплуатации и потребления электрической энергии, износа ленты и вращательных элементов в конвейере с регулированием скорости было установлено, что степень их износа значительно меньше, чем в обычном случае нерегулируемого конвейера [1].

На первый взгляд, изыскать в конвейерах резервы для снижения затрат энергии практически невозможно. Требуются всяческие мероприятия по снижению сопротивления движению элементов конвейера (уменьшение трения от роликов, уменьшение работы на деформацию ленты, и т.д.). Такие мероприятия являются капиталоемкими, и больше подходят для построения новых конвейеров. В нашем случае, не затрагивая механики конвейера, единственным резервом экономии энергии является снижение скорости конвейера с помощью регулируемого электропривода. Ясно, что затраты энергии на подъем на высоту полезного груза не зависят от скорости, тут затраченная энергия равна потенциальной $E_p = m \cdot g \cdot h$. Но возможно уменьшить потери энергии от момента сопротивления пустого конвейера (момента холостого хода). Как известно, этот момент в общем случае представляет собой достаточно устойчивую долю от суммарного момента сопротивления конвейера движению (к примеру, для конвейера ЛК-1 ДФ №3 момент холостого хода составляет 11.7% от номинального момента двигателей этого конвейера), и этот момент холостого хода практически не зависит от скорости.

Именно за счет указанного момента холостого хода возможно снизить потери энергии, так как мощность холостого хода также снижается со снижением скорости, согласно выражению $P_{xx} = M_{xx} \cdot \omega_n$. Этим способом экономии электроэнергии было бы невозможно воспользоваться, если бы конвейеры были загружены согласно проекту.

Однако в результате статистического анализа загрузки конвейеров с использованием аппарата корреляции было установлено, что математическое ожидание загрузки конвейеров составляет в среднем около 50%. Это означает принципиальную возможность регулирования скорости конвейера вниз без потери технологических показателей.

В настоящее время двигатели конвейеров ДФ № 2 оснащены системами облегченного пуска типа УПТФ, а двигатели конвейеров ДФ №3 оснащены системой электропривода «Асинхронно-вентильный каскад». Рассмотрим по отдельности перспективы развития регулируемого электропривода для каждой фабрики по отдельности.

ДФ №2. Очевидно, двигатели ДФ №2 не позволяют длительного снижения скорости с помощью УПТФ, так как мощность скольжения рассеивается на резисторах УПТФ, перегревая их, и снижая эффект от экономии электроэнергии. Другими словами, для экономии энергии требуется установка новой системы регулируемого электропривода. Среди вариантов установки можно отметить системы ПЧ-АД, АВК, первую - как систему, на которую заявлены большие возможности регулирования разных параметров, вторую – как систему, давно апробированную для применения на тяжелых конвейерах. Однако, с первой системой ПЧ-АД не все так просто.

Рассмотрим это на примере современного, новейшего АЭП системы «В-Ф-АИН с ШИМ-АД» [2]. При более детальном рассмотрении особенностей эксплуатации частотно-регулируемого электропривода, *даже если не учитывать особенностей конкретного технологического процесса*, на поверхность всплывает ряд нюансов.

1. Ресурсоемкость и энергоемкость электропривода определяется двумя обратно пропорциональными составляющими (ресурсо- и энергоемкость преобразователя частоты и ресурсо- и энергоемкость двигателя).

2. Реальная энергоемкость преобразователя частоты зависит от многих факторов (растет при увеличении частоты коммутации вентиля инвертора, нагрузки, изменяется при колебаниях напряжения питания и др.), в то время как данные, предоставляемые производителями, приводятся лишь для конкретных (наверняка «благоприятных») условий.

3. Для оценки ресурсоемкости и энергоемкости электродвигателя при его питании от преобразователя частоты необходимо иметь данные о гармоническом составе тока двигателя, зависящем от f коммутации ПЧ, об уровне коммутационных перенапряжений и о степени защиты обмотки от термо - вибромеханических повреждений, которые, по «непонятным» причинам не предоставляются производителями.

4. Эксплуатация преобразователей частоты без входных фильтров, с одной стороны, приводит к снижению электромагнитной совместимости, а также надежности работы преобразователей, а с другой – обеспечивает более высокий КПД и лучшие массогабаритные показатели.

5. Эксплуатация преобразователей частоты с выходными фильтрами, с одной стороны, обеспечивает снижение энергоемкости и повышение срока эксплуатации двигателя, а с другой – приводит к увеличению потерь в преобразователе и ухудшению массогабаритных показателей.

