© А.В. Ляхомский, С.В. Вахрушев, Н.Б. Дьячков, В.Б. Малявин, 2006

УДК 621.31:622.73

А.В. Ляхомский, С.В. Вахрушев, Н.Б. Дьячков, В.Б. Малявин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ РУД ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ

Семинар № 21

Моделирование энергетических характеристик технологических электроприемников при измельчении руд черных металлов является первостепенной задачей, так как позволяет характеризовать происходящие процессы при электропотреблении.

Моделирование процесса потребления электроэнергии технологическими электроприемниками позволит на экспериментальной модели определить приемлемое на производстве соотношение потребление / выпуск руды, а, соответственно, и уменьшить расходы предприятия.

Моделирование - это исследование каких-либо явлений, процессов или систем объектов путем построения и изучения их моделей; использование моделей для определения или уточнения характеристик и рационализации способов построения вновь конструируемых объектов.

Для моделирования энергетических характеристик технологических электроприемников при измельчении руд черных металлов использован представительный статистический материал о потреблении электроэнергии энергоемкими потребителями и обогатительным производством в целом, полученный на базе Лебединского горнообогатительного комбината (ЛГОК) за период с 01.08.2004 по 31.08.2005.

При построении математических моделей по экспериментальным данным возникает необходимость решения следующего комплекса задач:

- планирования и проведения экспериментов;
- статистической обработки и анализа результатов экспериментов;
- принятия решений;

В зависимости от требований, предъявляемых к исследуемым объек-там и процессам, для статистической обработки и анализа экспериментальных данных применяются методы регрессивного, ковариационного, дис-персного, факторного, комбинаторного анализа и др.

В настоящее время наиболее используемы методы регрессивного анализа, которые получили широкое применение на практике.

В линейном регрессионном анализе рассматривается связь между зависимой переменной (функцией отклика Y) и несколькими независимыми переменными X_1, X_2, …, X_K. Эта связь представляется в виде математической модели – уравнения регрессии в общем случае:

$y = b + b_1x_1 + b_2x_2 + ... + b_Kx_K$

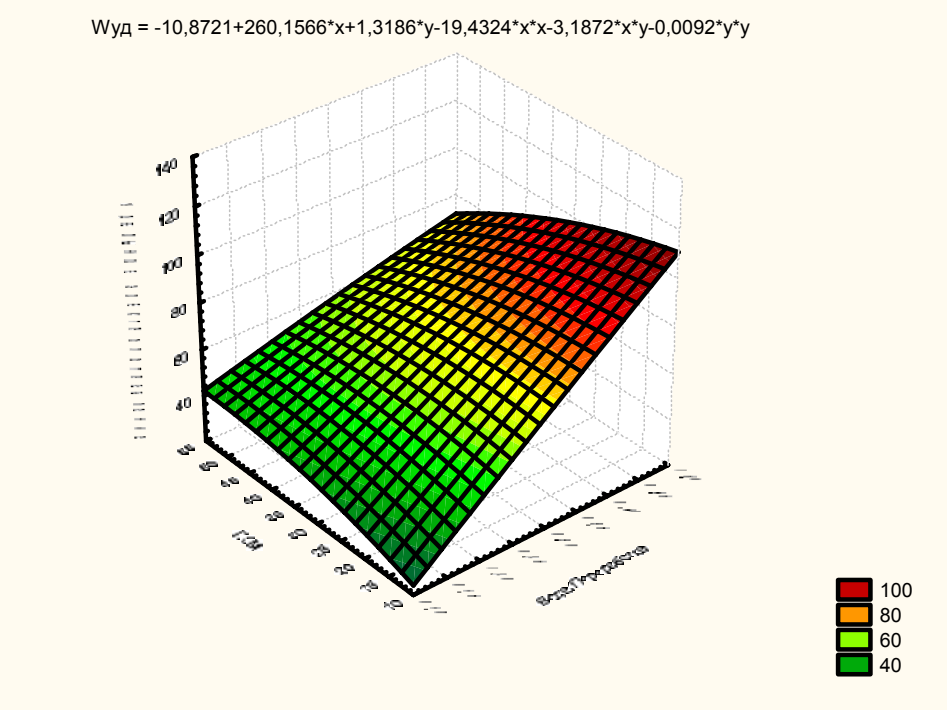


Рис. 1. Аппроксимированный график поверхности зависимости удельного электропотребления от ПЗМ и отношения вода/переработка для полусекции 5-5

