

## ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.879.323

### АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ДРАГЛАЙНА, ОСНАЩЕННОГО СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ “ГЕНЕРАТОР – ДВИГАТЕЛЬ”

П. Маникандан<sup>1,2</sup>, Т. Маити<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Индийский технологический институт (ISM),  
E-mail: maninandh@gmail.com, г. Дханбад, Индия

<sup>2</sup>Компания Western Coalfields Limited,  
Coal India Limited, Индия

Приводится анализ применения усовершенствованного образца драглайна с микропроцессорным управлением на основе системы “генератор – двигатель” на угольной шахте в Индии. Предложен способ уменьшения удельного энергопотребления и рассматриваются вопросы технического обслуживания, основанные на сравнительном анализе характера неисправностей до и после модернизации.

*Драглайн, модернизация, аналоговое управление, микропроцессорное управление, неисправность*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200107

Драглайны применяются для проведения вскрышных работ на шахтах при разработке верхнего угольного пласта. На большинстве шахт управление движением драглайнов осуществляется при помощи аналоговой системы “генератор – двигатель”, используемой уже больше ста лет [1, 2]. У обычного драглайна основным является управление ковшом, в то время как у драглайнов, оснащенных системой “генератор – двигатель”, операции по подъему ковша и передвижению экскаватора осуществляются двумя отдельными электродвигателями постоянного тока в сочетании с системой шестерней и барабанных лебедок. Поворот происходит при помощи ходового рельса с зубчатым сцеплением, соединенного с тремя-четырьмя вертикальными электродвигателями постоянного тока. Напряжение на якоре двигателей задается генераторами постоянного тока, которые вращаются синхронным электродвигателем. Генератор постоянного тока вырабатывает напряжение в зависимости от изменения напряжения возбуждения, задаваемого оператором при помощи рычага управления.

На рис. 1а показана принципиальная схема системы управления “генератор – двигатель”, используемая на драглайнах, а на рис. 1б — зависимость крутящего момента  $M$  и мощности  $P$  двигателя от скорости  $n$  [3, 4]:

$$n = \frac{E}{C_e \phi} = \frac{U_A - I_A R_A}{C_e \phi}, \quad (1)$$

$$M = C_M \phi I_A, \quad (2)$$

где  $E$  — электродвижущая сила;  $\phi$  — поток возбуждения;  $I_A$  — ток в обмотке якоря;  $R_A$  — сопротивление обмотки якоря;  $C_e, C_M$  — коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров машины;  $U_A$  — напряжение генератора.

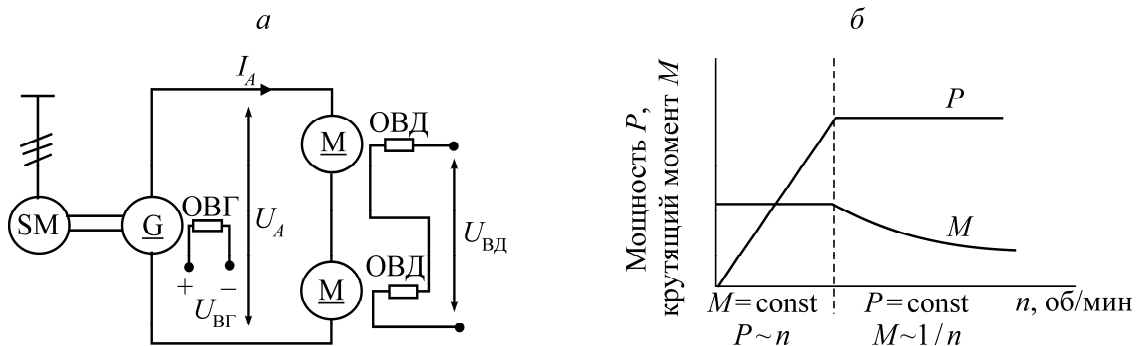


Рис. 1. Принципиальная схема системы управления “генератор–двигатель”, используемая на драглайнах (а): ОВГ и ОВД — обмотки возбуждения генератора и двигателя соответственно; SM — электродвигатель переменного тока (синхронный двигатель); б — зависимость крутящего момента ( $M$ ) и мощности ( $P$ ) двигателя от скорости ( $n$ )

Уравнение (1) свидетельствует о том, что изменение скорости может зависеть от изменения как силы тока в обмотке якоря, так и потока возбуждения. При управлении драглайном поток возбуждения двигателя поддерживается на постоянном уровне, а скорость регулируется изменением силы тока в обмотке якоря.

