

## КОНЦЕПЦИЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ПОТОЧНО-ТРАНСПОРТНЫХ ЛИНИЙ ПРИ ПЕРЕГРУЗКЕ ЗЕРНА

Хобин В.А., д-р техн. наук, профессор  
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса  
Шестопалов С.В.  
Компания С-инжиниринг, г. Одесса

*Проведен сравнительный анализ известных вариантов управления производительностью (степенью загрузки) поточно-транспортных линий при перегрузке зерна. На его основе сформулирована концепция эффективного управления, приведены структурная схема варианта САУ для ее реализации и результаты моделирования.*

*A comparative analysis of known variants of performance management (degree of load) thread-transport lines of grain transshipment. On this basis, formulated the concept of good governance, shows a block diagram version of ACS for its realization and simulation results.*

Ключевые слова: перегрузка зерна, поточно-транспортные линии, производительность, управление, энергоэффективность, безаварийность.

**1. Постановка задачи.** Процессы перегрузки зерна, реализуемые поточно-транспортными линиями (ПТЛ), составляют основную часть технологических процессов (ТП) предприятий, обеспечивающих его приемку, хранение, переработку (подработку) и отгрузку. У зерновых терминалов, обеспечивающих формирование крупных партий зерна и их отгрузку на железнодорожный, речной и морской транспорт, доля таких процессов максимальна. Время выполнения операции перегрузки и энергозатраты на нее определяются производительностью ПТЛ. Изменение производительности ПТЛ осуществляется изменением расхода зерна из расходной емкости на первый, по ходу продукта, конвейер линии. Увеличение производительности сокращает время операции по перевалке и затраты энергии на ее реализацию, что, в конечном итоге, повышает экономическую эффективность работы предприятия.

Максимально достижимая производительность линии ограничена особенностями конструкции и эксплуатации транспортирующего оборудования ПТЛ – конвейеров различных типов, включая ковшовый конвейер для вертикального транспортирования – норию. При ее превышении возникают аварийные ситуации (АС), когда дальнейший процесс перегрузки становится невозможен из-за угрозы перерастания АС в аварию. Такие угрозы ликвидируют специальные устройства аварийной защиты, отключающие конвейер, где возникла АС, и все предшествующие ему конвейеры в аварийном режиме, т.е. без их разгрузки от транспортируемого материала. Такое отключение сопровождается не только увеличением времени операции по перегрузке зерна и энергозатрат, но и деградацией свойств обмоток изоляции приводных электродвигателей (ПЭД) конвейеров, силовых контактов их пускателей, образованием завалов зерна, которые перед новым пуском ПТЛ необходимо ликвидировать вручную.

Для рассматриваемых ПТЛ существуют два типа АС, связанных с превышением их допустимой производительности. Первый тип АС связан с перегревом ПЭД одного из конвейеров ПТЛ (событие  $S^{ТЗ}$ ) в связи с его перегрузкой из-за превышения *массовой* производительности. В этом случае аварийная защита реализуется реле тепловой защиты (РТЗ). Второй тип АС связан с возникновением завала рабочего пространства конвейера (событие  $S^{ДП}$ ) из-за превышения допустимого значения его *объемной* производительности и сопровождается прекращением процесса транспортировки конвейером, где развился завал. В этом случае аварийная защита реализуется датчиками-реле подпора зерна [1]. Принципиальная особенность ПТЛ, включающих в себя нории, заключается в том, что именно нории, как правило, являются их «узким местом» по объемной производительности [2]. В этом случае проблемы повышения производительности таких ПТЛ связаны, прежде всего, с возникновением АС второго типа.

Отметим, что под эффективностью работы ПТЛ будем понимать ее энергоэффективную и безаварийную работу.

