

## АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕХАТРОННЫХ ГОРНЫХ МАШИН

Обоснованы новые подходы в решении вопроса построения систем управления мехатронными горными машинами. Приведены анализ и характеристики систем управления нового технического уровня.

Обґрунтовано нові підходи у вирішенні питання побудови систем управління мехатронними гірничими машинами. Наведено аналіз та характеристики систем управління нового технічного рівня.

The new approaches in the decision of a question of developing the mining machine control systems are proved. The analysis and characteristics of control systems of a new technological standard are given in the article.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Актуальным для угольной промышленности Украины является создание и внедрение горных машин нового поколения, существенно превосходящих серийные по техническим характеристикам, производительности, удельному энергопотреблению, ресурсу. Решая эту проблему, в Украине разработано горношахтное оборудование нового поколения для высокопроизводительных угольных шахт, отвечающее современным требованиям [1, 2, 3]: очистные комбайны, скребковые конвейеры, насосные станции, проходческие комбайны, и др. Высокий уровень технических параметров, значительное расширение функциональных возможностей машин нового поколения, требования к повышению безопасности их эксплуатации объективно привели к значительному повышению в их составе удельного веса информационных компонент и устройств силовой электроники.

**Постановка задачи.** Вместе с этим оснащение горных машин многофункциональными системами автоматизированного управления нового поколения с высоким уровнем диагностики, с целью повышения эффективности использования машин, надежности эксплуатации, снижения трудоемкости обслуживания и повышения безопасности работы стало важной практической задачей.

**Изложение материала и результаты.** Новый уровень требований привел к превращению горных машин из электромеханических систем в мехатронные, характеризующиеся тем, что машины органически содержат «интеллектуальную» составляющую. Последнее обстоятельство играет весьма существенную роль при формировании функционального состава требований систем автоматизации.

Задача разработки системы управления заключается в синтезе функциональной структуры и на ее базе - аппаратной и программной структуры с учетом наличия «интеллекта» в составе мехатронных модулей. Комплекс технических средств управления, как сложная система, должен проектироваться, используя системный подход, сущность которого состоит в комплексном едином рассмотрении всех частей системы и объекта управления (мехатронного модуля). На рис.1 представлена структурная схема мехатронного модуля - комбайна

(М), включающего систему управления (С). Модемы (Мод 1) и (Мод 2) обеспечивают обмен информации между информационной компонентой мехатронного модуля (И<sub>М</sub>) и внешней системой управления (И<sub>С</sub>), а также гальваническую развязку.