В связи с применением дополнительного оборудования для выполнения одиночной операции общая эффективность экскаваторов, оснащенных системой управления “генератор–двигатель”, снизилась. На рис. 1а показана простейшая принципиальная схема одиночной операции (подъем ковша, тяга, поворот), выполняемой драглайном с системой управления “генератор–двигатель”. Так как драглайны, оснащенные двигателем переменного тока, имеют большее преимущество по сравнению с драглайнами, управляемыми при помощи системы “генератор–двигатель” [5], существующая система, основанная на аналоговом управлении, может быть усовершенствована путем внедрения электронного управления [6, 7]. Описаны два способа изучения рабочих характеристик экскаватора-драглайна типа 20/90, выпущенного заводом Уралмаш, с модернизированной системой микропроцессорного управления на основе системы “генератор–двигатель”, который применяется в работах на индийской шахте. В первом случае проводилось сравнение удельного энергопотребления драглайна с модернизированной цифровой системой управления и экскаватора, управляемого при помощи аналоговой системы “генератор–двигатель”. Во втором случае система драглайна разбивалась на несколько подсистем, после чего анализировались неисправности с точки зрения частоты и продолжительности. Затем сравнивались результаты, полученные для каждой подсистемы драглайна, оснащенного традиционной аналоговой системой, с результатами, полученными в ходе изучения подсистем драглайна с микропроцессорным управлением.

#### ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ “ГЕНЕРАТОР–ДВИГАТЕЛЬ”

Электрическая энергия от подстанции к экскаватору-драглайну подается через высоковольтный полевой выключатель, расположенный рядом с экскаватором. Отходящий силовой кабель от полевого выключателя присоединен к кольцевому токоприемнику драглайна.

Принципиальная схема усовершенствованной цифровой системы “генератор – двигатель” для управления драглайном показана на рис. 3. К высоковольтному щиту, состоящему из распределительных устройств с вакуумными автоматическими выключателями, подается питание через кабель кольцевого токоприемника. Понижающие трансформаторы  $TV1$  и  $TV2$  предназначены для подачи напряжения 380 В к оборудованию, а трансформатор  $TO$  обеспечивает осветительную нагрузку при напряжении 220 В. Синхронный двигатель приводит в движение якорь генераторов механизмов подъема, тяги и поворота. Преобразователь, используемый для возбуждения синхронного двигателя, выполняет автоматическое регулирование тока возбуждения. Запуск синхронного двигателя осуществляется при помощи системы принудительного вращения ротора, состоящей из генератора электропривода механизма поворота и тиристорного преобразователя тока. Во время запуска генератор механизма поворота работает в двигательном режиме. На обмотку якоря генератора не подается нагрузка. Обмотка возбуждения соединена с выходом тиристорного преобразователя возбуждения. Как только достигается синхронная частота вращения ротора, прекращается подача энергии к генератору механизма поворота, и под действием возбуждения поля статора ротор втягивается в синхронизм.

