

## НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ (ПРЯМОЙ) ЭЛЕКТРОПРИВОД ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА РОТОРНОГО ЭКСКАВАТОРА

Карась С.В., Донецкий государственный технический университет, Украина;  
Сарапулов Ф.Н., Уральский государственный технический университет, Россия;  
Шымчак П., Институт электротехники «Щецинская политехника», Польша  
gleb@elf.dgtu.donetsk.ua

*The construction peculiarities, operation principle and work modes of executive organ (rotor wheel) of wheel excavator and its electric drive is considering. The alternative module variable-frequency linear asynchronous electric drive attached to disposition of its linear induction motors inside of rotor wheel was offered.*

Производительность горнодобывающего комплекса, в состав которого входит роторный экскаватор, определяется производительностью его исполнительного органа (ИО) – роторного колеса, которое обеспечивает выполнение основной технологической операции – разрушение и подачу горной массы на сопряженные с роторным экскаватором технологические системы для дальнейшей ее транспортировки (ж. д. транспорт, система ленточных конвейеров, транспорт конвейерными поездами). Разрушение и подача горной массы в транспортную систему носит поточный характер [1].

Особенность конструкции и принципа действия, специфические условия и режимы работы роторных экскаваторов, особенности эксплуатации электрооборудования предопределили необходимость дальнейшего совершенствования как самих роторных экскаваторов, так и электропривода (ЭП) роторного колеса. Это в итоге призвано привести к повышению надежности работы экскаваторов, его электрооборудования, улучшению массогабаритных показателей, снижению затрат на обслуживание [1 – 3].

В настоящее время в главных ЭП роторных экскаваторов используются в основном системы генератор – двигатель (Г–Д) и тиристорный реверсивный преобразователь – двигатель (ТП–Д) постоянного тока, а также система асинхронный машинно-вентильный каскад (АМВК). Электроприводы по системе Г–Д получили наибольшее распространение и используются в ЭП роторного колеса экскаваторов ЭРШР-1600, ЭРШР-5000 и ЭРШРД-5000 [1, 3].

Функции ограничения нагрузки в главных ЭП роторных экскаваторов возложены на токовую отсечку или на максимально-токовую защиту. В ЭП роторного колеса дополнительно к вышеуказанному предусмотрено на защита от недопустимых механических нагрузок (муфта предельного момента), обеспечивающая защиту ИО от разрушения вследствие недопустимых статических или динамических нагрузок. Снижение нагрузки на главный ЭП до требуемого (желаемого) уровня осуществляется за счет снижения скорости электропривода поворота стрелы роторного колеса. В аварийных ситуациях приводной двигатель может затормаживаться механическим тормозом. Для выполнения ремонтных работ предусмотрен режим пониженной скорости.

В системе управления электроприводом ИО роторных экскаваторов задатчик интенсивности отсутствует, а сигналы управления могут изменяться скачком. В задачу системы автоматического управления (САУ) входит ограничение ускорения роторного колеса при пуске ЭП, что обеспечивается за счет воздействия гибкой обратной связи не только в штатных режимах, но и при стопорении ЭП роторного колеса из-за резкого наброса момента сопротивления, когда нагрузка роторного ИО может оказаться чрезмерно большой и привести к недопустимым деформациям. В этой связи, как уже указывалось выше, ЭП роторного колеса снабжается муфтой предельного момента, устанавливаемой в быстроходной части ЭП роторного колеса.

Система управления ЭП должна обеспечивать возможность снижения угловой скорости роторного колеса на 30 – 60% по отношению к номинальной. Диапазон регулирования скорости резания должен составлять

$$D = \frac{\omega_{cp.min}}{\omega_{cp.max}} = 1 : 2,5.$$

При этом между скоростями экскавации  $v_{\text{Э}}$  и резания  $v_{\text{Р}}$  должно поддерживаться соотношение [1]:

$$\frac{v_{\text{Р}}}{v_{\text{Э}}} = 3,3 \dots 6,7.$$

Такое соотношение и направления векторов скоростей определяют направление интегральной силы взаимодействия режущих кромок ковшей с забоем. Величина же и направление действующих на кромку ковша сил (нормальная  $F_{\text{Н}}$ , перпендикулярная груди забоя, боковая  $F_{\text{Б}}$ , перпендикулярная к плоскости роторного колеса, и сила резания  $F_{\text{Р}}$ ) определяют среднюю статическую нагрузку ЭП роторного колеса и деформацию последнего в зоне резания.

Тип ЭП, параметры и приводная мощность роторного колеса в основном определяют производительность экскаватора. В этой связи целесообразно рассмотреть возможный альтернативный тип ЭП уже существ-

вующим типам приводов, в частности, частотно-регулируемый ЭП на базе асинхронных двигателей (АД) с вращающимся ротором и двухсторонних линейных АД (ДЛАД). Использование такого ЭП должно привести к радикальным изменениям как самих электроприводов, так и роторных комплексов в целом, улучшить их технико-экономические показатели, а также, что очень важно, снизить или устранить негативное влияние ЭП на питающую сеть.

Значительные диаметры роторных ИО (до 12 – 20 м) (рис.1) при внецентренном (боковом) приложении формирующихся в процессе резания сил сопротивления обуславливают деформацию существующих конструкций роторных колес. Если учесть, что вращающий электромагнитный момент ЭП роторного колеса передается к месту установки режущего инструмента на кромке ковшей по достаточно протяженной и сложной кинематической цепи с конечной жесткостью ее элементов, то становится понятным стремление конструкторов роторных экскаваторов увеличить жесткость роторного колеса. Этим обусловлена необходимость и целесообразность создания такой кинематической схемы, когда необходимое электромагнитное режущее усилие к месту установки режущего инструмента передается не через упругую кинематическую цепь, а создается вблизи зоны резания, будучи максимально приближенным к режущему инструменту.