**2. Особенности объекта и анализ известных систем управления.** Аварийное отключение конвейеров и нории, вызванное срабатыванием аварийной защиты при возникновении события  $S^{ДП}$ , позволяет предотвратить серьезные негативные последствия развития такого аварийного режима в аварию. К основным из них относятся следующие: а) развитие завалов сыпучего материала в точке его перегрузки с транспортера в башмак нории, часто многотонных; б) заклинивание ленты нории сыпучим материалом и

ее проскальзывание на приводном барабане, развитие процесса ее нагрева и перегрева от трения о барабан, возгорание, обрыв и обрушение ленты в норийные трубы, и взрыв его воздушно-пылевой смеси.

Подпор сыпучего материала в башмаке нории возникает через некоторое время после того, как объемная производительность нории стала меньше объемной производительности транспортеров, подающих в нее сыпучий материал. Такая ситуация возможна, когда достигнут и превышен предел заполнения ковшей нории транспортируемым материалом, и, следовательно, достигнуто и превышено критическое значение объемной производительности нории. Это критическое значение объемной производительности нории априори неизвестно, т.к. на его конкретное значение влияют многие факторы, которые могут существенно изменяться непосредственно в ходе процесса транспортирования. К таким факторам относятся изменения характеристик: а) транспортируемого зерна, например, его фракционного состава, коэффициента внутреннего трения; б) технического состояния нории, например, количество частично или полностью оборванных ковшей нории, изменение степени натяжения норийной ленты и ее перекоса. Последние характеристики влияют на амплитуду и частоту колебаний ковшей и, следовательно, на фактическую степень их максимального заполнения сыпучим материалом при его транспортировании.

**«Ручное» управление ПТЛ [1].** В условиях такого управления, все его функции реализует человек-оператор ПТЛ. Таких главных (системообразующих) функций две. Это функция оптимизации, которая в данном случае заключается в выборе для текущих условий работы конкретного значения производительности (степени загрузки) ПТЛ, и функция регулирования (стабилизации) производительности на выбранном, оптимальном, с точки зрения оператора, значении. Отметим, что эффективность управления ПТЛ зависит от эффективности реализации обеих функций, что отражает их тесную взаимосвязь и взаимозависимость при реализации.

При реализации функции оптимизации оператор руководствуется двумя взаимнопротиворечивыми целями и интуитивно ищет компромисс между ними. Первая цель – повысить производительность линии для сокращения времени выполнения операции по перегрузке зерна и затрат электроэнергии на нее. Вторая цель – снизить производительность линии до такой, причем априори неизвестной ему величины, чтобы объемная производительность нории всегда оставалась бы ниже ее критического значения, т.е. АС, связанная с возникновением подпора зерна в башмаке нории, не возникала. Подчеркнем, что решение о выборе оптимальной производительности принимается оператором в условиях неопределенностей о ее критическом значении, превышение которого приведет к возникновению АС  $S^{ДП}$ . При этом потери от  $S^{ДП}$  могут существенно превзойти выигрыш от оптимизации.

При реализации функции регулирования загрузки нории оператор первоначально определяет текущее значение фактической нагрузки ПЭД нории, как правило, по величине его тока нагрузки. При ее отклонении от значения (оптимального), выбранного оператором, он может ее изменять за счет изменения величины расхода сыпучего материала из расходного бункера на горизонтальный подбункерный конвейер (конвейеры) изменением проходного сечения разгрузочного устройства. Такое регулирование производительности ПТЛ реализуется максимально просто, но имеет низкую динамическую точность, проявляющуюся в больших и длительных динамических отклонениях фактической степени загрузки нории от ее заданного значения. Низкая динамическая точность обуславливается большим временем запаздывания в канале регулирования загрузки нории зерном. Время этого запаздывания складывается из времени транспортирования зерна конвейером (конвейерами) от разгрузочного устройства расходного бункера и времени реакции оператора на информацию об изменении тока нагрузки ПЭД нории и/или на сигнал о срабатывании датчика подпора. Вследствии этого запаздывания вероятность возникновения АС  $S^{ДП}$  существенно возрастает.