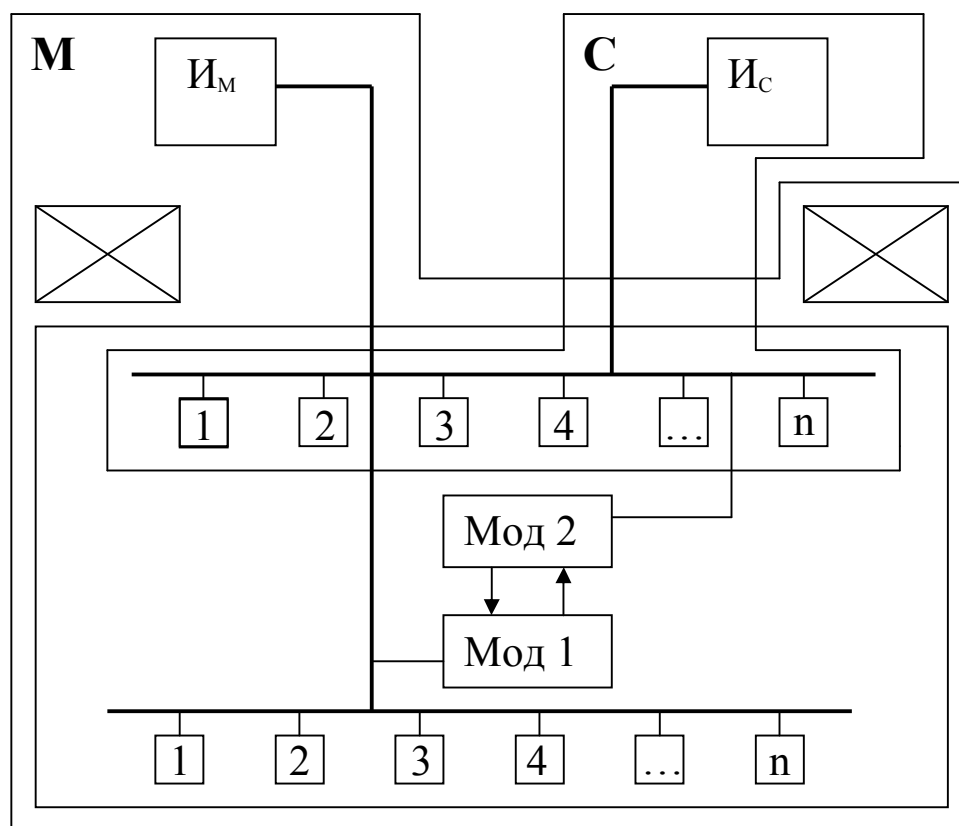


Рис. 1. Структурная схема мехатронного модуля:  
1, 2, 3... n – периферийные устройства

Предлагаемая последовательность решения задачи:

- выполняется декомпозиция множества полного состава функциональных требований на подмножества по функциональной ориентации (управления, контроля, блокировок и т.п.) и отнесение функциональных требований к системе управления или к мехатронному модулю;
- формируется набор функциональных операторов, необходимых для синтеза структуры системы;
- формируются функциональные модули системы, реализующие конечный набор функций определенного уровня;
- формируются конструктивные модули системы.

Полный состав функциональных требований, определяемых "Правилами безопасности", нормативно-технической документацией, требованиями со стороны эксплуатации, предложениями разработчиков, представляет собой множество  $T$ , которое необходимо распределить между мехатронным модулем и системой управления:

$$T = \{T^M, T^C\}.$$

Процедура декомпозиции множества требований на подмножества  $T^M$  и  $T^C$  является наиболее ответственным и трудоемким этапом в процессе проектирования, т.к. она определяет структуру системы управления, а, следовательно, ее надежность, стоимостные, эксплуатационные, технологические и др. важные свойства. Наиболее оправданной представляется структура, при которой информационная компонента мехатронного модуля ( $I_M$ ) выполняет полный состав функциональных требований и через собственный интерфейс связана с периферийными устройствами, входящими в состав системы управления ( $I_C$ ). Однако реализовать на практике такой подход зачастую невозможно из-за ограничений по габаритам, встраиваемых в мехатронные объекты элементов систем управления, недостаточной искробезопасной мощности существующих источников питания при сравнительно большой мощности, потребляемой известными микроконтроллерами, ограниченной скоростью передачи информации по существующим линиям связи и т.п. В связи с тем, что в настоящее время формальные способы такой декомпозиции находятся в стадии разработки, эта задача решается эвристическим методом с присущими ему достоинствами и недостатками.

Учитывая сказанное, изложим суть подхода. Все элементы множества требований  $T^M$  разделим на подмножества по функциональной ориентации. Полный функциональный вектор мехатронного модуля:

$$T^M = \{t_y^M, t_k^M, t_b^M, t_c^M, t_i^M, \dots\},$$

где  $t_y^M, t_k^M, t_b^M, t_c^M, t_i^M \dots$  - подмножества функций соответственно: управления, контроля, блокировки, сигнализации, информации и др.

Каждое подмножество состоит из единичных функциональных операторов  $\tau$ :

$$t_y^M = \{\tau_{y1}^M, \dots, \tau_{yz}^M\}$$

$$t_k^M = \{\tau_{k1}^M, \dots, \tau_{ky}^M\}$$

$$t_i^M = \{\tau_{i1}^M, \dots, \tau_{iu}^M\}$$

...

Полный функциональный вектор для системы управления:

$$T^C = \{t_y^C, t_k^C, t_b^C, t_c^C, t_i^C, \dots\}$$

и подмножества функциональных операторов:

$$t_y^C = \{\tau_{y1}^C, \dots, \tau_{yz}^C\}$$

$$t_k^C = \{\tau_{k1}^C, \dots, \tau_{ky}^C\}$$

$$t_i^C = \{\tau_{i1}^C, \dots, \tau_{iu}^C\}$$

...

В табл. 1 представлена таблица соответствия (смежности) множеств функциональных требований объекта управления и системы управления. Функциональные операторы, составляющие множество требований, характеризуются наличием или отсутствием необходимости реализации в объекте или системе управления. Если  $i$ -е требование подлежит реализации, то оператор  $\tau=1$ , в противном случае  $\tau=0$ . Множество единичных операторов представляет собой функциональный вектор.