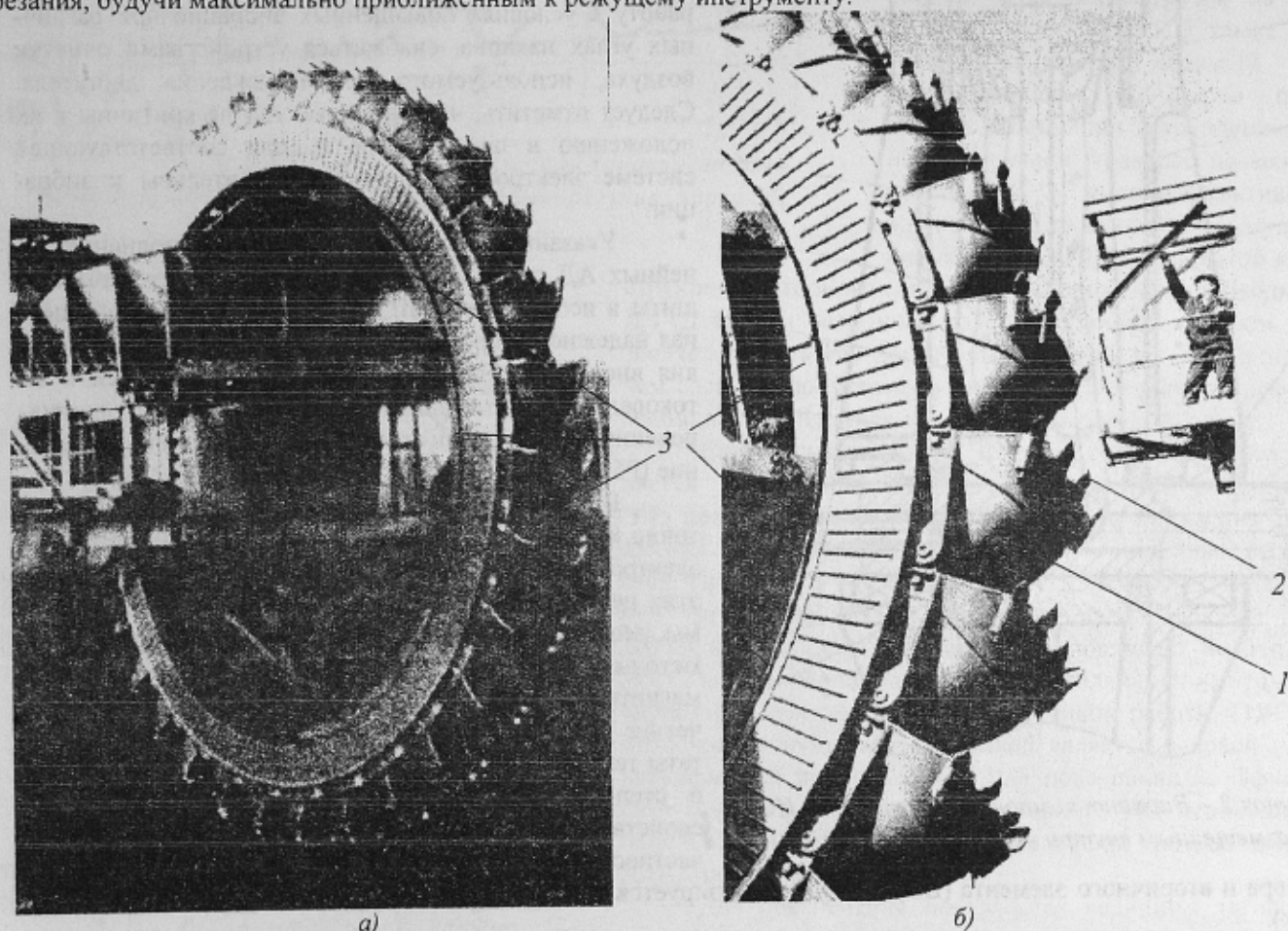


Рисунок 1 – Исполнительный орган роторного экскаватора:  
 а – роторное колесо  $\varnothing 16$  м; б – фрагмент роторного колеса; 1 – ковши; 2 – резец;  
 3 – упорные полукольца в активной зоне роторного исполнительного органа

Этот принцип в определенной степени реализован, например, в очистных комбайнах для добычи угля и калийных (поваренных) солей в подземных условиях в шахтных забоях. При этом скорость резания может быть как постоянной, так и изменяющейся по величине (регулируемой). Оптимальное ее значение зависит от ряда факторов. По сравнению, например, со скоростью резания в стругах скорость резания в роторных ИО может быть в два и более раз выше. С улучшением, совершенствованием системы ЭП и минимизацией непроизводительных потерь мощности на скалывание (резание) скорость резания скалывающих исполнительных органов можно поддерживать на оптимальном уровне.

Нами рассмотрена принципиальная возможность создания роторного ИО экскаватора с частотно-регулируемым линейным электроприводом резания и динамической разгрузкой ковшей роторного колеса [4]. Такое решение позволяет расположить исполнительные (приводные) ДЛАД непосредственно внутри роторного колеса (рис.2), тем самым обеспечить формирование необходимого режущего усилия вблизи режущего инструмента, упразднив сложную кинематическую систему [4].

При использовании в приводе экскаваторов с ИО роторного типа частотно-регулируемого ЭП на основе ДЛАД требуемый диапазон регулирования скорости может быть достигнут путем использования для питания ДЛАД тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ) с естественной коммутацией, обеспечивающих также хорошую форму выходного напряжения (тока) и устойчиво работающих в области низких и инфранизких (до