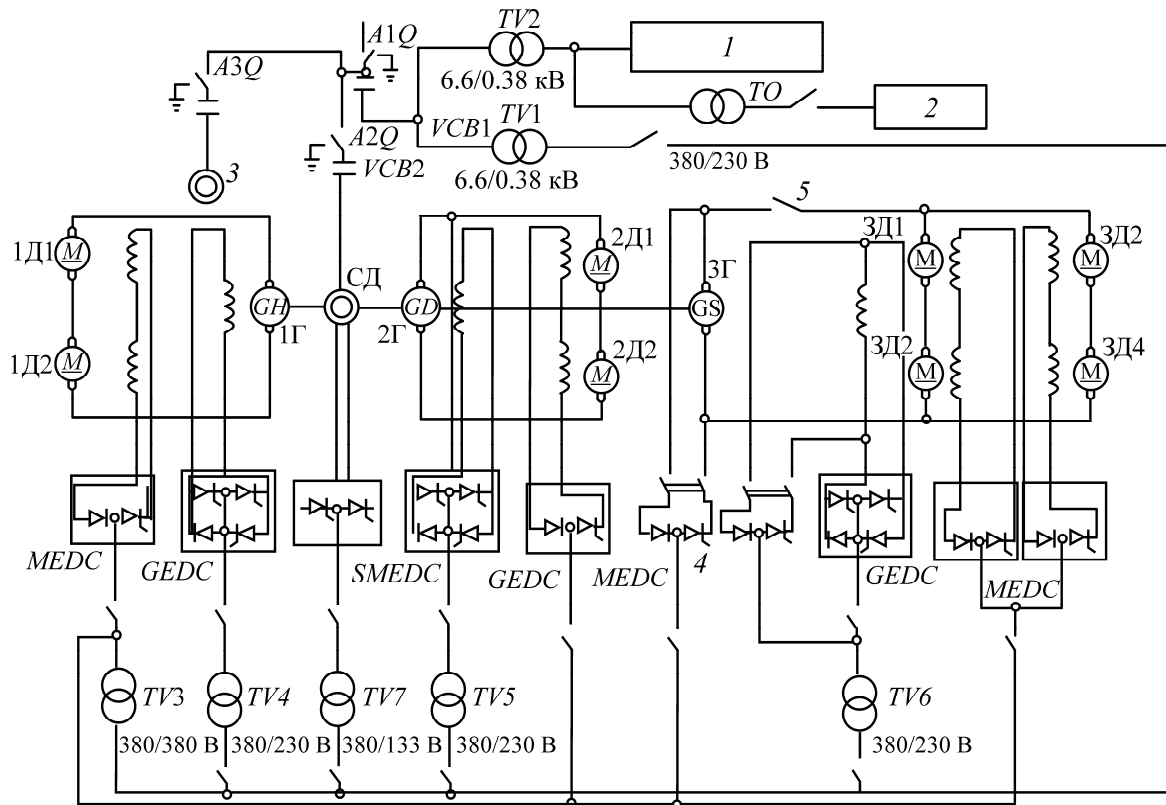


Рис. 3. Принципиальная схема модернизированной системы управления драглайном с системой “генератор – двигатель”:  $A1Q - A3Q$  — высоковольтные разъединители;  $VCB1 - VCB3$  — вакуумные выключатели; 1 — вспомогательные приводы; 2 — цепи освещения; 3 — двигатель шагающего механизма; СД — синхронный двигатель; 1Г – 3Г — генераторы приводов подъема, тяги и поворота; 1Д1, 1Д2 — двигатели механизма подъема; 2Д1, 2Д2 — двигатели механизма тяги; 3Д1 – 3Д4 — двигатели поворотного механизма;  $MEDC$  — возбуждение двигателя с цифровым управлением;  $GEDC$  — возбуждение генератора с цифровым управлением;  $SMEDC$  — возбуждение синхронного двигателя с цифровым управлением; 4 — блок управления запуском синхронного двигателя; 5 — ручной выключатель

Электроприводы, используемые для выполнения драглайном трех основных операций (подъем, тяга и поворот), спроектированы на основе системы приводов “генератор–двигатель”. Выходное напряжение генераторов регулируется изменением тока возбуждения в генераторе при помощи трехфазных реверсивных тиристорных выпрямителей. Они управляются микропроцессорными устройствами, которые генерируют управляющие сигналы для тиристорного преобразователя в соответствии с заданием, вводимым оператором. Подача питания к тиристорным преобразователям происходит посредством трехфазных трансформаторов *TV4*, *TV5* и *TV6*.

Питание к обмоткам возбуждения двигателей механизмов подъема, тяги и поворота подается от трансформатора *TV3* через трехфазные тиристорные преобразователи. Передвижение машины осуществляется при помощи операции шагания. В системе шагающего устройства используется двигатель, соединенный с главным насосом, создающим давление гидравлической жидкости, которая подается к барабанам подъемного механизма, вспомогательным цилиндрам, расположенным слева и справа, посредством управления электромагнитными клапанами.