На основании табл. 1 запишем матрицу генерального функционального вектора для совокупности: мехатронный модуль - система управления ( $M+C$ ):

$$T = \begin{pmatrix} \tau_{y1}^M & \dots & \tau_{yz}^M & \tau_{y1}^C & \dots & \tau_{yz}^C \\ \tau_{kl}^M & \dots & \tau_{ky}^M & \tau_{kl}^C & \dots & \tau_{ky}^C \\ \tau_{\delta 1}^M & \dots & \tau_{\delta x}^M & \tau_{\delta 1}^C & \dots & \tau_{\delta x}^C \\ \tau_{cl}^M & \dots & \tau_{cl}^M & \tau_{cl}^C & \dots & \tau_{cl}^C \\ \tau_{ил}^M & \dots & \tau_{иш}^M & \tau_{ил}^C & \dots & \tau_{иш}^C \\ \dots & & & & & \end{pmatrix} R^{|M+C|} \quad (1)$$

Используя матрицу (1), запишем выражения полного вектора функциональных требований  $T^M$  для мехатронного объекта (M) и для  $T^C$  системы управления (C).

Таблица 1

Таблица смежности

Множество функциональных операторов	Реализация функциональных операторов	
	Мехатронный объект (M)	Система управления (C)
По управлению: $\tau_{y1}^M \dots \tau_{yz}^M$ $\tau_{y1}^C \dots \tau_{yz}^C$	1 0	0 1
По контролю: $\tau_{kl}^M \dots \tau_{ky}^M$ $\tau_{kl}^C \dots \tau_{ky}^C$	1 0	0 1
По блокировкам: $\tau_{\delta 1}^M \dots \tau_{\delta x}^M$ $\tau_{\delta 1}^C \dots \tau_{\delta x}^C$	1 0	0 1
По сигнализации: $\tau_{cl}^M \dots \tau_{cl}^M$ $\tau_{cl}^C \dots \tau_{cl}^C$	0 0	1 1
По информации: $\tau_{ил}^M \dots \tau_{иш}^M$ $\tau_{ил}^C \dots \tau_{иш}^C$	0 0	1 1

и т.д. по всем функциональным требованиям.

$$T^M = \begin{pmatrix} \tau_{y1}^M & \dots & \tau_{yz}^M \\ \tau_{kl}^M & \dots & \tau_{ky}^M \\ \tau_{\delta 1}^M & \dots & \tau_{\delta x}^M \\ \tau_{cl}^M & \dots & \tau_{cl}^M \\ \tau_{ил}^M & \dots & \tau_{иш}^M \\ \dots & & \end{pmatrix} R^{|M|} \quad (2)$$

$$T^c = \begin{pmatrix} \tau_{y1}^c & \dots & \tau_{yz}^c \\ \tau_{k1}^c & \dots & \tau_{ky}^c \\ \tau_{b1}^c & \dots & \tau_{bx}^c \\ \tau_{c1}^c & \dots & \tau_{cl}^c \\ \tau_{и1}^c & \dots & \tau_{иu}^c \\ \dots & & \dots \end{pmatrix} R|C| \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) представляют собой функциональные модули (ФМ) для интеллектуальной компоненты М и С, т.е. это множества функциональных требований, подлежащих реализации в составе мехатронного объекта ( $T^M$ ) и системы управления ( $T^C$ ).

Следующий этап проектирования состоит в определении состава конструктивных модулей (КМ) системы, каждый из которых реализует конечный набор функций определенного уровня и представляет собой функционально законченный элемент системы с отдельной конструктивной оболочкой. Основой для построения КМ являются один или несколько функциональных векторов, входящие в состав ФМ.

Формирование КМ осуществляется на основе агрегативно-декомпозиционного подхода, причем на начальных стадиях проектирования важно определить стратегию разработки конструктивов субблоков и оболочек, элементную базу, виды взрывозащиты и т.п.

Примем, что технической реализацией функционального вектора является субблок, характеризующийся площадью печатной платы  $S_{сб}$  и объемом  $V_{сб}$ , которые определяются через удельные показатели, устанавливаемые статистическими исследованиями: площадь печатной платы  $S_{\tau}$  и объем оболочки  $V_{\tau}$ , приходящиеся на один функциональный оператор ( $\tau$ ). Эти величины будут различными для устройств, основанных на аналоговом и цифровом способе обработки информации (для устройств на микропроцессорной и жесткой логике).