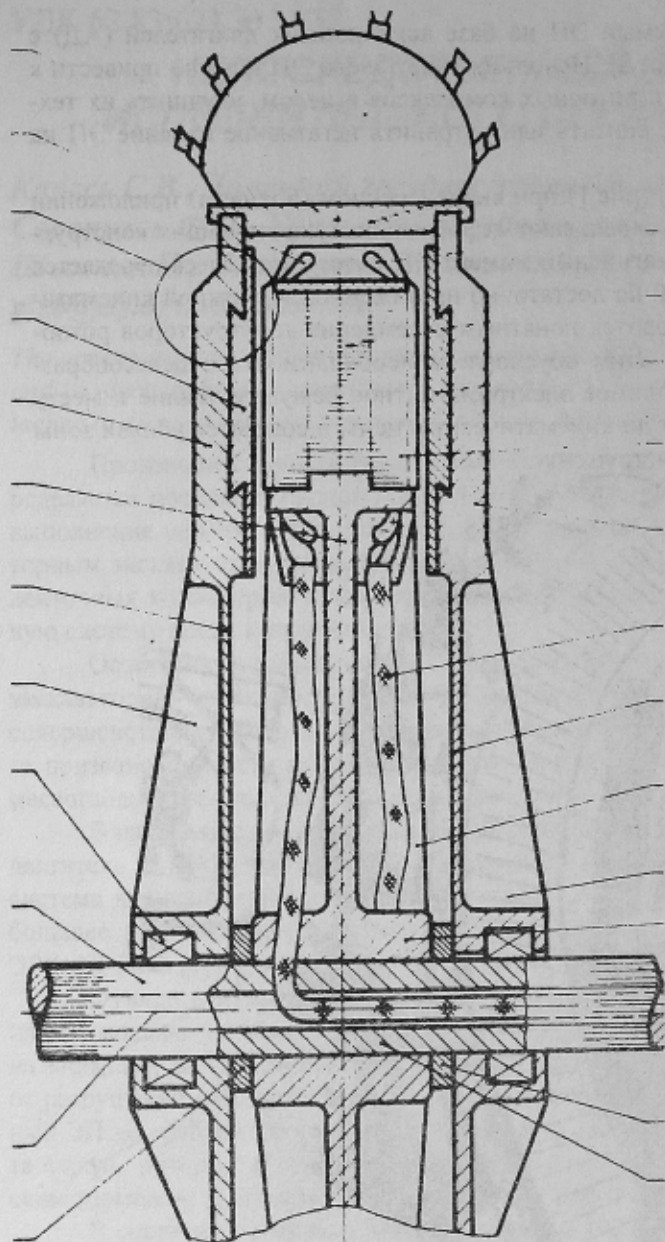


Рисунок 2 – Вариант компоновки роторного ИО с размещенным внутри него модульным ДЛАД

индуктора и вторичного элемента (ВЭ) [6, 7] минимизируется действие краевых эффектов (продольных, поперечных).

Отметим также, что многополюсные линейные АД имеют достаточно узкие концевые зоны деформированного бегущего магнитного поля [6]. При этом результаты теоретических исследований проверены экспериментально и получили подтверждение. Этот факт позволяет заключить, что ДЛАД привода ИО роторного экскаватора должен быть многополюсным. Кроме этого, в [7, 8] показано, что адиабатические скорости нарастания температуры активных частей ДЛАД невысокие, и при отсутствии механической связи между индуктором и ВЭ двигателя допускают работу "на упор" (при полностью заторможенном ВЭ) в течение 5,0...7,0 с, не вызывая никаких поломок в двигателе.

Отсюда следует, что, так как для линейных АД при их относительно высоких номинальных и критических скольжениях (рис.3) режим работы на упор при полностью заторможенном роторном колесе является допустимым, а линейная скорость перемещения ковшей роторного ИО менее 4,5 м/с, то отпадает необходимость в применении защитных муфт предельного момента, устанавливаемых обычно в быстроходной части традиционных систем электроприводов ИО роторных экскаваторов и защищающих эти привода от разрушения в случае резкого наброса нагрузки или заклинивания самого роторного колеса.

У роторных экскаваторов ИО больших диаметров выполняются секционированными. Это соответственно требует секционированного (модульного) исполнения приводного ДЛАД, что хорошо согласуется с общей идеей многомодульной компоновки ЭП большой мощности, когда каждый модуль-индуктор работает на общий кольцевой ВЭ (рис.4). Это упрощает как производство, так и монтаж-демонтаж ДЛАД. Число модулей-индукторов в этом случае может составлять 8 – 16 шт. Важно указать здесь на то, что конструктивно ковши ИО, располагаемые по внешней образующей роторного колеса, должны быть жестко связаны с подвижным ВЭ,

10 Гц) частот [5]. ТПЧ с естественной коммутацией (ТПЧЕ) с микропроцессорным управлением обеспечивают гибкое и динамичное управление электроприводом. Уровень установленной мощности ЭП (1,8 – 2,5 МВт) предопределяет необходимость выполнения его высоковольтным (6 – 10 кВ). Основные требования к ТПЧЕ достаточно подробно изложены в [5].

Если учесть, что электродвигатель и ЭП роторного колеса, установленные на оголовке стрелы, работают в условиях повышенной вибрации и тряски, в зоне интенсивного образования пыли, при значительных дифферентах, связанных с различным положением стрелы в вертикальной плоскости [1], то приводные электродвигатели должны быть закрытого исполнения, допускать работу в условиях повышенных вибраций при различных углах наклона, снабжаться устройствами очистки воздуха, используемого для охлаждения двигателя. Следует отметить, что линейные АД не критичны к их положению в пространстве и, при соответствующей системе электроизоляции, не чувствительны к вибрации.

Указанное делает необходимым выполнение линейных АД по конструкции, уровню и виду взрывозащиты в исполнении РПШ (защита вида "е" – повышенная надежность против взрыва). По защите от воздействия внешней среды сами индукторы двигателей и их токоведущие части должны быть защищены от проникновения влаги и пыли (пылевлагозащищенное исполнение IP54).

В настоящее время теория линейных АД достаточно хорошо разработана [6], разработаны методы их электромагнитного и теплового расчетов [7, 8]. Для этих целей разработаны также компьютерные программы, реализующие как полевые методы (подходы), так и методы подробных схем замещения электрических и магнитных цепей [6]. При этом имеются достаточно четкие представления и получены достоверные результаты теоретических и экспериментальных исследований о степени негативного влияния краевых эффектов, свойственных линейным АД [6] и путям их снижения. В частности, путем выбора рациональных параметров