Таким образом, можно сказать, что в отношении выбора систем ПЧ-АД требуется серьезно подходить к методике контроля энергетических параметров, что позволило бы адекватно оценивать их эффективность в различной комплектации с учетом изменения настроек параметров во всем диапазоне нагрузки. Кроме этого нужно еще учесть, что для реализации этой системы на ДФ-2 надо будет строить дополнительное помещение под высоковольтные преобразователи.

Как сравнительно легкий и быстрый вариант экономии электроэнергии можно рассматривать отключение одного из двигателей трехдвигательного конвейера 1КТ или 1АКТ. Для обоснования экономической привлекательности этого варианта был проведен расчет КПД и коэффициента мощности при отключении двигателя 800 кВт от конвейера, который был загружен на 60%. Методики расчета вкратце изложены ниже.

Расчет КПД.

Общепринято, что в номинальном режиме суммарные потери в асинхронной машине распределяются примерно так: 1% номинальной мощности идет на механические и прочие потери, остальные же потери распределяются поровну между потерями в стали (которые практически не зависят от нагрузки) и потерями в меди статора и ротора (которые являются функцией токов). Исходя из этого положения и определим, как меняется КПД в функции нагрузки АД.

Зависимость КПД от нагрузки двигателей рассчитаем по следующей упрощенной формуле [3]:

$$\eta = \frac{\beta P_n}{\beta P_n + \Delta P_c + \Delta P_{мех} + \beta^2 \Delta P_m}; \quad (1)$$

где $\beta = \frac{P_2}{P_n}$; коэффициент загрузки двигателя по моменту; P_2 - мощность загрузки двигателя;

ΔP_c - постоянные потери в стали двигателя; ΔP_m - переменные потери в меди двигателя. График зависимости КПД от нагрузки будет иметь вид, показанный на рис. 1.

Расчет коэффициента мощности.

Для электроприводов, основанных на применении нерегулируемых по скорости асинхронных двигателей оценку можно осуществлять, воспользовавшись отношением реактивной мощности при изменении момента:

$$Q_s / Q_{zn} \approx C + (1 - C) * M_c^2; \quad (2)$$

где Q_s , Q_{zn} – текущие и при номинальной нагрузке значения реактивной мощности; M_c^* – относительный статический момент.

$$C \approx 1 - 1/(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) * \operatorname{tg} \varphi_n; \quad (3)$$

где λ - кратность номинального момента.

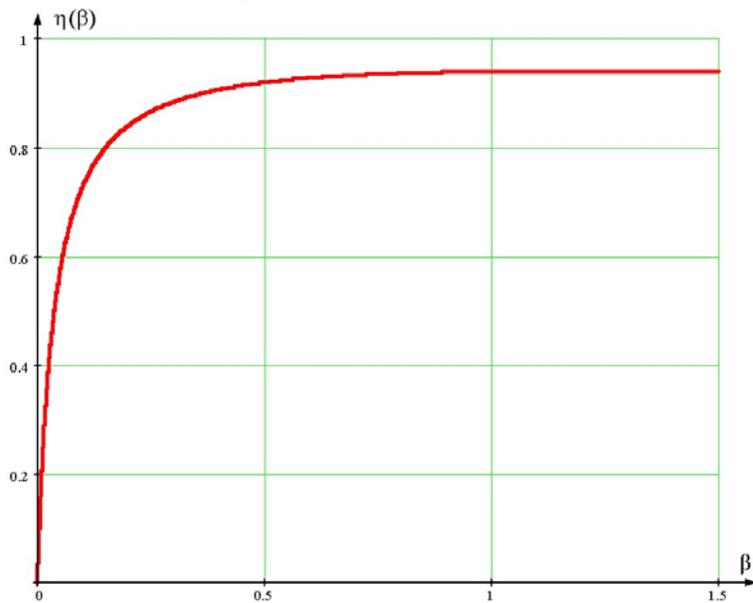


Рис.1- График КПД от нагрузки на валу АД АКЗ 13-59-6 800/1000

Тогда график зависимости коэффициента мощности от нагрузки будет иметь вид, показанный на рис. 2.