Итак, при ручном управлении, при описанных выше условиях, оператор целенаправленно снижает выбираемое им значение нагрузки ПЭД нории и, следовательно, производительность ПТЛ до такого значения, когда вероятность срабатывания аварийной защиты из-за срабатывания датчика подпора за время всей операции транспортирования была бы очень низкой. Другими словами, ручное управление позволяет оператору либо снизить вероятность возникновения подпора в башмаке нории и аварийного ее останова за счет невысокой производительности линии, либо повысить производительность линии при высокой вероятности завала нории. При этом оператор всегда выбирает первую из этих двух альтернатив.

**Управление ПТЛ с автоматическим регулированием производительности изменением проходного сечения разгрузочного устройства бункера [3].** В этом случае функция выбора заданного значения, в окрестности которого будет осуществляться стабилизация производительности, сохраняется за оператором ПТЛ. При этом очевидно, что проблемы реализации функции оптимизации сохраняются. Качество реализации функции регулирования загрузки нории при переводе ее в автоматический режим повышается. Это обуславливается снижением времени запаздывания в канале регулирования, которое возникает из-за устранения из этого запаздывания времени реакции оператора на информацию об изменении тока нагрузки ПЭД нории и/или на сигнал о срабатывании датчика подпора. Однако, предотвра-

шение развития завала норрии зерном, если он уже начался, возможно только при очень медленном его развитии, либо при коротких транспортерах, питающих норрию.

**Управление ПТЛ с автоматическим регулированием производительности изменением скорости движения рабочего органа конвейера, перемещающего сыпучий материал из бункера в норрию [4].** В этом случае, как и в предыдущем случае, функция выбора заданного значения, в окрестности которого будет осуществляться стабилизация производительности, сохраняется за оператором ПТЛ. При этом очевидно, что проблемы реализации функции оптимизации сохраняются. Качество реализации функции регулирования загрузки норрии при переводе ее в автоматический режим и таком способе изменения подачи зерна в норрию повышается весьма существенно. Это обуславливается тем, что скорость движения рабочего органа конвейера и сыпучего материала изменяются одновременно по всей его длине, и запаздывания между регулирующим воздействием на изменение расхода зерна и его изменением на входе в норрию практически не будет. Устранение запаздывания позволит, даже при появлении сигнала о срабатывании датчика подпора, за короткое время, меньшее, чем задержка по времени на срабатывание аварийной защиты, прекратить процесс дальнейшего развития подпора и ликвидировать его.

К сожалению, способ регулирования производительности подбункерного конвейера изменением скорости движения его рабочего органа за счет питания его ПЭД от преобразователей частоты, имеет существенные недостатки. Они обусловлены следующими факторами. Конвейеры, как вид транспортного оборудования при их конструировании рассчитываются на определенный режим работы, в том числе и их ПЭД, как правило – асинхронные с вентиляторным охлаждением. Длительные отклонения от расчетных (номинальных) режимов их работы, которые возникнут при регулировании расхода сыпучего материала изменением скорости рабочих органов конвейеров, будут снижать надежность их узлов. Так, при повышении скорости выше номинальной, возрастут динамические нагрузки на все узлы конвейера, что приведет к ускоренному износу рабочего органа конвейера, механических передач и подшипниковых узлов. Износ механических передач и подшипниковых узлов будет усиливаться из-за перегрева смазки и повышения трения, особенно при высокой температуре окружающей среды. При снижении скорости ниже номинальной возникнет перегрев ПЭД конвейера с вентиляторным охлаждением, он будет тем больше, чем ниже скорость вращения ПЭД, и чем выше температура окружающей среды. Кроме того, температура смазки подшипниковых узлов может не достигнуть необходимого значения, что приведет к их ускоренному износу. Кроме того, в разветвленных поточно-транспортных системах предприятий, работающих с зерном, как правило, имеется много ПТЛ. Установка большого количества частотных преобразователей и их обслуживание требует значительных дополнительных материальных затрат.

**Концепция эффективного управления и вариант системы автоматического управления (САУ) для ее реализации [5].** Концепция управления является первым этапом конкретизации в процессе разработки САУ и включает в себя три составляющих: цель управления, состав и особенности основных функций, реализуемых САУ, принципиальные особенности алгоритмов управления, реализующих функции, их отражение на структурной схеме САУ.