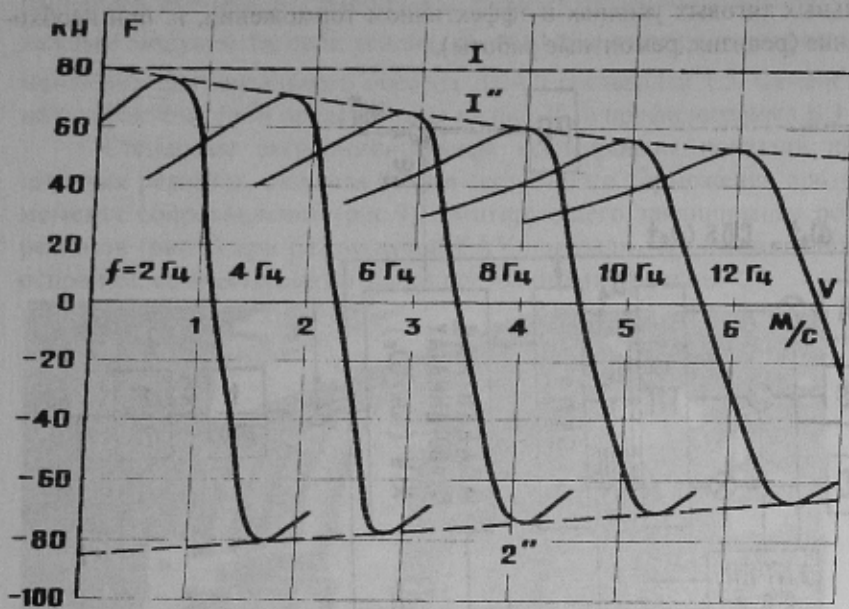


Рисунок 3 — Расчетные механические тяговые характеристики полномасштабного модуля ДЛАД частотно-регулируемого ЭП роторного ИО

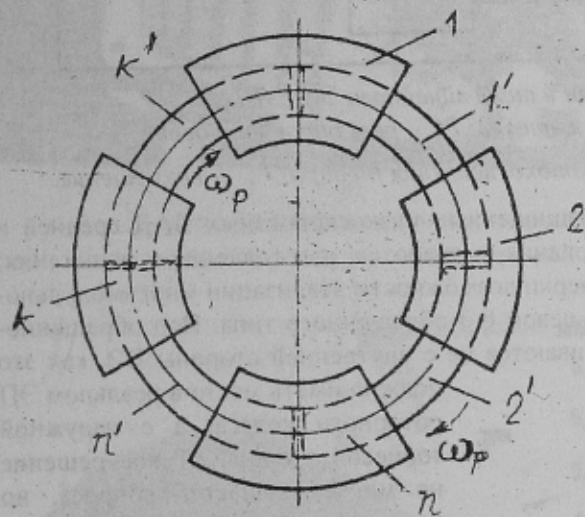


Рисунок 4 — Схема компоновки неподвижных модулей-индукторов ДЛАД относительно кольцевого ВЭ:

1, 2, ..., n, ..., k — модули-индукторы;

1', 2', ..., n', ..., k' — модули-сегменты секционированного ВЭ;

$\omega_p$  — угловая частота вращения ВЭ

ной коммутацией (ТПЧЕ) с автономным инвертором тока, обеспечивающего синусоидальную форму тока нагрузки (рис.5) с ограничением работы ТПЧЕ в зоне прерывистых токов. Последнее требование вытекает из необходимости работы на низких частотах (0,5 – 1,5 Гц) для получения "ползучих" скоростей при выполнении профилактических и ремонтных работ.

Известно, что частотный способ регулирования жестко связан не только с мощностью АД, но и с режимом работы ЭП роторного экскаватора, обеспечивая минимизацию потерь во вторичном элементе при реализации необходимого закона регулирования системы ЭП при частотном пуске. Теоретически и экспериментально доказано [7, 8], что частотно-регулируемый линейный асинхронный ЭП обеспечивает получение устойчивых ползучих скоростей (0,2 – 0,5 м/с), необходимых для выполнения профилактических осмотров и проведения ремонтных работ. При этом может быть обеспечено бесступенчатое повышение и понижение скорости резания (частоты вращения роторного колеса).

Таким образом, использование ТПЧЕ для питания приводных ДЛАД обеспечивает бесступенчатое регулирование скорости ЭП (рис.3), универсальность и относительную экономичность ЭП по сравнению с другими способами управления, позволяет получать устойчивые в течение продолжительного времени пониженные и

а модули-индукторы должны быть неподвижными и размещаться на специальной кольцевой траверсе вдоль кругового ВЭ.

В отличие от редукторного ЭП роторного ИО, при использовании многомодульного линейного ЭП с одним кольцевым ВЭ тяговое усилие ЭП, создаваемое отдельными приводными модулями-индукторами, и их тепловые потери распределяются по всей кольцевой длине кругового ВЭ, что снижает уровень и концентрацию механических и тепловых нагрузок на локальных участках ИО, а также нагрев ВЭ двигателя в целом [7 – 9]. Неподвижность индукторов приводных ДЛАД при закреплении их на специальной траверсе позволяет обеспечить высокоэффективное жидкостное охлаждение модулей-индукторов и ВЭ при закрытой кон-

струкции роторного колеса. Расположение приводных ДЛАД внутри роторного колеса указанным образом позволяет сделать ИО достаточно жестким и герметичным, чем свести к допустимому минимуму его упругие деформации и, как следствие, обусловленные ими поломки.

Бестрансмиссионный ЭП роторного ИО, каким является линейный асинхронный частотно-регулируемый ЭП, должен обеспечивать возможность получения различных по величине тяговых усилий и линейных скоростей. При этом к ТПЧ, питающему ДЛАД, предъявляется ряд требований [5]. В частности, специфический для ДЛАД коэффициент мощности обуславливает необходимость использования «широких» управляющих импульсов тиристоров для обеспечения устойчивой работы ТПЧ на низкосинусную нагрузку, какой является силовой низкоскоростной линейный АД. Для повышения коэффициента мощности системы ЭП роторного ИО необходимо использовать поперечную компенсацию потребляемой ДЛАД реактивной мощности.

Для обеспечения постоянства величины тягового усилия в требуемом диапазоне изменения скорости резания необходимо постоянство магнитного потока в воздушном зазоре. В рассматриваемом случае наиболее целесообразным является использование ТПЧ с естествен-



промежуточные скорости ИО при значительных тяговых усилиях и эффективном торможении, и, при необходимости, достаточно точное позиционирование (ревизия, ремонтные работы).

