Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XX, вып. 1, 1976 г.

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ГЛАВНЫЙ ПРИВОД УГОЛЬНЫХ КОМБАЙНОВ ПО СХЕМЕ ТНПЧ-АД

Ю.П.ПАВЛОВ, В.В.РУДАКОВ,
В.С.СОЛОВЬЕВ, Я.П.ГРИНБЕРГ

Повышение производительности труда на шахтах и улучшение условий труда горняков привело к широкому внедрению добычных комплексов с горными комбайнами. Для обеспечения высокой эффективности работы в различных условиях горные комбайны должны иметь регулирование скоростей подачи $v_п$ и резания $v_р$. При таком регулировании возможны следующие варианты: 1) изменение скорости подачи при неизменной скорости резания (минимальный вариант); 2) изменение скорости резания при неизменной скорости подачи; 3) согласованное изменение скорости резания и подачи (параметрическая стабилизация); 4) регулирование скоростей резания и подачи с поддержанием их оптимального соотношения (максимальный вариант). В эксплуатируемых горных комбайнах привод резания осуществляется в механо-регулируемом варианте с нерегулируемым асинхронным электродвигателем, а привод подачи – в стабилизированном по скорости варианте авторегулируемого гидропривода.

Скорость резания может изменяться перестановкой колес в редукторе комбайна в пределах $(0,8 \div 1,2) v_{р_н}$ при $v_п = const$, т.е. движение такого комбайна приближается к варианту параметрической стабилизации.

Замена механического ступенчатого регулирования скорости привода резания бесступенчатым регулируемым приводом позволяет лучше реализовать вариант движения комбайна со стабилизацией соотношения скоростей резания и подачи, а также апробировать различные регуляторы для оптимального (максимального) варианта управления работой комбайнов. Требование максимальной мощности двигателя привода резания в ограниченном габарите комбайна делает наиболее перспективным для горных комбайнов частотно-регулируемый привод с асинхронным к.з. двигателем и тиристорным преобразователем частоты (рис.1). При переходе от привода с нерегулируемым асинхронным двигателем к частотно-регулируемому приводу с асинхронным двигателем редуктор $Р$ со сменными колесами ($i = var$) заменяется более простым и надежным с постоянным передаточным числом ($i = const$), а малонадежный контактный магнитный пускатель МП с кнопочной станцией управления КУ заменяется тиристорным бестрансформаторным непосредственным преобразователем частоты ТНПЧ и бесконтактным (сельсинным) командоаппаратом

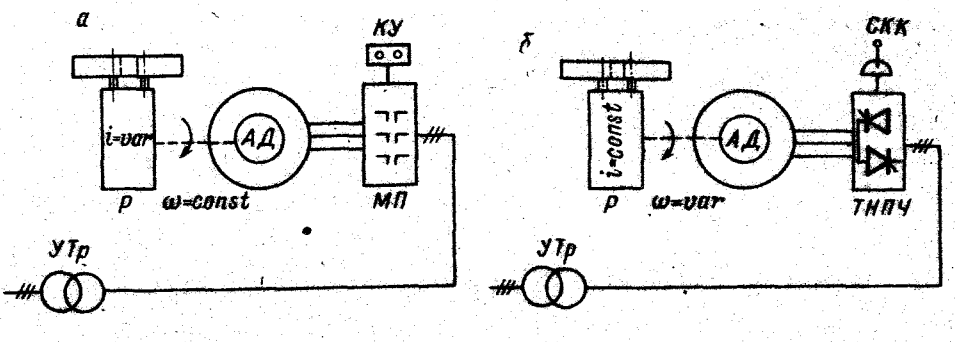


Рис.1. *Электрическая схема частотно-регулируемого привода механизма резания комбайна с различным управлением: а – контакторным; б – с ТНПЧ*

СКК. В целом габарит установки может несколько увеличиться за счет большего по сравнению с магнитным пускателем размера тиристорного преобразователя ТНПЧ. Однако при повышенной частоте питания габарит двигателя (при сохранении той же мощности) может быть уменьшен; это приведет в новых конструкциях к снижению габаритов комбайна в целом.