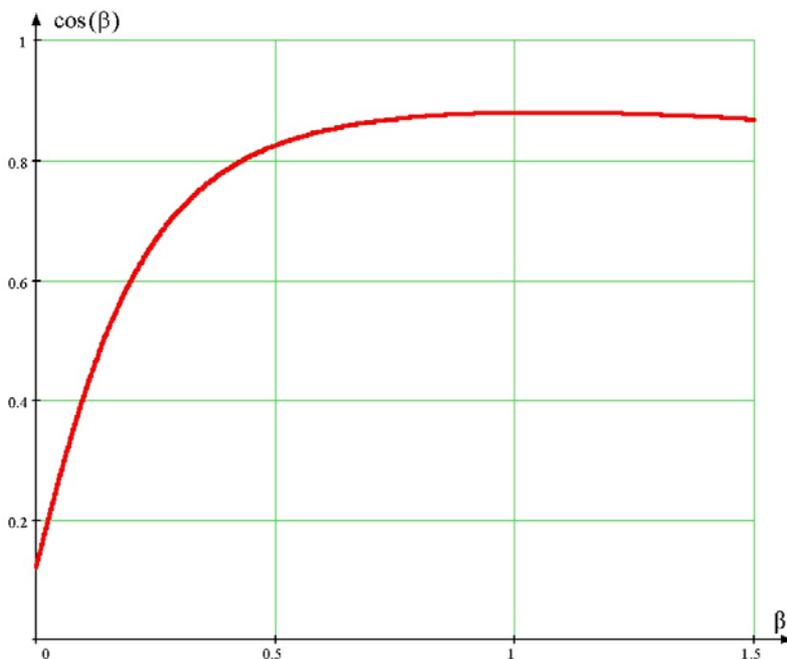


Рис.2- Коэффициент мощности от нагрузки на валу АД АКЗ 13-59-6 800/1000

Учитывается при этом, что нагрузка между всеми барабанами распределяется в пропорции 1:1. Тогда, используя вышеуказанную методику, было выяснено, что для 2-двигательного варианта конвейера по сравнению с 3-хдвигательным вариантом экономия активной энергии составит 21,1 кВт, при этом также уменьшается потребление реактивной мощности на 109 квар. При цене 0,7952 грн/ кВтч и 0,31 грн/ кварч и постоянной работе с этой нагрузкой в год экономия составит 442982 грн в год [4]. В случае же своевременной компенсации реактивной мощности (при наличии конденсаторных батарей) экономия все равно составит значительную сумму 147 тыс. грн.

Как видно из расчета, отключение одного из двигателей конвейера при его недогрузке имеет заметный экономический эффект, который указывает на целесообразность внедрения этого

варианта в практику, несмотря на все риски и опасения, высказанные по поводу отключения двигателя конвейера. Рекомендуется вариант отключения АД от сети с помощью отдельного выключателя.

Основным риском представляется увеличение загрузки конвейера до номинальной, при оставшемся в работе ограниченном количестве двигателей. Однако технологические увеличения нагрузки не бывают внезапными, они связаны с недосмотром при управлении конвейером. Всегда можно при переполнении входного бункера найти несколько минут на запуск с помощью того же УПТФ оставшегося двигателя, и начать интенсивную отгрузку материала. Здесь также никоим образом не предлагается пуск двухдвигательного варианта конвейера вместо трехдвигательного. Пуск является тяжелым режимом, даже на пустом конвейере, и поэтому для скорейшего его завершения требуется использование всех двигателей конвейера. Отключение одного из двигателей осуществляется по мере наступления благоприятной возможности (при падении загрузки конвейера) только при номинальной скорости конвейера.

Очевидным риском при выводе одного из двигателей трехдвигательного конвейера в резерв является опасность перегрузки одного из оставшихся двигателей из-за разброса их параметров. Если характеристики оставшихся двух двигателей будут неодинаковыми (что чаще всего связано с нарушениями технологии ремонта), то на одной и той же скорости они примут на себя разную нагрузку, будут развивать разный момент, один из двигателей больше номинального, второй – меньше номинального. В конечном итоге это приведет к срабатыванию тепловой защиты двигателя, а при особо неблагоприятных обстоятельствах (сильно отличающиеся характеристики двигателей) – к последовательному опрокидыванию друг за другом оставшихся двигателей. Чтобы избежать этого, нужно ужесточить контроль за технологией ремонта двигателей, или, в крайнем случае, обязательно осуществлять послеремонтное испытание асинхронного двигателя со снятием его механической характеристики и проверкой ее соответствия номинальным параметрам.

Как вариант модернизации может быть система «ЭРАТОН-ФР», которая является дальнейшим развитием системы АВК, с улучшенными регулировочными и энергетическими показателями.

Преобразователь частоты типа «ЭРАТОН-ФР» устанавливается между цепью ротора и высоковольтной сетью, питающей статор каждого АД ФР.