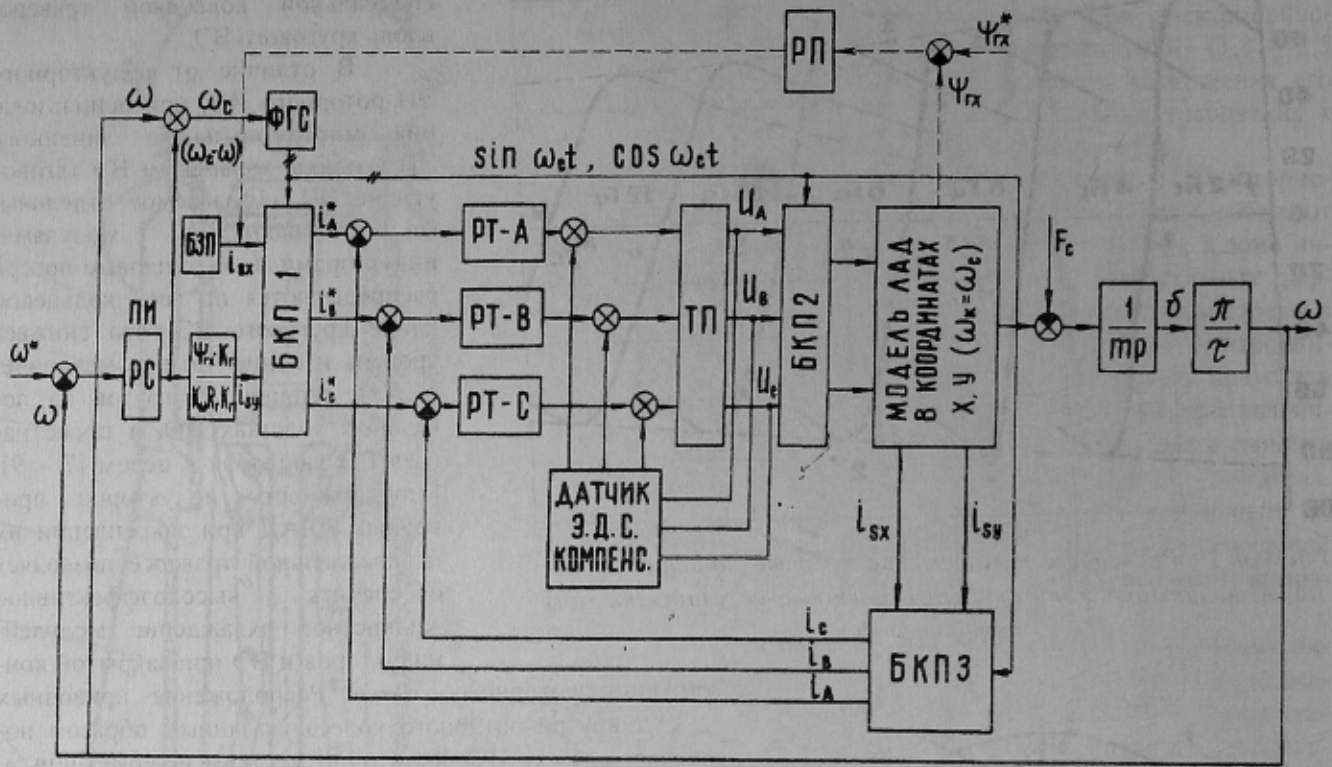


Рисунок 5 – Упрощенная блок-схема САУ скорости и тока линейного ЭП с ДЛАД:

БКП1, БКП2 и БКП3 – блоки координатных преобразователей; РС – регулятор скорости;

РТ-А, РТ-В, РТ-С – регуляторы токов фаз; РП – регулятор потокосцепления ротора;  $F_c$  – возмущение.

В УкрНИИВЭ в рамках программы разработки взрывозащищенных низкоскоростных ЛАД средней и большой мощности (теоретические, экспериментальные исследования, разработка, изготовление и испытания) была создана экспериментальная установка (рис.6) с целью проверки возможности реализации многомодульного ДЛАД с модулями-индукторами, работающими на один кольцевой ВЭ обращенного типа. Под обращенностью ВЭ здесь понимается то, что модули-индукторы устанавливаются не с внутренней стороны ВЭ, как это

должно иметь место в реальном ЭП роторного колеса, а с наружной торцевой стороны. Такое решение не меняет существа вопроса, но позволяет в большой степени упростить экспериментальную установку, для которой с учетом перечисленных выше требований ПО ХЭМЗ разработан преобразователь с непосредственной связью на ток 750 А и напряжение 660 В, представляющий собой автономный источник тока, выполненный по шестипульсовой мостовой схеме с пофазной гальванической развязкой входных силовых цепей и пофазным регулированием тока тиристорных мостов, формирующих фазные токи [5].

Стенд для проверки предложенного ЭП роторного колеса на базе ДЛАД представляет собой физическую модель в масштабе 1:5 (рис.6) и позволял устанавливать до шести модулей-индукторов (рис.7), которые работают на один кольцевой секционированный об-