Цель эффективного управления производительностью (загрузкой) ПТЛ состоит в том, чтобы обеспечить, одновременно, энергоэффективную и безаварийную работу ПТЛ, причем при минимуме материальных затрат на ее реализацию.

Достижение сформулированной цели может быть осуществлено новым (расширенным) составом функций, реализуемых САУ. Это функции: – оптимизации (максимизации) производительности ПТЛ в текущих условиях ее работы; – регулирования (стабилизации) производительности ПТЛ в окрестности найденного оптимального значения; – ликвидации АС по  $S^{ДП}$ , неизбежно возникающих при поиске оптимальной (максимально достижимой) производительности ПТЛ в условиях дрейфа экстремума производительности. Таким образом, предлагаемый вариант САУ, одновременно, будет реализовать три основные (системообразующие) функции, взаимосвязанные между собой.

Взаимосвязь функций проявляется в следующем. От качества регулирования (стабилизации) производительности ПТЛ на ее оптимальном значении будет зависеть частота необоснованных, т.е. без дрейфа экстремума, возникновений АС по  $S^{ДП}$ . Поиск максимального значения производительности, которое находится в окрестности АС по  $S^{ДП}$ , т.е. реализация функции оптимизации, будет тем эффективней, чем выше качество (в данном случае это, прежде всего, быстродействие) выполнения функции стабилизации. Одновременно, чем выше быстродействие функции стабилизации, тем функция ликвидации АС по  $S^{ДП}$  будет выполняться быстрее, снижая вероятность ее перерастания в аварию.

Указанное быстродействие крайне важно, т.к. принципиальной особенностью работы ПТЛ, управляемой такой САУ, будет периодическое возникновение АС по  $S^{ДП}$ . Такая АС может возникать как самопроизвольно, вызванная дрейфом экстремума, т.е. изменением характеристик зерна и состояния норрии, причины которых достаточно подробно описаны в п. 2, так и создаваться преднамеренно, т.е. инициироваться самой САУ или оператором ПТЛ для поиска максимума производительности. В таких условиях

обеспечить высокое быстродействие ликвидации АС по  $S^{ДП}$  можно с помощью алгоритмов управления, которые включают в себя коммутацию (переключение) структуры САУ. Сущность коммутации – при событии  $S^{ДП}$  производится временная перекоммутация САУ со штатного канала регулирования « $U_1 - Q$ » производительности « $Q$ » (загрузки норрии « $M_H$ ») с помощью задвижки (этот канал имеет большое запаздывание) на канал регулирования « $U_2 - Q$ » за счет изменения скорости конвейера (этот канал без запаздывания, но он не допускает длительной работы), а после ликвидации АС производится безударное возвращение к исходной структуре.

Вариант упрощенной структурной схемы САУ, которая реализует предложенную концепцию управления производительностью ПТЛ, приведена на рис. 1.