При питании асинхронных двигателей от регулируемых частотных преобразователей целесообразно использовать круглый паз и медную стержневую обмотку ротора, так как в зоне механических характеристик за опрокидыванием работа не производится. Кроме того, в этом случае представляется возможным при работе от типовой сети с частотой 50 Гц использовать двигатель на повышенной, оптимальной частоте, которую дает частотный преобразователь. Наиболее полные исследования по оптимальной частоте для асинхронных двигателей проведены Г.И.Китаенко [2], который для сравнения весо-габаритных характеристик асинхронных двигателей при выполнении их на различные частоты и число пар полюсов дает оценку по двум коэффициентам:

а) активных размеров V_A

$$K_V = \frac{P_н^{3/4}}{V_A};$$

б) веса активных материалов G_A

$$K_A = \frac{P_н^{3/4}}{G_A}.$$

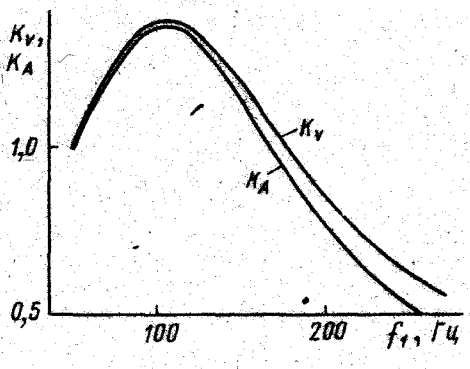


Рис.2. Изменение K_V и K_A в зависимости от частоты питающей сети при скорости вращения АД, равной 3000 об/мин

Из рис.2 видно, что $K_V = K_A = 1$ при $f_1 = 50$ Гц. Максимальное значение этих коэффициентов, равное 1,4, получается при частоте питающего напряжения $f_1 \approx 100$ Гц. Следовательно,

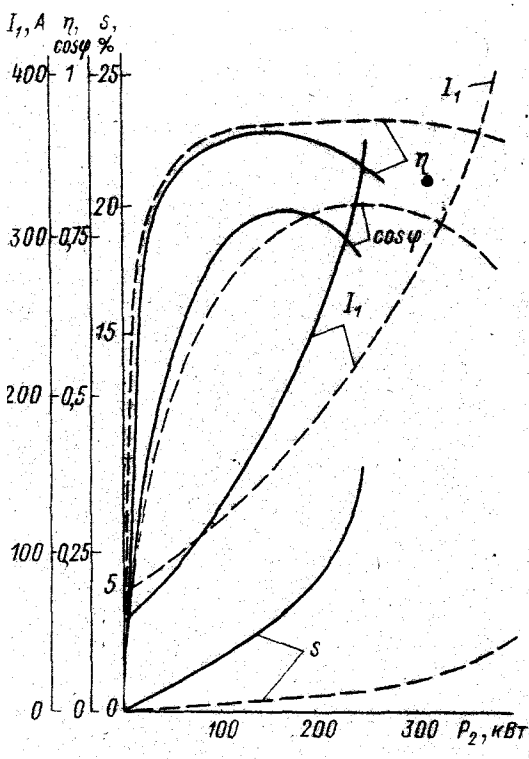


Рис.3. Рабочие характеристики двигателя ЭДКО4-4М и двигателя, пересчитанного на 75 Гц при 500 В, того же габарита

при переходе на номинальную частоту 100 Гц мощность асинхронного двигателя при n = 3000 об/мин может быть повышена на 60%. Действительно, при сохранении активных размеров $P_{100} = (1,4)^{4/3} P_{50}$, или $P_{100} \approx 1,6\, P_{50}$.

В серийно выпускаемых горных комбайнах при практической реализации частотно-регулируемых приводов на базе типового двигателя ЭДКО4-4М номинальная частота питания для сохранения штампа статора асинхронного двигателя может быть повышена до 75 Гц. В этом случае синхронная скорость вращения двигателя составит 2250 об/мин. При пересчете двигателя ЭДКО4-4М на частоту 75 Гц было принято условие минимального изменения статора и его обмотки с изготовлением нового пакета ротора с круглым пазом и медной стержневой обмоткой. В расчете пакета статора использовалась сталь марки Э-42, пакета ротора - марки Э-330. Сравнительные данные (рис.3) двигателя ЭДКО4-4М в нерегулируемом (частота 50 Гц) и регулируемом (частота 75 Гц) вариантах:

	f = 50 Гц	f = 75 Гц
Мощность, кВт	80	124
Скорость вращения, об/мин	1475	2245
Напряжение фазное, В	380	500[x]
Номинальный ток, А	110	132,5
$M_{max}/M_н$	3,37	3,38
КПД, %	89	92,5
$\cos\varphi_н$	0,68	0,71

[x] Принято исходя из возможного снижения напряжения в участковой сети на 20% при номинальном напряжении 660 В.