#### **ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ**

Управление электроприводами механизмов подъема, тяги и поворота выполняется при помощи регулирования напряжения возбуждения генератора постоянного тока, используемого для подачи питания к определенному приводу. Ток генератора и напряжение вводятся в цифровой блок управления, с которого считываются данные, и эти показания сравниваются с заданными в соответствии с положением рычага управления. Таким образом, напряжение и сила тока устанавливаются в соответствии с заданными значениями при помощи регулятора, а изменения тока и напряжения определяются посредством положительной обратной связи. Следовательно, необходимая скорость/положение обеспечиваются посредством перемещения рычага управления оператором с целью корректировки напряжения и силы тока в двигателях постоянного тока. В данной модели машин для операции управления используется пропорционально-интегральный регулятор.

На рис. 4 показан цифровой блок управления для системы “генератор–двигатель”. Для улучшения динамических характеристик привода в системе используют регулятор интенсивности, нелинейную обратную связь по току и отрицательную обратную связь по производной тока. Обработка данных в системах управления привода осуществляется при помощи микроконтроллеров.

Кривые заданных напряжений и силы тока в сравнении с действительными регулируемыми значениями представлены для механизмов подъема, тяги и поворота (рис. 5). С помощью рычага управления задано контрольное входное напряжение (на рис. 5 — кривая серого цвета), и соответствующее генерируемое выходное напряжение (кривая черного цвета). Сглаженные контуры кривой указывают на достаточный контроль над значениями для систем подъема, тяги и поворота. Кривые показывают равномерно регулируемые значения в соответствии с заданными показателями для систем подъема, тяги и поворота. Это свидетельствует о точной работе оператора при управлении действительными значениями в соответствии с контрольными заданными параметрами. При резких движениях рычага управления происходит плавное изменение значений силы тока и напряжения.