Требуемая площадь печатных плат для векторов (субблоков):

$$S_y = S_{\tau} \cdot f; \quad t_y = (\tau_{y1}, \dots, \tau_{yf})$$

$$S_k = S_{\tau} \cdot g; \quad t_k = (\tau_{k1}, \dots, \tau_{kg})$$

$$S_b = S_{\tau} \cdot h; \quad t_b = (\tau_{b1}, \dots, \tau_{bh})$$

$$S_c = S_{\tau} \cdot j; \quad t_c = (\tau_{c1}, \dots, \tau_{cj})$$

$$S_{и} = S_{\tau} \cdot b; \quad t_{и} = (\tau_{и1}, \dots, \tau_{иb}),$$

где  $f, g, h, j, b$  - количество функциональных операторов  $\tau$  в векторах.

$$S_{сб} = S_y + S_k + S_b + S_c + S_{и}$$

Возможности размещения технических средств реализации функционального вектора на выбранной печатной плате оцениваются путем сравнения  $S_{сб}$  и  $S_{ст}$  (площадь печатной платы, принятая из стандартов), т.е. должно выполняться условие:

$$S_{сб} \leq S_{ст}.$$

При формировании КМ в оболочках необходимо предусматривать специальные объемы под элементы, определяющие взрывозащиту (взрывозащищенная обо-

лочка или искробезопасное исполнение) -  $V_3$ . Нужно учитывать также и то, что объем модуля в значительной степени определяется устройствами сопряжения, в т.ч. гальванической развязки, входных сигналов, которые в силу ряда специфических требований (работа в условиях больших утечек, наличие большого количества точек контроля, распределенных на больших длинах, искробезопасность исполнения длинных линий связи, наличие достаточно высокого уровня помех различного характера, необходимость организации централизованного питания пунктов отбора информации, распределенных на больших длинах, невозможность использования многопроводных линий связи и т.п.) обладают заметными габаритами -  $V_{yc}$ .

Объем, занимаемый векторами различной функциональной ориентации:

$$\begin{aligned} V_y &= V_\tau \cdot f; \\ V_k &= V_\tau \cdot g; \\ V_b &= V_\tau \cdot h; \\ V_c &= V_\tau \cdot j; \\ V_n &= V_\tau \cdot b \end{aligned}$$

Возможности размещения технических средств реализации функциональных векторов, входящих в КМ, в выбранном объеме оцениваются путем сравнения требуемого объема  $V$  оболочки модуля и  $V_\Pi$ :

$$V = V_\tau (f + g + h + j + b) + V_3 + V_{yc} \leq V_\Pi, \quad (4)$$

где  $V_\Pi$  - известные предельные объемы конструктивных оболочек с учетом вида взрывозащиты, эргономики и т.п.

Агрегатирование должно учитывать также и условия искробезопасности источников питания. На основе статистических данных необходимо определить уровень искробезопасной мощности  $Q_\tau$ , требуемой для реализации одного функционального оператора.

Мощность, необходимая для реализации функциональных векторов:

$$\begin{aligned} Q_y &= Q_\tau \cdot f; \\ Q_k &= Q_\tau \cdot g; \\ Q_b &= Q_\tau \cdot h; \\ Q_c &= Q_\tau \cdot j; \\ Q_n &= Q_\tau \cdot b \end{aligned}$$

В настоящее время известны технически достижимые величины искробезопасной мощности:  $Q_\Pi \leq 60$  Вт.

Мощность источника питания:

$$Q = Q_y + Q_k + Q_b + Q_c + Q_n \quad (5)$$

При выполнении условия:

$$Q \leq Q_\Pi \quad (6)$$

ФМ совпадает с КМ и не подлежит разрыву. В противном случае необходимо переходить с вида защиты "искробезопасная цепь" на "взрывонепроницаемая оболочка". Последнее исполнение проигрывает по массе и габаритам, но применимо в таких случаях. Возможен вариант и комбинированного исполнения, при котором часть функциональных векторов реализуется в «искробезопасном» конструктивном исполнении и часть – во «взрывозащищенном».