Работа приводов механизма резания горных комбайнов характеризуется нестационарным изменением нагрузки [I]. При асинхронном приводе это ведет к резко переменному коэффициенту мощности и характеру нагружения тиристорного преобразователя. Поэтому для горных комбайнов наиболее при-

емлемы тиристорные преобразователи частоты непосредственного типа, позволяющие нормально работать даже на чисто реактивную нагрузку. Ограничением для ТНПЧ, как известно, является уровень выходной частоты, который при естественной коммутации не может быть более $0,5 f_1$. Для снятия этого ограничения в ТНПЧ применен блок принудительной коммутации, благодаря которому уровень выходной частоты ТПЧ можно расширить до $3 f_1$. В качестве выключающего элемента блока принудительной коммутации используется группа из трех коммутирующих конденсаторов, соединенных звездой и подключенных каждая к своей фазе питающего напряжения. Такое коммутирующее устройство позволяет надежно выключить силовые группы тиристоров в группе независимо от того, какой тиристор в группе работал последним.

Коммутирующее устройство функционирует только в конце полупериода выходного напряжения. Внутри полупериода ток между силовыми тиристорами коммутируется естественным путем. Для устойчивой принудительной коммутации коммутирующие емкости заряжаются от отдельных источников постоянного тока. Это позволяет регулировать напряжение выходной частоты со стороны силовых групп тиристоров, а не коммутирующих устройств, что значительно снижает мощность и габариты элементов коммутирующего устройства.

В схеме преобразования ТНПЧ-ПК (рис.4) к трехфазной сети f_1 = 50 Гц подключены три анодных и три катодных группы силовых тиристоров. Каждая фаза выходного напряжения создается одной анодной и одной катодной группой тиристоров (I–IУ; II–У; III–УI). Группы силовых тиристоров через симисторы ВI–ВЗ присоединены к коммутирующему устройству КУ, состоящему из группы коммутирующих емкостей $C_к$, коммутирующей индуктивности $L_к$, зарядной индуктивности $L_з$, источников постоянного тока ИП1, ИП2 и зарядных тиристоров $Т_{зр1}$ и $Т_{зр2}$. К каждой фазе выходного напряжения через диодный мост Д подключены группы тиристоров УП и УШ обратного тиристорного моста. В процессе формирования положительных полупериодов выходного напряжения подаются импульсы управления на катодные группы тиристоров, а при формировании отрицательных полупериодов – на анодные. Выходное

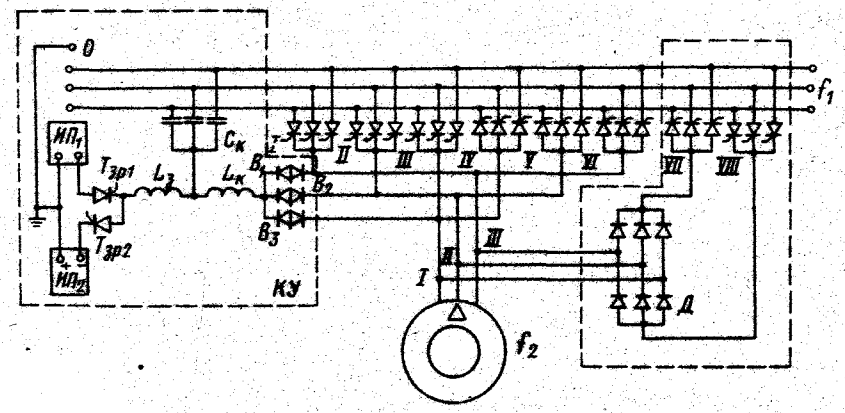


Рис.4. Схема ТНПЧ-ПК

напряжение изменяется фазосмещением импульсов управления на тиристорах силовых групп относительно первичного напряжения. За время перерыва $\varphi_{п}$ происходит восстановление запирающих свойств тиристоров после их выключения.

Одновременно с началом положительных полупериодов выходного напряжения подаются импульсы управления на зарядный тиристор $T_{ЗР1}$, а с началом отрицательных полупериодов – на зарядный тиристор $T_{ЗР2}$. При этом обеспечивается заряд коммутирующих емкостей $C_{К}$ до постоянной составляющей напряжения коммутации от ИП1 и ИП2. Одновременно с окончанием положительных полупериодов выходного напряжения подаются импульсы управления на коммутирующий симистор той катодной группы, с которой снимаются в данный момент импульсы управления. Коммутирующие емкости $C_{К}$, заряженные в период подготовки к коммутации от источника ИП1, подключаются через $L_{К}$ параллельно катодным силовым группам вентилей и выключают их. Формирование положительного полупериода выходного напряжения закончено. Аналогично выключаются и анодные группы силовых тиристоров. Группа конденсаторов $C_{К}$, заряженная в период подготовки к коммутации от ИП2, подключается параллельно анодным группам в конце отрицательных полупериодов выходного напряжения через В1–В3 и выключает эти группы. Формирование отрицательной полуволны периода выходного напряжения закончено.