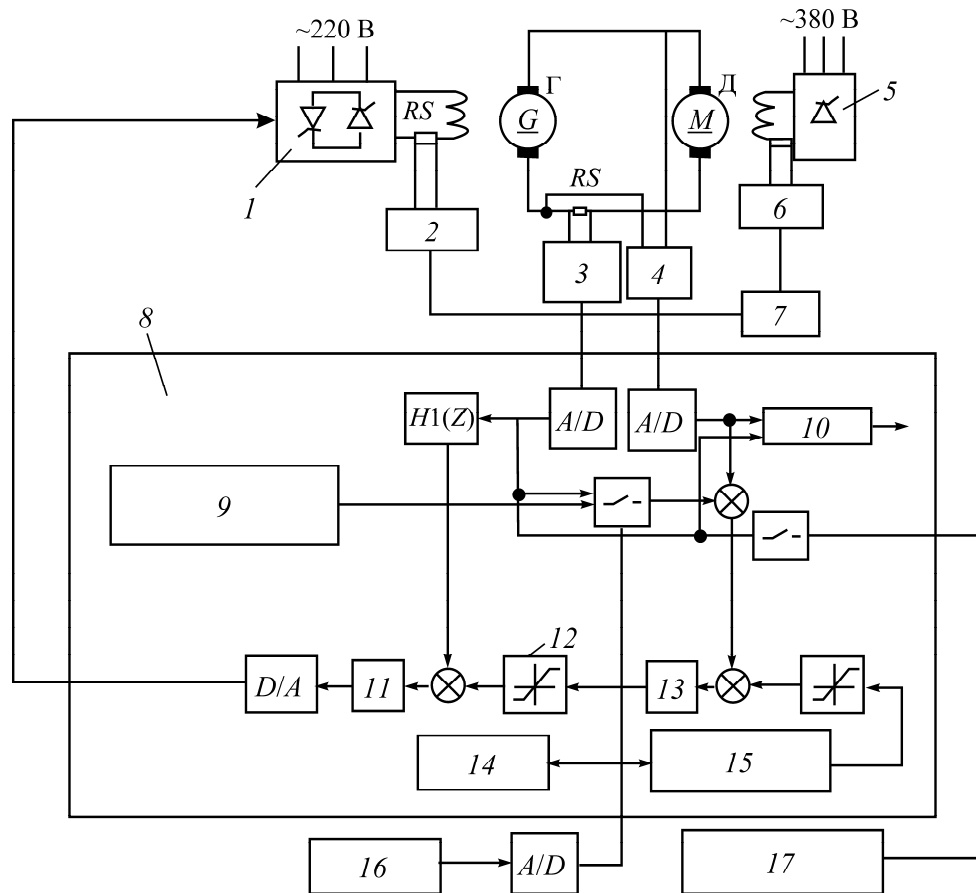


Рис. 4. Цифровой блок управления для системы “генератор – двигатель”: 1 — блок тока возбуждения генератора; 2 — обратная связь по току возбуждения генератора; 3 — обратная связь по току якоря; 4 — обратная связь по напряжению; 5 — блок тока возбуждения двигателя; 6 — обратная связь по току возбуждения двигателя; 7 — блок управления; 8 — цифровой блок управления; 9 — положительная обратная связь по току; 10 — блок связи; 11 — усиление по току; 12 — насыщение; 13 — усиление по напряжению; 14 — библиотека программ; 15 — регулятор интенсивности; 16 — рычаг управления; 17 — коэффициент переключения;  $H1(Z)$  — производная;  $A/D$  — аналого-цифровой преобразователь;  $D/A$  — цифро-аналоговый преобразователь;  $RS$  — шунтирующий резистор

#### АНАЛИЗ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Производительность драглайна после внедрения микропроцессорного управления в систему “генератор – двигатель” проанализирована по двум категориям. Во-первых, сравнивалось удельное потребление энергии драглайнами с аналоговой и цифровой системами управления, во-вторых, продолжительность простоя при неисправности (в часах) и частота выхода из строя на основе данных, полученных до и после внедрения блока цифрового управления.

Данные по энергопотреблению и технологическим показателям разработки собирались ежемесячно в течение года до модернизации и на протяжении года после внедрения блока цифрового управления на драглайне с системой “генератор – двигатель”. В табл. 1 представлены данные по энергопотреблению в соответствии с производительностью драглайна за каждый месяц. Удельное потребление энергии рассчитано исходя из энергопотребления на  $1 \text{ м}^3$  при совершении драглайном операции выемки. Для драглайна с аналоговым управлением удельное

энергопотребление составило 2.66 кВт·ч/м<sup>3</sup>, для драглайна с цифровым блоком управления оно снизилось до 2.06 кВт·ч/м<sup>3</sup>. Предполагается, что уменьшение удельного энергопотребления на 0.59 кВт·ч/м<sup>3</sup> связано с внедрением цифрового блока управления. Из табл. 1 можно заметить, что при модернизированной системе управления ежемесячное удельное энергопотребление приблизительно одинаковое, в то время как при использовании аналогового управления отмечается колебание значений.