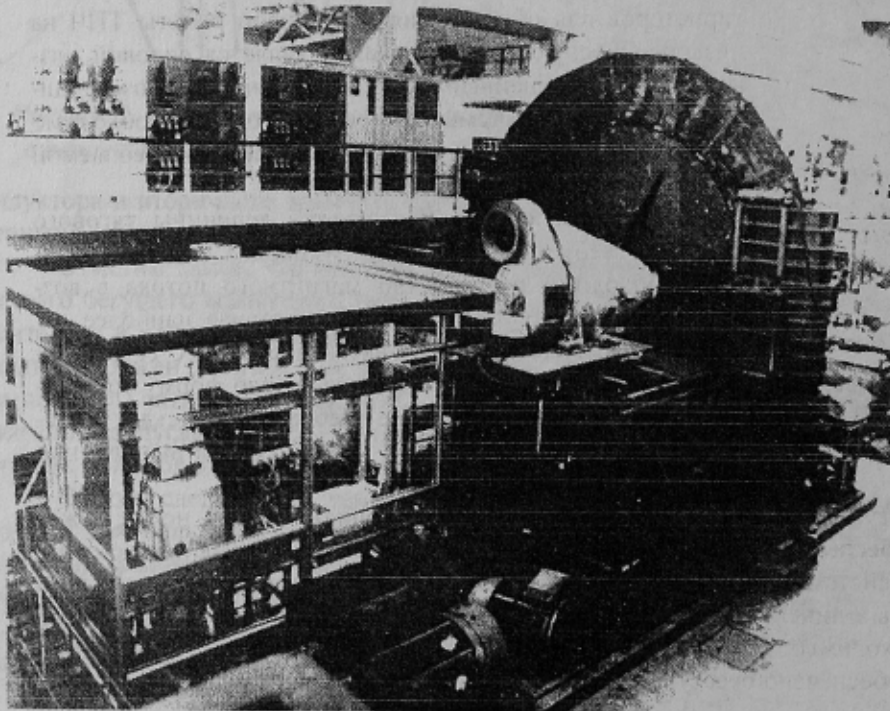
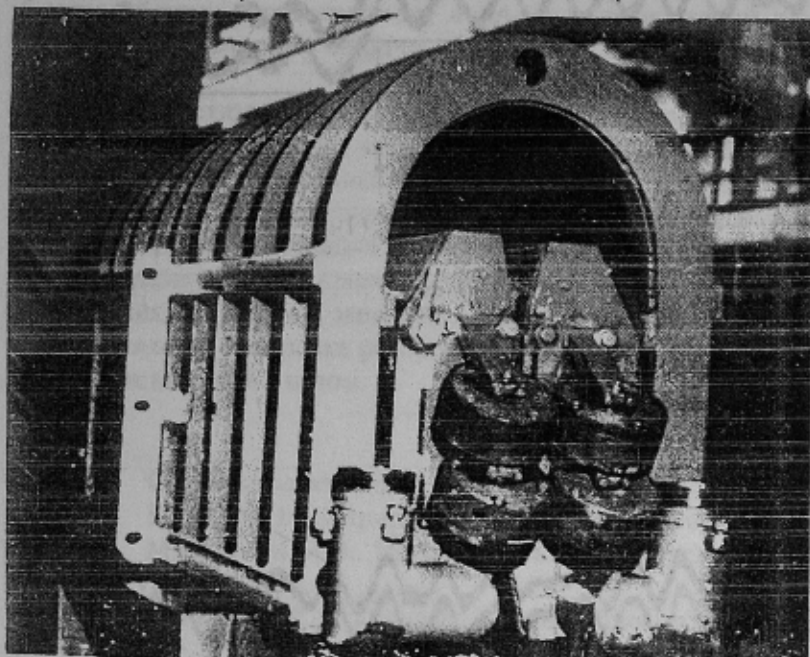


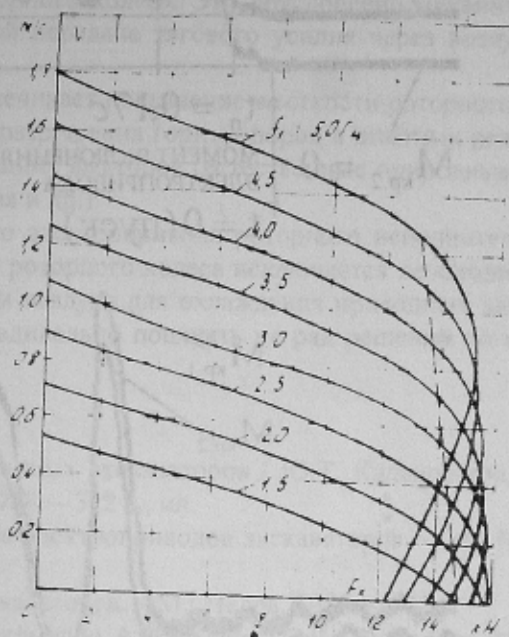
Рисунок 6 – Стендовая установка с обращенным кольцевым ВЭ многомодульного ДЛАД, нагрузочным блоком и двумя модулями-индукторами

ращенный ВЭ (рис.8). Вторичный элемент экспериментальной установки (рис.8а) рассчитан на развиваемое каждым модулем тяговое усилие  $F_T = 1,1 \text{ т}$  и линейную скорость  $v_H = 1,2 \text{ м/с}$ . Кратность критического момента экспериментального образца ДЛАД составляла 1,5. Семейство механических и экскаваторная (пунктирная) характеристики представлены на рис.7б, а профилограмма ВЭ до и после наладки – на рис.8б.

Стендовые экспериментальные исследования показали практическую возможность реализации всех штатных режимов, включая режим экстренного торможения противовключением при скачкообразном набросе момента сопротивления (рис.9), имитирующего заклинивание роторного ИО. Осциллограммы динамических режимов (рис.9) при разомкнутой САУ показали, что быстрдействие системы ЭП с ДЛАД ограничивается, в основном, ее электромагнитными постоянными времени.

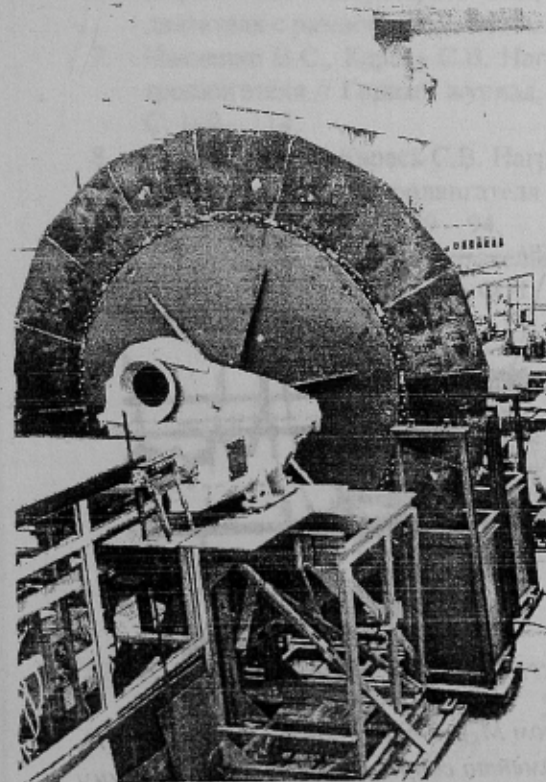


а)