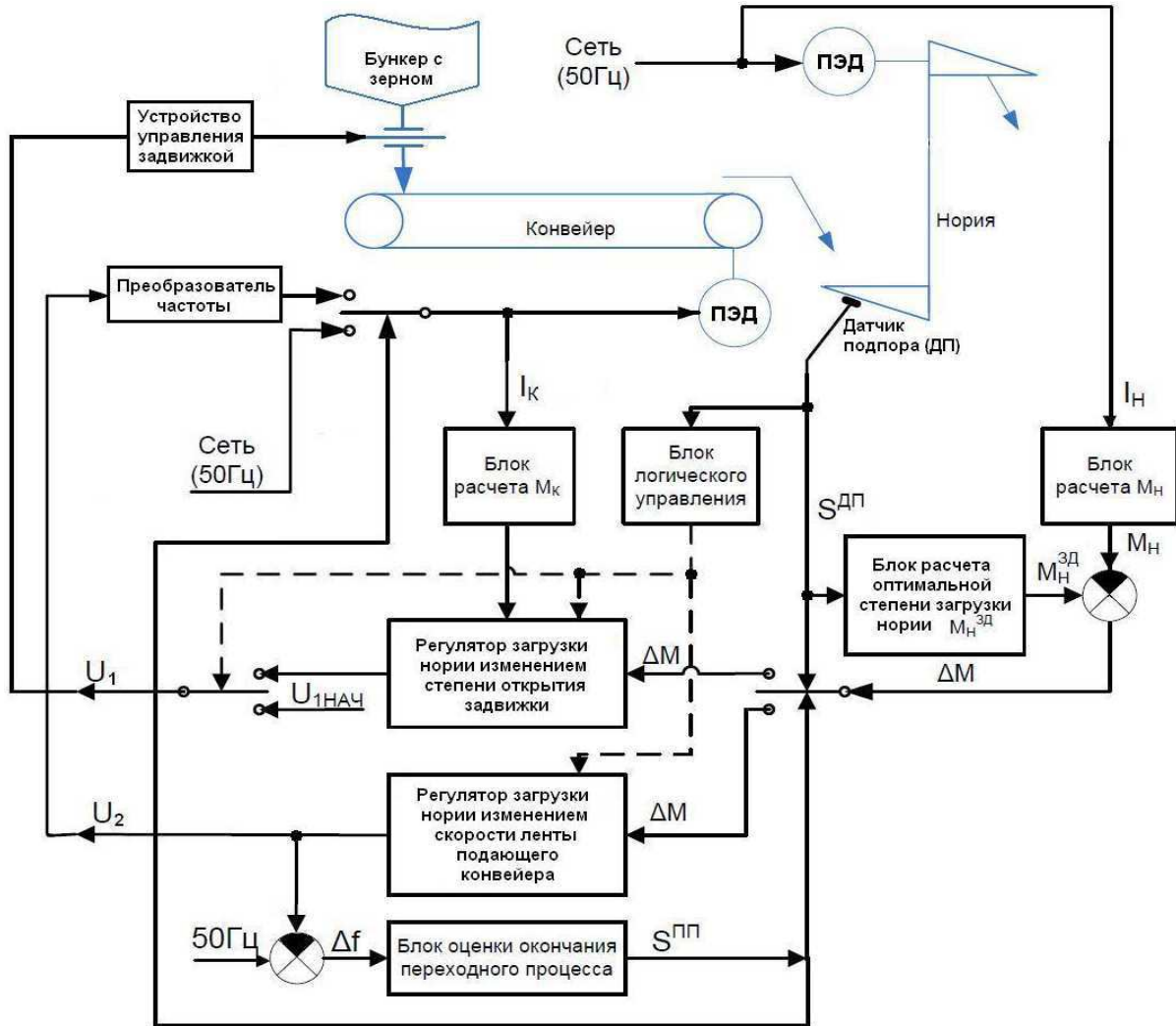


Рис. 1 – Структурная схема САУ с коммутируемой структурой производительностью ПТЛ перегрузки зерна

Обозначения переменных, принятые на рис. 1 и не расшифрованные ранее по тексту статьи:  $I_K$ ,  $I_H$  – токи нагрузки ПЭД конвейера и норрии;  $M_K$ ,  $M_H$  – степени загрузки конвейера и норрии;  $\dot{I}_1^{CA}$  – оптимальное заданное значение степени загрузки норрии;  $\Delta M$  – отклонение степени загрузки норрии от ее оптимального значения;  $U_{1НАЧ}$  – начальное значение степени открытия подбункерной задвижки;  $\Delta f$  – отклонение частоты питания ПЭД конвейера от частоты общей сети питания (50 Гц);  $S^{ПП}$  – событие, связанное с окончанием переходного процесса в контуре регулирования частоты питания ПЭД конвейера за счет изменения степени открытия подбункерной задвижки.

Подчеркнем, что коммутация структуры САУ предъявляет повышенные требования к безударности этих переключений. Наличие ударов означает возникновение в системе дополнительных переходных процессов, которые, в частности из-за нелинейности свойств объекта управления (ОУ) по каналу регулирования производительности, не только снижат качество управления, но и могут не позволить ликви-

ровать АС. Одно из безударных переключений обеспечивается регулированием частоты питания ПЭД конвейера за счет изменения степени открытия подбункерной задвижки до достижения этой частоты значения 50 Гц.