Для освобождения коммутирующих емкостей от функции компенсации реактивной мощности нагрузки, ограничения возможности конденсаторного самовозбуждения и осуществления генераторного режима работы асинхронной машины в ТНПЧ-ПК предусмотрен обратный тиристорный мост.

Параметры силового и коммутирующего блоков преобразователя применительно к приводу угольного комбайна типа К-50:

Коммутирующая емкость, Ф	$72 \cdot 10^{-6}$
Коммутирующая индуктивность, Г	$28{,}3 \cdot 10^{-6}$
Зарядная индуктивность, Г	$11{,}4 \cdot 10^{-6}$
Мощность источника постоянного тока, Вт	1280
Силовые тиристоры	В каждом плече три последовательно соединенных типа ТЛ-250-8
Зарядные тиристоры	Три последовательно соединенных типа ВКДУ-50-10
Разрядные симисторы	В каждом плече два последовательно соединенных типа ВКДУС-100-8

При расчете параметров ТНПЧ-ПК использовалась методика, предложенная ранее [4].

Важнейший технико-экономический показатель преобразователей частоты – их надежность. При оценке надежности рассматриваемого типа ТНПЧ-ПК для привода угольного комбайна по методике А.Е.Козярука [3] предполагалось, что отказ силовой части преобразователя происходит при отказе любого тиристора, т.е. отсутствует защита (см. таблицу). Отказ тиристора происхо-

Расчет надежности силовой части ТНПЧ-ПК

Элемент	Число элементов	Интенсивность отказов, 1/ч		
		элемента	элементов	блока
Силовой тиристорный блок				
Тиристор	18·3	$1 \cdot 10^{-5}$	$54 \cdot 10^{-5}$	$54 \cdot 10^{-5}$
Коммутирующий блок				
Разрядный симистор	3·3	$1 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$15{,}5 \cdot 10^{-5}$
Конденсатор (мощный)	3	$0{,}14 \cdot 10^{-5}$	$0{,}42 \cdot 10^{-5}$	
Дроссель	2	$0{,}04 \cdot 10^{-5}$	$0{,}08 \cdot 10^{-5}$	
Зарядный тиристор	2·3	$1 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	
Обратный тиристорный и диодный мосты				
Тиристор	6·3	$1 \cdot 10^{-5}$	$18 \cdot 10^{-5}$	$21{,}6 \cdot 10^{-5}$
Диод (мощный)	6·2	$0{,}3 \cdot 10^{-5}$	$3{,}6 \cdot 10^{-6}$	

дит только за счет его собственной ненадежности. Суммируя значения коэффициентов интенсивностей отказов элементов силовой части, получим

$$\lambda_{сч} = 91{,}1 \cdot 10^{-5} \ \text{1/ч}.$$

Вероятность $P_{сч}$ и среднее время $T_{сч}$ безотказной работы силовой части при расчете составили соответственно 0,999159 на один час и 1096 ч.

Надежность системы управления рассчитывалась поблочно. С учетом применения преобразователя в приводе ТНПЧ-ПК-АД системы векторного управления отпадает необходимость в блоках задающего генератора, пересчетного устройства и дешифратора. Для сокращения расчетов предполагалось, что отказ любого элемента блока приводит к отказу всего блока, а отказ любого блока приводит к отказу всей системы управления. Анализ работы отдельных блоков системы управления показывает, что такое предположение правомочно. В каждом конкретном случае режимы работы элементов различны, поэтому при расчетах не учитывались изменения λ-характеристик элементов в зависимости от температурных и электрических режимов. В результате оценки надежности установлена следующая интенсивность отказов блоков, 1/ч:

Формирования коммутирующих импульсов (БФКИ)	$23{,}4 \cdot 10^{-6}$
Смесительного устройства (БСУ)	$27{,}56 \cdot 10^{-6}$
Питания (БП)	$14 \cdot 10^{-6}$
Фазового управления выпрямительного и инверторного режимов ($БФУ_{в.р}$ и $БФУ_{и.р}$)	$35{,}28 \cdot 10^{-6}$
Сеточных трансформаторов	$52{,}5 \cdot 10^{-6}$