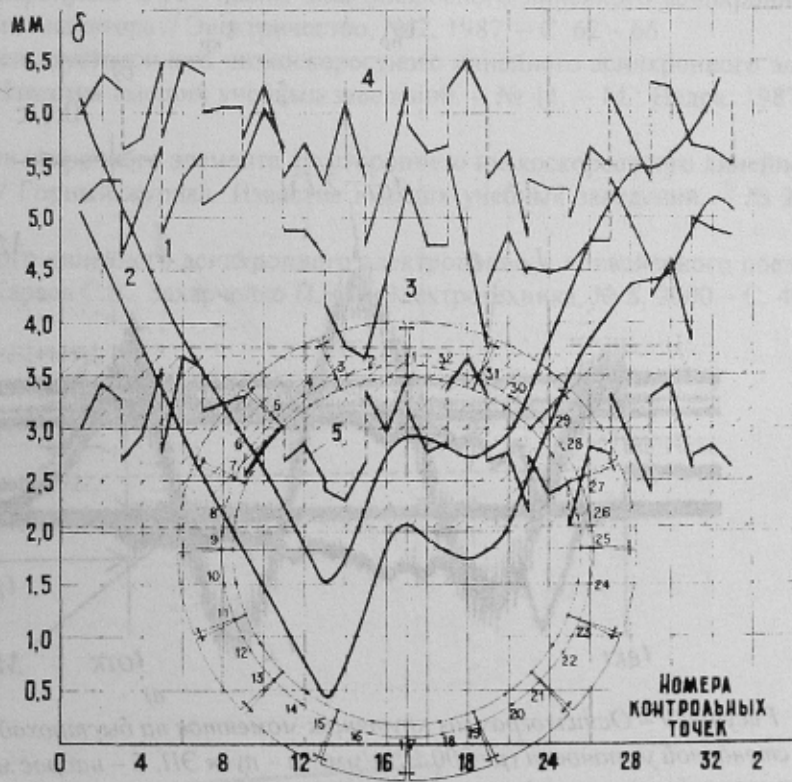


б)

Рисунок 7 – Модуль-индуктор (а) и механические (тяговые) характеристики ДЛАД (б) стендовой масштабной установки



а)



б)

Рисунок 8 – Секционированный кольцевой ВЭ со снятыми модулями-индукторами ДЛАД (а) и профилограмма его торцевых отклонений (б) до и после регулировки (область остаточных отклонений  $\delta_{\text{max}} = 1,7 \text{ мм}$  заштрихована)



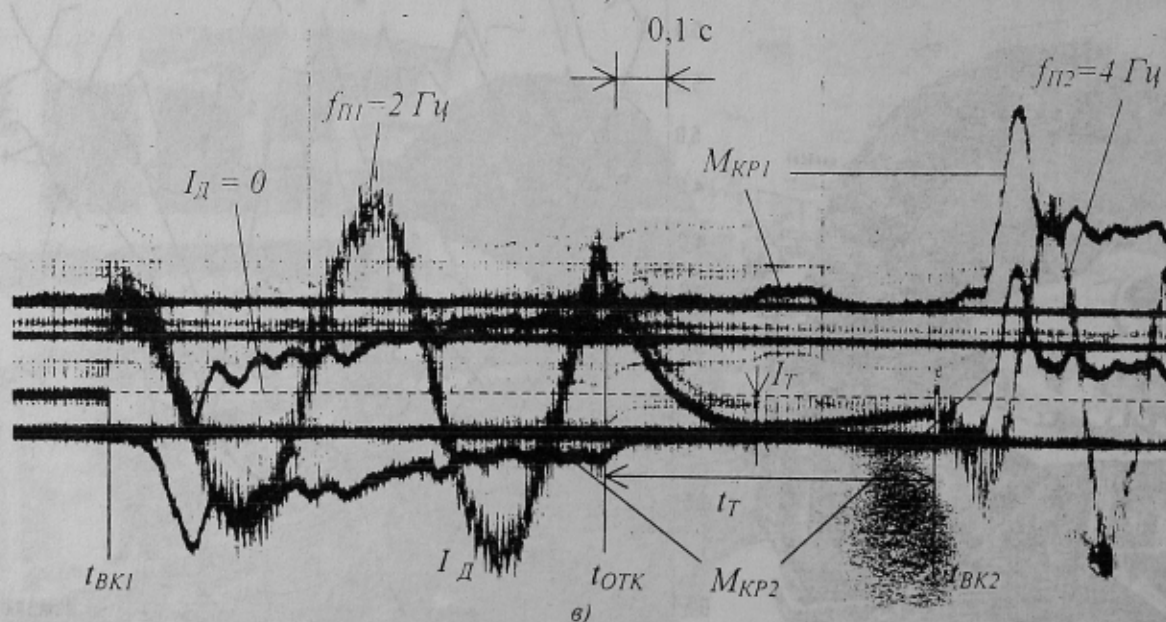
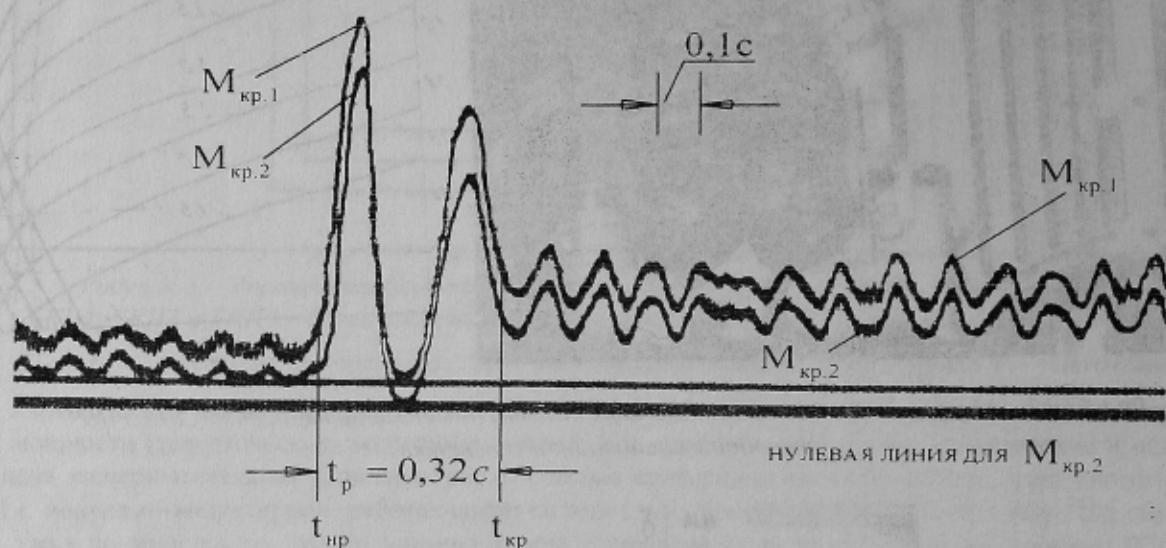
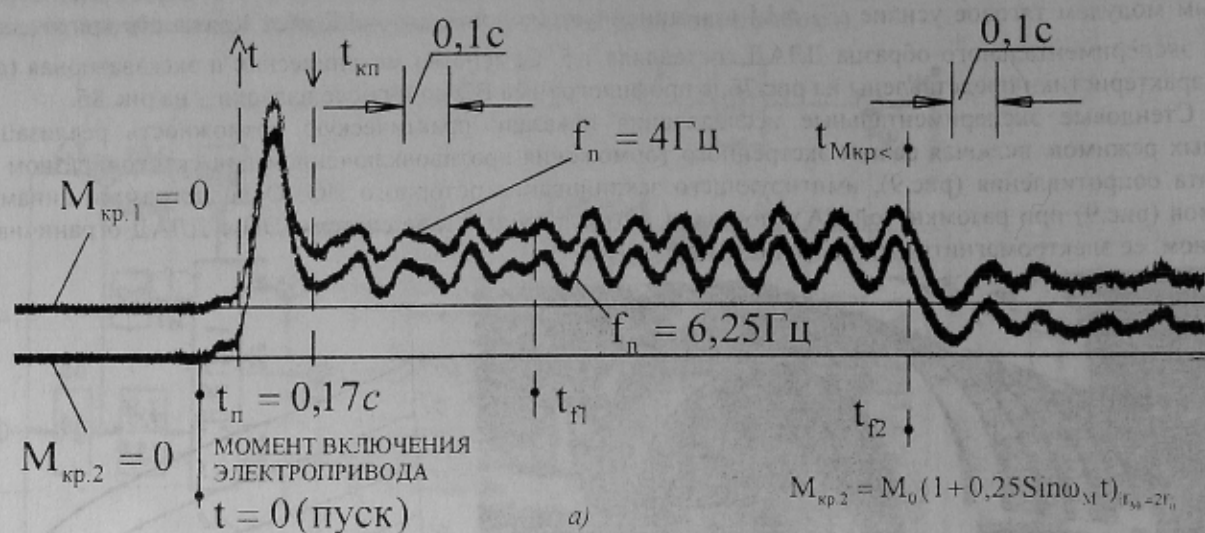