Фрагмент моделирования такой САУ приведен на рис. 2 ( $h_б$  – уровень зерна в башмаке норрии).

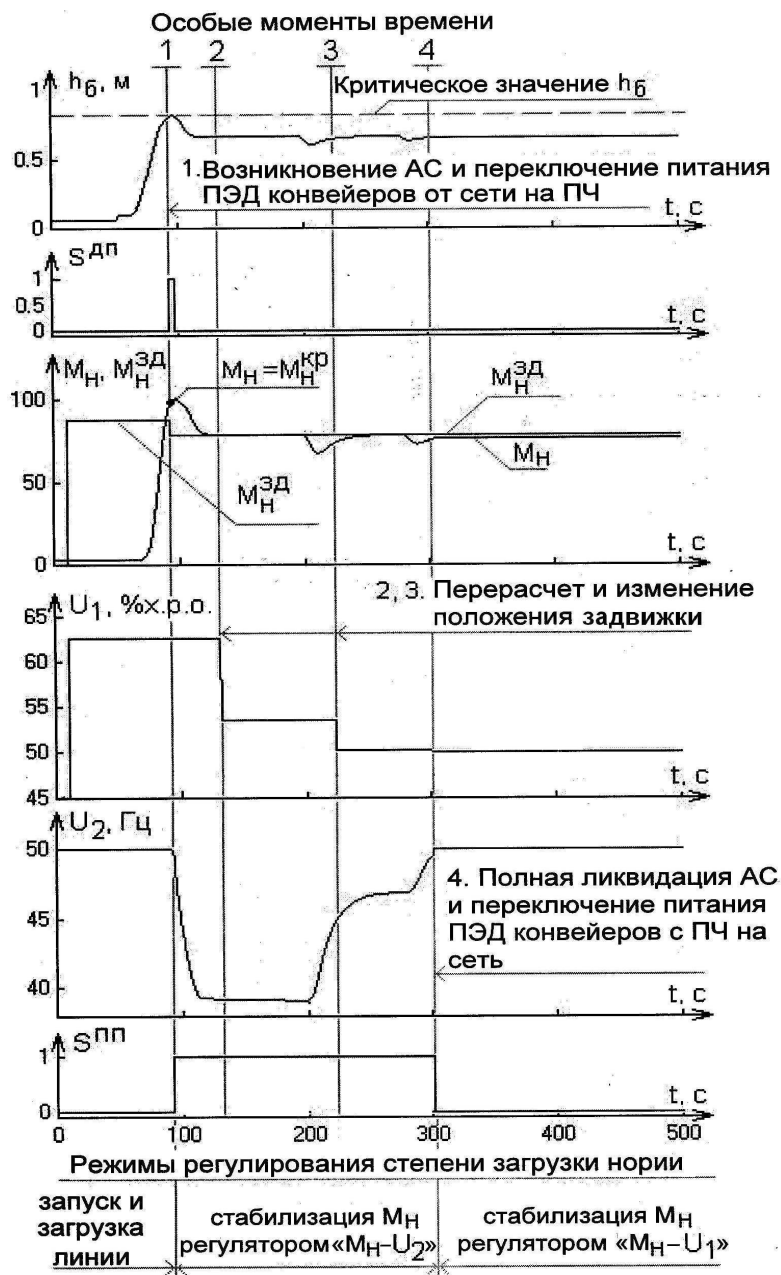


Рис. 2 – Переходные процессы в САУ с коммутируемой структурой при возникновении АС по  $S^{ДП}$

**Выводы.** Известные САУ перегрузкой зерна ПТЛ реализуют лишь функцию стабилизации загрузки линии по степени загрузки норрии, оставляя функцию выбора ее заданного значения, как и ответственность за результаты неэффективного управления, в т.ч. за возникновение АС и их последствия, оператору. Опасаясь возникновения АС, оператор всегда ведет процесс транспортирования с существенной недогрузкой. Последствия этого – увеличение времени и энергозатрат на процесс транспортирования зерна. Автоматическое управление производительностью ПТЛ, и, прежде всего, ее оптимизация, весьма существенно осложняется следующими основными факторами: а) значение объемной производительности, соответствующее образованию подпора зерна в норрии (АС при событии  $S^{ДП}$ ) априори неизвестно и изменяется с изменением механических свойств зерна и технического состояния норрии; б) штатный канал регу-

лирования производительности изменением положения подсилосной задвижки имеет запаздывание, которое может на порядок превосходить инерционность норрии по этому каналу.