Если условия (4), (5) и (6) не выполняются, то декомпозицию ФМ необходимо производить с учетом наименьших связей между векторами, составляющими ФМ. Для определения места наименьших связей представим ФМ в виде ориентированного графа, который определяется как пара множеств:

$$G = (M, V),$$

где  $M$  - множество вершин, представляющих собой функциональные векторы;  $V$  - множество дуг, соединяющих эти вершины и представляющих собой связи между функциональными векторами.

Рассмотрим пример функционального модуля из шести функциональных векторов (рис. 2): управления  $t_y$ , контроля  $t_k$ , блокировки  $t_b$ , сигнализации и связи  $t_c$ , информации  $t_{и}$ , входных устройств  $t_{в\у}$ .

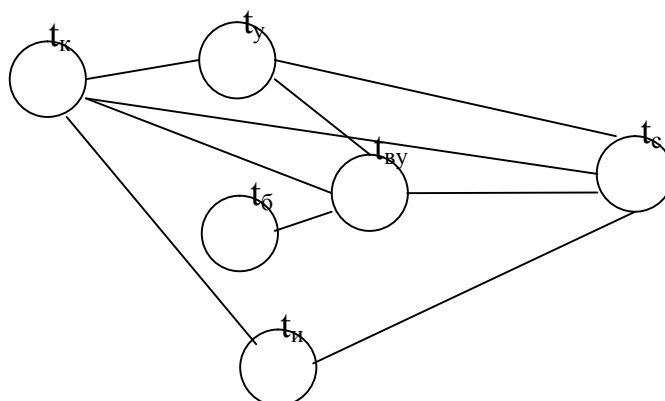


Рис. 2. Исходный граф ФМ

Для определения места наименьших связей между векторами составим таблицу смежности, предложенную проф. Борисовым А.А. В таблице представлены взаимосвязи между функциональными векторами, составляющими ФМ: «1» соответствует наличию связи, «0» - ее отсутствию.

Таблица 2

Таблица смежности

j/i	$t_y$	$t_k$	$t_b$	$t_c$	$t_{и}$	$t_{в\у}$
$t_y$	0	1	0	1	0	1
$t_k$	1	0	0	1	1	1
$t_b$	0	0	0	0	0	1
$t_c$	1	1	0	0	1	1
$t_{и}$	0	1	0	1	0	0
$t_{в\у}$	1	1	1	1	0	0

$j, i$  - вершины графа.

Таким образом, при проектировании системы, прежде всего, следует определить количество конструктивных единиц, на которое необходимо разделить ФМ в соответствии с приведенными ограничениями и используя статистические величины  $S_\tau$  и  $V_\tau$ . Предположим, рассматриваемый ФМ следует

разделить на два КМ. В данном случае существует 31 вариант разделения, где число связей колеблется от 1 до 7. На рис. 3 приведено несколько вариантов агрегатирования ( $v$ - количество связей).

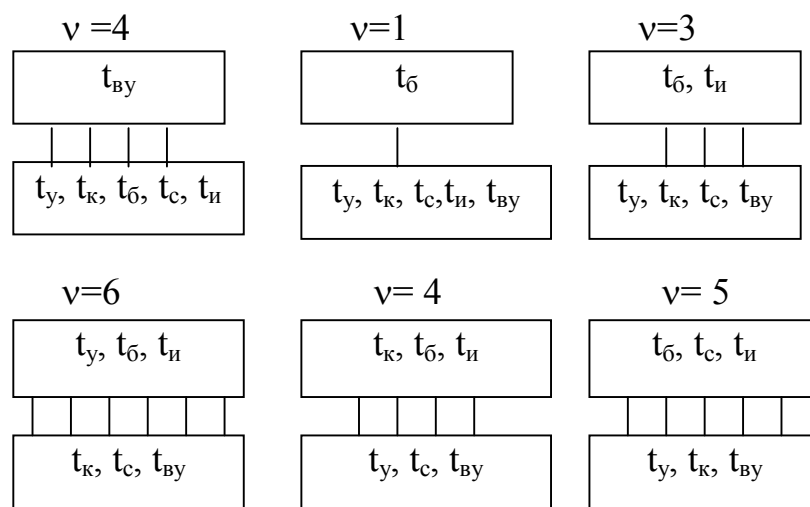


Рис. 3. Варианты агрегатирования ФМ

Поиск оптимального варианта агрегатирования производится на основании разработанного алгоритма при использовании методов комбинаторики. Для решения задачи поиска оптимального построения всей системы комплекса технических средств алгоритм предусматривает рассмотрение всех вариантов построения структур и учитываются все ФМ, принадлежащие той или иной структуре. В таком случае будут учтены связи не только внутри ФМ, но и внутри структуры.