Пускорегулирующее устройство (ПРУ) каждого АД ФР на базе «ЭРАТОН-ФР» представляет собой последовательное соединение двух транзисторных инверторов напряжения (роторного — ИР и сетевого — ИС) с накопительным конденсатором в промежуточном звене постоянного тока. Роторный и сетевой инверторы напряжения управляются по закону синусоидальной широтно-импульсной модуляции и обеспечивают плавный пуск и регулирование скорости электродвигателей за счет обмена энергией между ротором каждого электродвигателя и высоковольтной питающей сетью без потерь мощности в пусковых роторных сопротивлениях. Для электромагнитной совместимости сетевого инвертора с питающей сетью в преобразователе «ЭРАТОН-ФР» использован «синусный» LC-фильтр, который не пропускает высокочастотные составляющие напряжения сетевого инвертора в питающую сеть.

Стабилизация номинальной скорости конвейера с ЧРЭП «ЭРАТОН-ФР» обеспечивается с точностью 1%, а выравнивание токов роторов с точностью 5%.

После разгона конвейера и снижения мощности скольжения сетевые инверторы переводятся в режим генерации в сеть реактивной мощности, т.е. пускорегулирующее устройство переводится в режим компенсатора реактивной мощности. Компенсация реактивной мощности обеспечивает разгрузку сети от реактивных токов и не требует затрат на установку дополнительных компенсаторов реактивной мощности.

Преобразователи частоты «ЭРАТОН-ФР» позволяют разогнать электродвигатели конвейера до скорости выше синхронной, если номинальный момент электродвигателей превышает момент сопротивления на сверхсинхронной скорости, т.е. если есть запас по моменту электродвигателей на сверхсинхронной скорости. Это обеспечит рост производительности конвейера без дополнительных инвестиций. Перечисленные выше достоинства пускорегулирующих устройств электродвигателей с фазным ротором на базе ЧРЭП «ЭРАТОН-ФР» делают перспективным использование данных ПРУ на многодвигательных конвейерах ДФ № 2.

ДФ №3. Оценим экономический эффект от снижения скорости с помощью регулируемого электропривода на конвейере ЛК-1. Ранее было сказано, что момент холостого хода составляет 11.7% от номинальной суммарной мощности двигателей конвейера.

Если при необходимости следует снизить скорость конвейера на 30%, то только за счет момента холостого хода (который практически остается неизменным при любой скорости) экономия активной энергии составит в год (при условии постоянной работы конвейера):

$$M_{xx} \cdot 0,3 \cdot 104,7 \cdot 24 \cdot 365 = 3029 \cdot 104,7 \cdot 24 \cdot 365 = 83343196,4; \text{Вт}$$

В стоимостном выражении экономия электроэнергии составит:

$$833434,196 \cdot 0,7952 = 662746,87 \text{ грн.}$$

При необходимости дальнейшего снижения скорости (до 0,5 номинальной) экономия электроэнергии составит еще большую величину, и достигнет $\cong 1$ млн. грн.

Однако в условиях ДФ №3 регулировочные свойства АВК совсем не используются. Связано это с обеспечением работы защиты от аварийного снижения скорости (с помощью храповых механизмов). Как известно, храповые механизмы срабатывают, как только скорость снизится несколько ниже номинального значения. При дальнейшем снижении скорости, если храповые механизмы не срабатывают, то они в дальнейшем становятся бесполезны, так как не смогут удержать конвейер. Поэтому, для повышения энергоэффективности конвейеров на ДФ №3, следует внедрить иерархическую систему автоматического управления электроприводами на основе программируемых контроллеров, где можно реализовать любой алгоритм. Изменения силовых схемных решений при этом не требуется (если АВК был поставлен полностью комплектно). Изменения, если потребуются, то только по системе управления инвертором, с помощью какой-либо системы автоматического управления (например, двухконтурной системы подчиненного регулирования, с контурами тока и скорости, с задатчиком интенсивности).