Предлагаемая концепция автоматического управления производительностью ПТЛ дает возможность обеспечить ее работу в окрестности максимальной производительности, максимально быстро предотвращая развитие завала норрии зерном, что гарантирует предотвращение аварийного отключения линии.

#### Литература

1. Новицкий О.А., Сергунов В.С. Автоматизация производственных процессов на элеваторах и зерноперерабатывающих предприятиях // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1981. – 320 с.
2. Хобин В.А., Андриященко Г.В. Математическая имитационная модель норрии, как объекта управления с изменяющимися свойствами // XVI Міжнарод. конф. з автомат. управління «Автоматика-2009». Тези доповідей. – Чернівці: Книги – XXI, 2009. – С. 229 – 230.
3. Патент на корисну модель № 34335 (UA), B65G 17/00: Спосіб автоматичного керування завантаженням потоково-транспортної лінії сипких матеріалів / Хобін В.А., Андриященко Г.В. – Заявлено 25.02.2008; Опубл. 11.08.2008, Бюл. № 15. – 4 с.
4. Конвейерный дозатор: А.с. № 1506288 (СССР), G01 G 11/08 / В.А. Хобин, С.Ю. Митрофанов, Ф.С. Гальперин, А.И. Фарфель (СССР). – Заявлено 20.10.87; Опубл. 07.09.89, Бюл. № 33. – 5 с.
5. Патент на корисну модель № 57903 (UA), B65G 17/00: Спосіб автоматичного керування завантаженням потоково-транспортної лінії сипких матеріалів / Аннаев Б.С., Герасимов В.В., Хобин В.А., Кір'язов І.М., Шестопапов С.В. та ін. – Заявлено 29.12.2010; Опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5. – 22 с.

УДК 004.942:621.313.3.018.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВODНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЗАГРУЗКОЙ ОБОРУДОВАНИЯ

Хобин В.А., д-р техн. наук, проф.

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Кирьязов И.Н.

Компания С-инжиниринг, г. Одесса

*Рассматривается разработка формальных математических моделей рабочих характеристик приводных асинхронных электродвигателей, ориентированных на решение задач эффективного управления загрузкой оборудования. Параметрическая идентификация таких моделей для конкретных электродвигателей требует задания только простейших паспортных характеристик этих двигателей.*

*We consider the development of formal mathematical models of working characteristics of induction motors, focused to meet the challenges effective management loading equipment. Parametric identification of such models for specific motor tasks requires only the simplest of their passport characteristics.*

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, рабочие характеристики, модели, идентификация, управление.

**Постановка задачи.** Асинхронные электрические машины являются основными приводными электродвигателями (ПЭД) технологического и транспортно-технологического оборудования предприятий. Технологические процессы (ТП), которые реализуются этим оборудованием, как правило, являются объектами управления (ОУ), в общем случае либо «ручного» либо автоматического. Повышение эффективности управления, требует, во-первых, повышения достоверности информации о степени загрузки этого оборудования, во-вторых, разработки и оптимизации алгоритмов управления этими ТП, основа которых – применение математических моделей (ММ) и целенаправленные компьютерные имитационные эксперименты с этими моделями. Поэтому для решения обеих задач нужны ММ асинхронных ПЭД, которые адекватно описывали бы рабочие характеристики ПЭД как функцию нагрузки, приложенной к его валу со стороны оборудования.

На рис. 1 приведены типичные рабочие характеристики асинхронного ПЭД, взятые из [1].