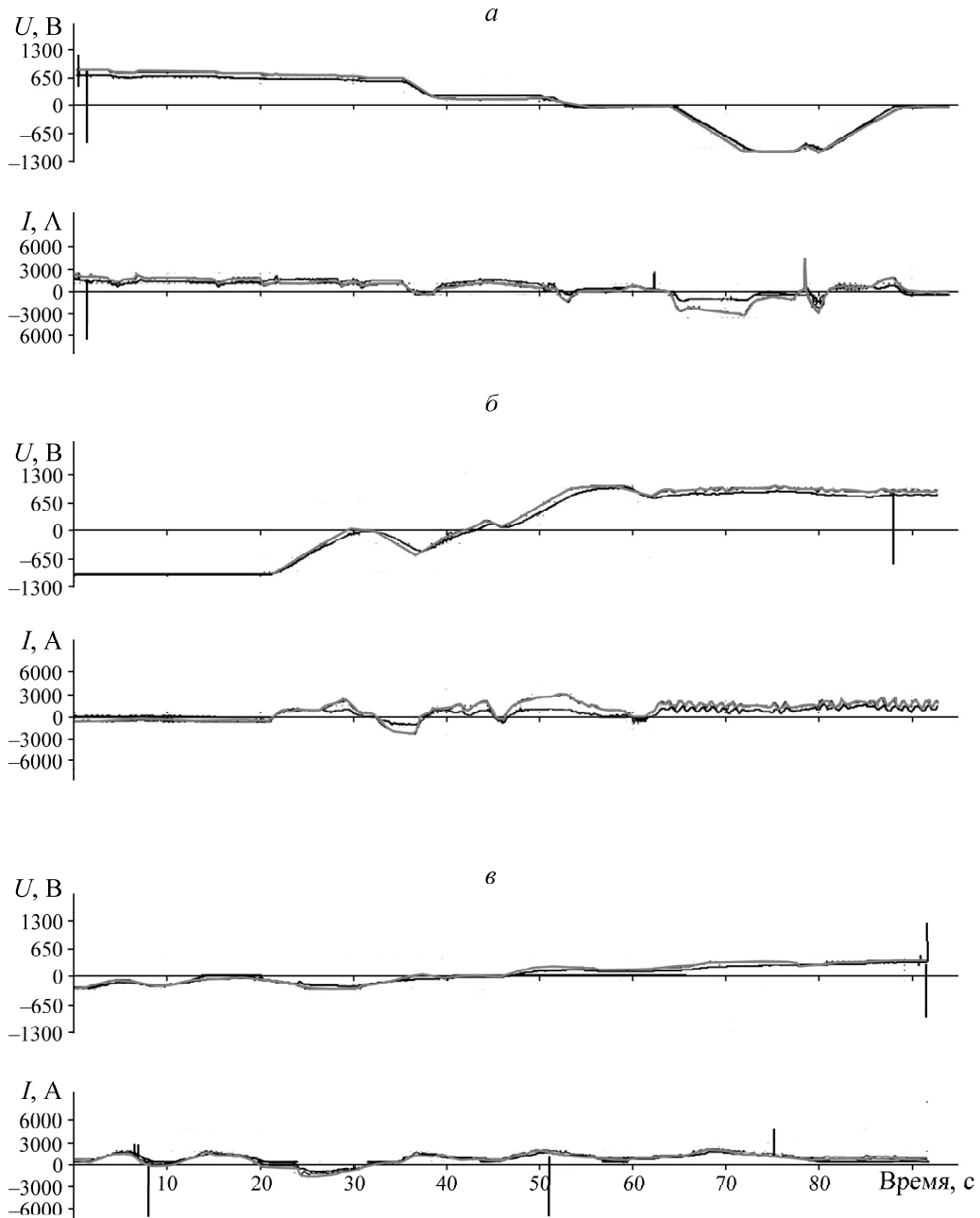


Рис. 5. Кривые заданных значений напряжения и тока в сравнении с кривой действительного значения выходного напряжения цифрового блока управления для системы “генератор–двигатель”: *а* — при подъеме; *б* — тяге; *в* — повороте; — заданные значения; — действительные значения

ТАБЛИЦА 1. Показатели энергопотребления и производительности до и после модернизации

Месяц	До установки цифровой системы управления			После установки цифровой системы управления		
	Энергопотребление, кВт·ч/м <sup>3</sup>	Производительность, м <sup>3</sup>	Удельное энергопотребление, кВт·ч/м <sup>3</sup>	Энергопотребление, кВт·ч/м <sup>3</sup>	Производительность, м <sup>3</sup>	Удельное энергопотребление, кВт·ч/м <sup>3</sup>
I	522000	240100	2.17	263000	132000	1.99
II	464000	178000	2.61	449000	222500	2.02
III	223000	57500	3.88	443000	222000	2.00
IV	268000	74500	3.60	267000	129500	2.06
V	387000	145500	2.66	431000	210500	2.05
VI	482000	171000	2.82	462000	223000	2.07
VII	418000	141000	2.96	525000	207500	2.53
VIII	465000	189000	2.46	312000	168500	1.85
IX	525000	240000	2.19	461000	216500	2.13
X	476000	218000	2.18	431000	217500	1.98
XI	515000	235500	2.19	345000	169200	2.04
XII	525000	237500	2.21	370000	180500	2.05
	Средний показатель		2.66	Средний показатель		2.06

Подробные данные о неисправностях драглайна собирались в течение 18 мес до и после установки цифрового блока управления на основе микропроцессоров. Особенности неисправностей распределялись по категориям в соответствии с подсистемами драглайна. Всего выделено 10 подсистем для проведения анализа неисправностей драглайна. Все двигатели вентиляторов, генераторы, устройства для подачи смазки относятся к категории вспомогательных двигателей; гидравлическая система, цилиндры, башмак и механизмы передвижения — к системе шагания. Системы подъема, тяги и поворота составляют еще одну категорию. Отдельно выделяют выключатель возбуждения и систему главного входа. Главные двигатели постоянного тока, генераторы постоянного тока и синхронный двигатель отнесены к системе двигатели/генераторы; элементы, используемые для освещения, — к осветительной цепи.