В этой иерархической системе можно предусмотреть одновременный пуск всех конвейеров (если позволяет питающая сеть) с выдерживанием соотношения скоростей между ними. Одновременный пуск всех конвейеров значительно сокращает время перевода конвейеров в рабочее состояние. Нужно также внедрить определение режима пробуксовки на основе новых алгоритмов, например по резкому падению токовой нагрузки двигателей, и одновременному отслеживанию мгновенной скорости барабана. Что касается храпового останова, для надежности аварийного стопорения конвейера (например, при пропаданиях питающего напряжения, когда электропривод становится бесполезным) при значительно сниженных скоростях можно предусмотреть установку дополнительных храповых механизмов на высокоскоростном и на низкоскоростном валу редуктора. Так было сделано на Михайловском ГОКе на конвейерах К-1, К-2 дробильной фабрики. И управление всеми храповыми механизмами осуществлять от той же иерархической системы управления (которая априори снабжена бесперебойной системой электроснабжения), которая запустит все эти храповые механизмы не на определенной скорости, а на любой скорости, сразу же после начала аварийной ситуации.

Используя выражение (1) для расчета КПД в функции нагрузки конвейера получим зависимость:

$$\eta(\beta) = \frac{P_2(\beta)}{P_2(\beta) + \Delta P_c + \Delta P_{mex} + \left(\frac{P_2(\beta)}{P_n} \right)^2 \Delta P_m}; \quad (4)$$

где $P_2(\beta) = \beta * P_n$ – развиваемая мощность двигателем конвейера в зависимости от коэффициента загрузки.

С учетом КПД по зависимости (4) определим потери для каждого двигателя приводного барабана. Для двигателя первого барабана составят:

$$\Delta P_{1,2}(\beta) = \frac{P_{1,2}(\beta)}{\mu_{1,2}(\beta)} - P_{1,2}(\beta); \quad (5)$$

на двигателе второго барабана:

$$P_3(\beta) = \frac{P_3(\beta)}{\eta_3(\beta)} - P_3(\beta); \quad (6)$$

Суммарные потери всех двигателей составят (для трехдвигательного варианта):

$$\Delta P_{\Sigma_3}(\beta) = 2 * \Delta P_{1,2}(\beta) + \Delta P_3(\beta) \quad (7)$$

При отключении одного из двигателей первого барабана нагрузка будет распределена между двумя оставшимися двигателями, то есть на каждый будет приходиться половина номинальной мощности конвейера, что эквивалентно приложенной мощности на втором приводном барабане (для трехдвигательного режима).

$$\Delta P_{1,2,3}(\beta) = \frac{P_3(\beta)}{\eta_{1,2,3}(\beta)} - P_3(\beta); \quad (8)$$

Суммарные потери всех двигателей составят (для двухдвигательного варианта):

$$\Delta P_{\Sigma_2}(\beta) = 2 * \Delta P_{1,2,3}(\beta); \quad (9)$$

Тогда экономия активной мощности в функции загрузки конвейера составит:

$$\Delta P(\beta) = \Delta P_{\Sigma_3}(\beta) - \Delta P_{\Sigma_3}(\beta) - \Delta P_{\Sigma_2}(\beta); \quad (10)$$

Учитывая зависимости (2) и (3), выражение зависимости коэффициента мощности в функции от загрузки конвейера примет вид:

$$\cos \phi_2(\beta) = \frac{\frac{P_2(\beta)}{\eta_2(\beta)}}{\sqrt{\left(\frac{P_2(\beta)}{\eta_2(\beta)}\right)^2 + \left[C + (1 - C) * \left(\frac{P_2(\beta)}{P_n}\right)^2 * Q_n \right]^2}}; \quad (11)$$

где $P_2(\beta), \eta_2(\beta)$ – соответственно развиваемая активная мощность на конкретном приводном барабане конвейера и КПД приводного двигателя в функциях загрузки конвейера.

Выразив реактивную мощность через функцию загрузки конвейера с учетом выражения (11) получим зависимости. Для двигателей первого барабана:

$$Q_{1,2}(\beta) = \sqrt{\left(\frac{P_{1,2}(\beta)}{\cos \phi_{1,2}(\beta)}\right)^2 - P_{1,2}(\beta)^2}; \quad (12)$$

на двигателе второго барабана:

$$Q_3(\beta) = \sqrt{\left(\frac{P_3(\beta)}{\cos \varphi_3(\beta)}\right)^2 - P_3(\beta)^2}; \quad (13)$$