Рисунок 9 – Осциллограммы крутящих моментов на быстроходном  $M_{кр.1}$  и тихоходном  $M_{кр.2}$  валах ЭП стендовой установки ( $\mu = 900 Н*м/мм$ ): а – пуск ЭП, б – наброс момента сопротивления с последующим замедлением до полной остановки и пуском ЭП в том же направлении при различных уровнях нагрузочных моментов до и после момента наброса нагрузки; в – пуск (в момент времени  $t_{вк1}$ ), торможение ( $t_{отк}$ ), реверсирование ( $t_{вк2}$ ):  $I_d$  – ток двигателя;  $I_T$  – тормозной ток двигателя;  $f_{п1}$ ,  $f_{п2}$  – частота тока питания двигателя соответственно до и после реверсирования

Изложенное позволяет заключить, что есть реальная основа для попытки создания нетрадиционного ЭП роторного колеса, альтернативного существующим. Одним из существенных препятствий в стремлении применить линейный ЭП на роторном ИО может быть малый опыт создания высоковольтных ДЛАД и ТПЧЕ в экскаваторном исполнении.

#### Выводы.

1. Линейные двигатели допускают работу "на упор", а относительно невысокие адиабатические скорости нарастания температур активных частей индукторов и вторичных элементов исключают высокие требования по быстродействию, предъявляемые к САУ электроприводом роторного колеса. Это обусловлено механической развязкой индуктора и вторичного элемента при бесконтактной передаче тягового усилия через воздушный зазор.

2. Герметизация роторного исполнительного органа обеспечивает повышение жесткости роторного колеса, значительное снижение его упругих деформаций в процессе разрушения горных пород в штатных режимах, а также защищает приводные линейные АД от воздействия внешних факторов (естественные природные осадки, запыление, солнечная радиация, агрессивные газы и испарения и др.).

3. При использовании частотно-регулируемого линейного электропривода роторного исполнительного органа и расположении приводных линейных двигателей внутри роторного колеса исключается необходимость применения редуктора с защитной муфтой и устройства очистки воздуха для охлаждения приводных двигателей, изменяется центровка роторного экскаватора, что может радикально повлиять на ряд решений по конструкции экскаватора в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Системы электропривода и электрооборудование роторных экскаваторов / Ю.Т. Калашников, А.О. Горнов, В.Н. Остриров и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 312 с., ил.
2. Мительман М.В., Мирошкин П.П. Совершенствование электроприводов экскаваторов. – М.: Недра, 1987. – 160 с.
3. Котлярчук В.А., Гончаров А.Ф. Электроснабжение экскаваторов. – М.: Недра, 1980. – 175 с.
4. А.с. 1583548 (СССР). Роторный рабочий орган / Пархоменко А.И., Карась С.В., Филиппов М.Н. // Бюл. изобр. – № 29, 1990. – С.127.
5. Тиристорный электропривод рудничных и взрывозащищенных установок. Справочное пособ. / А.А. Дубинский, В.А. Скрыпник, С.В. Карась и др. – М.: Недра, 1991. – 173 с., ил.
6. Пархоменко А.И., Карась С.В., Сарапулов Ф.Н. Анализ многополюсного линейного асинхронного двигателя с различными обмотками индуктора // Электричество, № 2, 1987. – С. 62 – 66.
7. Иваненко В.С., Карась С.В. Нагрев двустороннего низкоскоростного линейного асинхронного электродвигателя // Горный журнал. Известия высших учебных заведений. – № 11. – М.: Недра, 1987. – С. 109 – 114.
8. Иваненко В.С., Карась С.В. Нагрев вторичного элемента двустороннего низкоскоростного линейного асинхронного электродвигателя // Горный журнал. Известия высших учебных заведений. – № 2. – М.: Недра, 1988. – С. 89 – 94.
9. Моделирование многодвигательного линейного асинхронного электропривода конвейерного поезда. // Черных И.В., Сарапулов Ф.Н., Карась С.В., Захарченко П.И. – Электротехника, № 8, 2000. – С. 40 – 42.

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА  
ВІБЛІОТЕКА  
ДОНДТУ