В табл. 2 приведены данные о неисправностях за 18 мес до и после модернизации драглайна. Видно, что частота возникающих неисправностей и затраты времени на их восстановление возрастают после установки микропроцессорной системы. Это может быть связано с отсутствием опыта у персонала по ремонту и техническому обслуживанию, что увеличило время, затраченное на установление возникшей неполадки. Поскольку оператор впервые имеет дело с новой системой управления, возникают проблемы из-за неправильных действий персонала. Это сказывается на более продолжительных периодах устранения неполадок при их малой частоте. Например, из-за неправильных действий оператора при управлении механизмом шагания произошла неисправность устройства блокировки башмака, что даже после установки цифрового управления увеличило продолжительность устранения неисправности до 17%. После усовершенствования системы управления драглайном также увеличился процент неисправностей, связанных с низковольтной изоляцией. Данную неисправность можно отнести к незначительной, однако установление локализации неисправности оказалось достаточно трудоемким.

ТАБЛИЦА 2. Данные о неисправностях подсистем драглайна до и после модернизации системы управления, полученные в течение 18 мес

Номер системы	Система	До модернизации драглайна		После модернизации драглайна	
		Частота	Продолжительность, ч	Частота	Продолжительность, ч
1	Вспомогательный двигатель	14	47.5	22	75.5
2	Система шагания	1	1	4	64
3	Механизм тяги	2	30	2	4.5
4	Цепь подъемника	1	16	—	—
5	Система поворота	4	6	1	3.5
6	Выключатель возбуждения	2	4	1	3.5
7	Главный вход	—	—	1	1.5
8	Двигатели/генераторы	7	38	10	116
9	Низковольтная изоляция для механизмов тяги/подъемника/ системы поворота/освещения/ главного входа	—	—	22	99
10	Осветительная цепь	4	3	2	3.5

### ВЫВОДЫ

Усовершенствованное цифровое управление драглайном на основе системы “генератор–двигатель” обеспечило повышенную плавность операций подъема, тяги и поворота, а также более равномерное регулирование показателей. Преимущество системы цифрового управления заключается в более низком удельном энергопотреблении по сравнению с аналоговой системой управления. Однако после проведенной модернизации продолжительность неисправностей и их частота увеличились. Для быстрого обнаружения неисправностей, связанных с низковольтной изоляцией, необходимо увеличить количество сенсоров, которые укажут место неисправности. При соблюдении перечисленных рекомендаций усовершенствованная цифровая система управления может стать одним из способов улучшения показателей стандартной системы управления “генератор–двигатель”, которой оснащен драглайн.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stevens P. S.** Evolution of Ward-Leonard control for shovels and draglines, Transactions of the American Institute of Electrical Eng., 1948, Vol. 67(2), Jan. — P. 1491–1497.
2. **Yeomans K. A.** Ward Leonard Drives – 75 years of development, Electronics and Power, 1968, April.
3. **Krause P. C., Wasynczuk O., and Sundhoff S. D.** Direct-current machines, in analysis of electrical Machinery and Drive Systems, 2nd ed, IEEE Press, Hoes Lane, 2002. — P. 67–104.
4. **Gabor A. Biacs and Milan S. Adzic.** Modeling of the thyristor controlled rectifiers for control of Ward-Leonard system, Int. Symp. on Intelligent Systems and Informatics, 2009, April. — P. 172–175.
5. **Koellner W.** A New all AC gearless drive system for large mining draglines, IEEE Trans on Industry Automation and Control, 2006, October. — P. 1310–1314.
6. **Vaccaro F., Janusz M., and Kühn K.** Digital control of a Ward-Leonard drive system”AFRICON’92 Proc., 3 rd AFRICON Conf., 1992.
7. **Kulkarni A.** Energy consumption analysis for geared elevator modernization: upgrade from DC Ward-Leonard system to AC vector controlled drive, Industry Appl. Conf., 2005, Vol. 4. — P. 2066–2070.

Поступила в редакцию 02/IX 2018  
 После доработки 20/VIII 2019  
 Принята к публикации 04/II 2020