Реактивная мощность, генерируемая трехвигательным электроприводом в функции загрузки конвейера:

$$Q_{\Sigma_3}(\beta) = 2 * Q_{1,2}(\beta) + Q_3(\beta); \quad (14)$$

Реактивная мощность, генерируемая двухдвигательным электроприводом с учетом распределения мощностей между двигателями приводных барабаном в функции загрузки конвейера:

$$Q_{\Sigma_2}(\beta) = 2 * Q_3(\beta); \quad (15)$$

Разница в потреблении реактивной мощности в функции загрузки конвейера составит:

$$Q(\beta) = Q_{\Sigma_3}(\beta) - Q_{\Sigma_2}(\beta); \quad (16)$$

Стоимость активной энергии - 0,7952 грн/ кВтч, плата за реактивную энергию - 0,31 грн/ кварч. Рассчитаем годовой эффект при условии непрерывной работы конвейера при отключении одного из двигателей первого барабана в функции загрузки конвейера используя выражения (10) и (16):

$$C_r(\beta) = (\Delta Q(\beta) * 0,31 + \Delta P(\beta) * 0,7952) * 24 * 365; \quad (17)$$

Тогда график годового экономического эффекта в функции от загрузки конвейера рассчитанный по выражению (17) имеет вид:

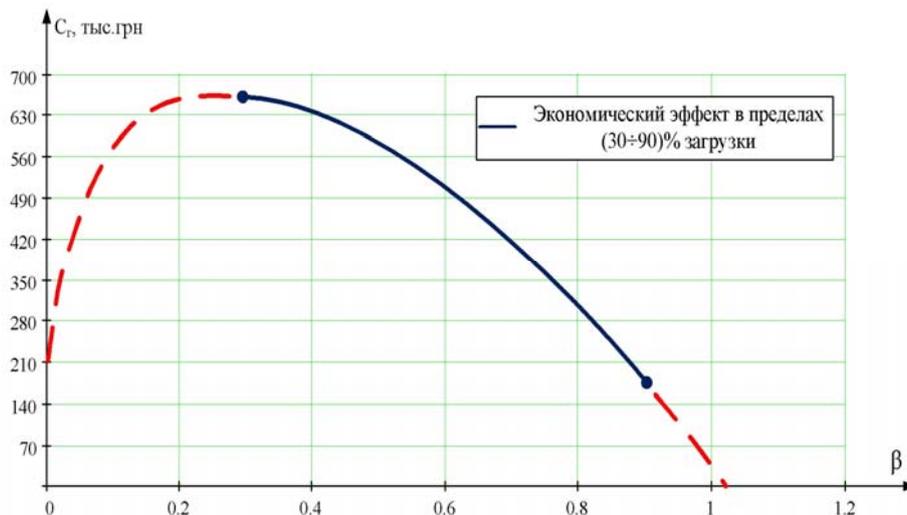


Рис.3- Зависимость годового экономического эффекта от нагрузки конвейера

ВЫВОДЫ:

В результате исследования вариантов модернизации автоматизированной системы управления конвейеров можно сделать следующие выводы:

1. Применение частотного электропривода по цепи статора является весьма перспективным вариантом модернизации, из-за заявленных производителями регулировочных и энергетических возможностей, однако этот привод не является универсальным в общем смысле

этого слова. Применительно к тяжелым конвейерам требуются серьезные исследования по расчету конфигурации частотных приводов и оптимизации их энергетических и рабочих режимов.

2. Применение частотного электропривода по цепи ротора также является перспективным вариантом модернизации, потому что по сравнению с предыдущими вариантами систем АВК с однооперационными тиристорами в инверторах и диодами в выпрямителях в системах типа Эратон-ФР серьезно усилена защита от помех в сеть, а также улучшено качество управления режимами пуска и регулирования. Кроме того, системы АВК всегда считались надежными и апробированными решениями для применения в тяжелых конвейерах, поэтому Эратон-ФР, как дальнейшее развитие АВК, является рациональным выбором для модернизации ЭП в ДФ-2.

3. Для повышения энергоэффективности конвейеров в ДФ №3 требуется не модернизация систем электропривода, а разработка и построение иерархической системы автоматизации, которая будет совместно осуществлять функции контроля аварийных параметров с управлением скоростью каждого конвейера в отдельности. В качестве дополнительной защиты от аварийного снижения скорости конвейера рекомендовано осуществить дополнительную установку храповых механизмов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Преобразователи для высоковольтных двигателей с фазным ротором.- Режим доступа: <http://www.erasib.ru/eratonfr/>
2. Гаврилов П.Д. Автоматизированный частотно- управляемый электропривод – основа энерго- и ресурсосбережения. - Режим доступа:<http://www.energosovet.ru/stat65p1.html>.
3. Усольцев А.А. Общая электротехника. // Учебное пособие. - 2009. - 301 с.
4. Полуниин В. Т., Гуленко Г. Н. Эксплуатация мощных конвейеров – М.: Недра, 1986. – 344 с.