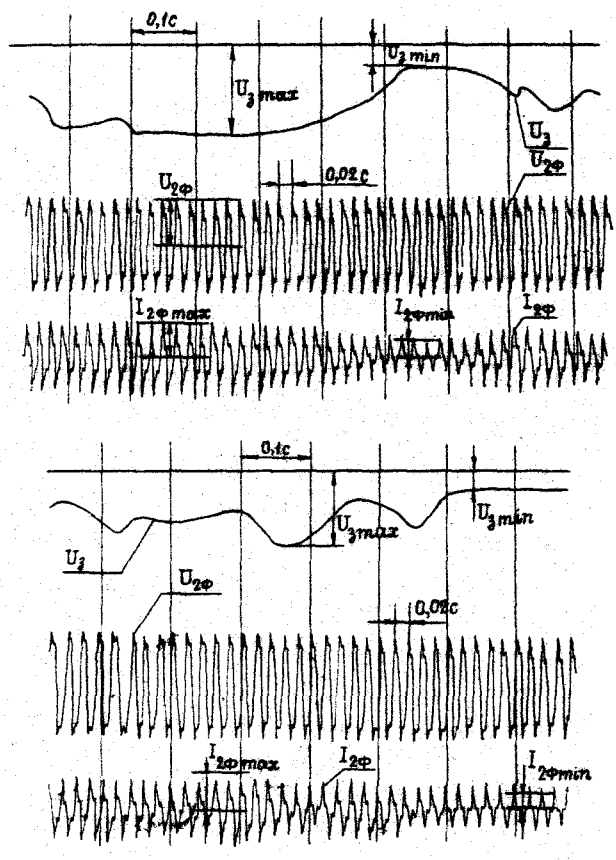


Рис.5. Реализации отработки ТНПЧ-ПК случайного задающего сигнала

Поскольку в систему управления ТНПЧ-ПК входит по одному специализированному блоку, ее надежность

$$\lambda_{с.у} = 143{,}5 \cdot 10^{-6} \ 1/ч.$$

Для системы управления вероятность безотказной работы в течение одного часа $P_{с.у} = 0{,}999856$, а $T_{с.у} = 6969$ ч.

На рис.5 приведены результаты экспериментальных исследований работы системы ТНПЧ-ПК-АД на резко переменную нестационарную нагрузку, характерную для приводов угольных комбайнов. В качестве АД был принят двигатель типа АО-2-51-6 мощностью 5 кВт. Нагрузкой АД служила машина постоянного тока типа ПБСТ, работающая в качестве генератора на реверсивный вентильный управляемый выпрямитель (ВУВ). На осциллограммах показаны задающее напряжение $U_з$, которое поступает с выхода генератора случайных сигналов и отрабатывается в системах ВУВ-ПБСТ в виде тока асинхронной машины $I_{2Ф}$ при фазном напряжении $U_{2Ф}$. Из осциллограмм видно, что регулируемый привод по схеме ТНПЧ-ПК-АД обеспечивает высокую перегрузку и нормальную работу при реальной нестационарной нагрузке.

Выводы

1. Для совершенствования работы горных комбайнов целесообразно заменить типовой привод с нерегулируемым АД и механическим ступенчатым регулированием скорости резания частотно-регулируемым приводом с АД при жестком механическом редукторе.

2. Повышение номинальной частоты питания асинхронного двигателя до 75-100 Гц в частотно-регулируемом приводе резания дает возможность лучше использовать габарит двигателя.

3. Наиболее рациональным типом тиристорного преобразователя для АД привода резания комбайна является бестрансформаторный ТНПЧ с блоком принудительной коммутации.

4. Замена нерегулируемого привода с магнитным пускателем регулируемым типа ТНПЧ-ПК-АД позволяет наряду с широкими возможностями автоматизации управления обеспечить повышенную надежность привода в эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Докукин А.В., Красников Ю.Д., Хургин З.Я. Динамические процессы горных машин. М., „Наука", 1972.

2. Китаенко Г.И. Судовые электроэнергетические системы повышенных параметров. Л., „Судостроение", 1970.

3. Козярук А.Е. Вопросы надежности преобразователей частоты. Изд. ЛДНТП, 1968.

4. Павлов Ю.П. Тиристорный непосредственный преобразователь частоты с принудительной коммутацией. Изд. ЛДНТП, 1973.