При декомпозиции ФМ необходимо учитывать и пространственное размещение модулей относительно объекта автоматизации. Это условие представляется весьма важным, например, для конвейеров и конвейерных линий, имеющих значительную пространственную распределенность.

Важным вопросом, возникающим при разработке КМ, является выбор элементной базы. В настоящее время, как известно, может быть применена микропроцессорная элементная база и жесткая логика. Контроллер имеет неизменную структуру и аппаратную реализацию при переменном программном обеспечении. В то же время при решении этих задач на жесткой логике переменной будет аппаратная часть. С учетом этого, на стадии разработки алгоритмов реализации ФМ с учетом затратных критериев, требуемого быстродействия, искробезопасного исполнения и т.п., необходимо выбрать элементную базу. Необходимо разработать критерий выбора соотношения между программными и аппаратными средствами, реализующими функциональные векторы. Один из вариантов определения оптимального соотношения - через затраты для одного и другого способа реализации.

Необходимо определить предельный объем информации, который можно обработать на известных контроллерах. При обработке информации различными способами затраты будут различными. Сравнение вариантов необходимо производить на стадии, предшествующей разработке рабочей документации, например, на стадии разработки алгоритма.



В этом вопросе необходимо тщательно проработать задание исходных данных. Традиционно функциональные требования задаются в виде функциональных операторов, которые не дают возможности оценить ни аппаратные, ни программные затраты для их реализации. Один из вариантов - усредненные показатели, полученные через статистические исследования.

Важной задачей, стоящей перед разработчиком, является обеспечение необходимой надежности. Это достигается за счет выбора оптимальных режимов загрузки элементов, обеспечения гальванической развязки, резервирования отдельных элементов и узлов, а также применения специальных алгоритмов и программных решений. При этом отказ какой-либо подсистемы или совокупности подсистем не всегда приводит к отказу всей системы, а иногда только снижает эффективность ее функционирования. Данное свойство большой системы обусловлено структурной и информационной избыточностью (резервирование элементов и избытком обрабатываемых кодов).

В связи с этим при определении функциональной ориентации КМ необходимо выявить функции, подлежащие резервированию. Резервировать целесообразно функции, определяющие безопасность и живучесть, т.е. функции безопасности и жизненно важные по управлению должны быть сохранены при работе объекта автоматизации, а, например, сервисные функции на некоторое время могут быть потеряны.

Данный подход в значительной степени использовался при создании систем автоматизации очистных и проходческих комбайнов, скребковых и ленточных конвейеров, а также ряда вспомогательного оборудования, выпускаемого машиностроительными заводами Украины.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Предложенный подход к проектированию средств автоматизации, позволил создать ряд систем, в т. ч. аппаратуру автоматизации конвейерного транспорта, реализующую гибкую структуру, в максимальной степени учитывающую многообразие объектов управления. В дальнейшем необходимо продолжить работу в направлении формализации изложенного метода.

#### Список литературы

1. Косарев В.В., Стадник Н.И., Косарев И.В., Мизин В.А., Приседский Е.В. Новое горно-шахтное оборудование для технического переоснащения угольных шахт // Уголь Украины.- 2007.- № 2.
2. Стадник Н. И., Бойко Г. Г., Рябченко А. С. Очистные комбайны УКД200 и УКД300 для эффективной отработки тонких пластов // Уголь Украины.- 2003.- № 9.
3. Костюков В.М., Сошенко И. Н. Высокопроизводительные очистные комбайны нового поколения КДК500 и КДК700 для пластов мощностью 1,35-4,3 м // Уголь Украины.- 2003.- № 9.
4. Андреев Г. В., Косарев И. В., Лелека И. Т., Довженко В. И. Скребковые конвейеры нового технического уровня // Уголь Украины.- 2003.- № 9.
5. Стадник Н.И., Ткачев В.В., Мезников А.В. Управление двухскоростными скребковыми конвейерами - Науково-технічний збірник "Гірнична електротехніка та автоматика". Випуск № 75. – Дніпропетровск, 2005. - С.62-68.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Ткачевим В.В.  
Надійшла до редакції 10.10.2012*