Если уравнение регрессии линейно относительно независимых переменных (или параметров), то рассматривается линейная модель (линейный регрессионный анализ). В противном случае имеет место нелинейная модель (нелинейный регрессионный анализ).

С помощью регрессионного анализа на базе экспериментальной информации решаются задачи получения наилучших оценок неизвестных параметров уравнения регрессии, проверки гипотез относительно этих параметров, проверки адекватности выдвигаемой модели. Этот метод позволяет установить возможные связи между переменными и предсказать значения зависимых переменных.

Используя экспериментальную информацию о входных и выходных переменных, решение вышеуказанных задач регрессивного анализа можно осуществить по следующему алгоритму:

1. Выдвижение гипотезы о виде математической модели.
2. Получение экспериментальной информации о входных и выходных переменных исследуемого объекта (проведение эксперимента).
3. Оценивание параметров модели
4. Проверка статистической значимости параметров модели
5. Проверка адекватности модели.

Для оценки коэффициентов уравнения регрессии используется метод наименьших квадратов.

Определение значимости коэффициентов уравнения регрессии b_i ($i = 0,\ldots,K$) сводится к проверке нулевой гипотезы с помощью критерия Стьюдента.

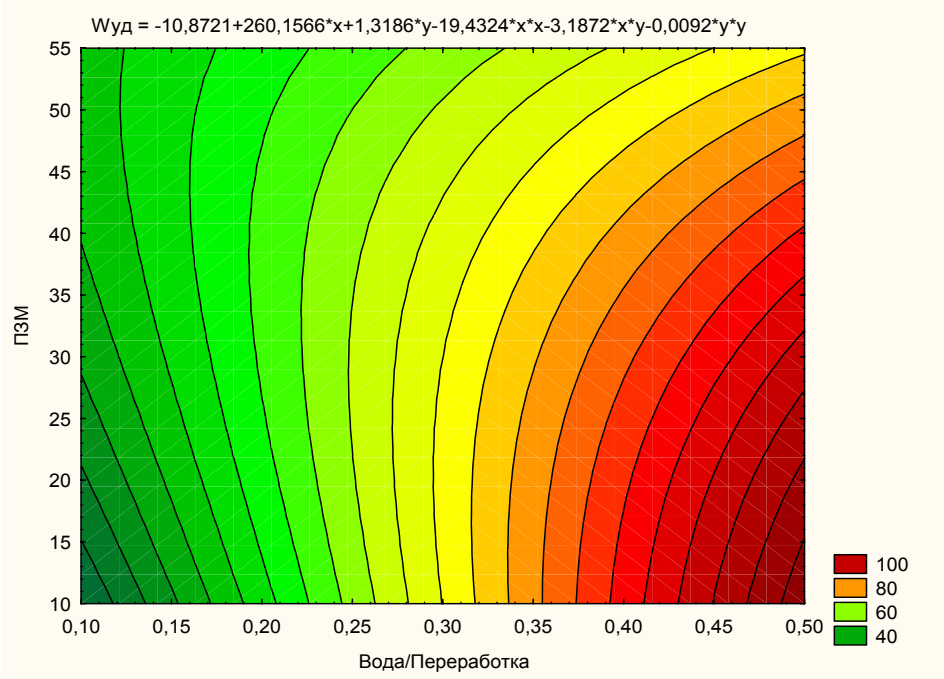


Рис. 2. Аппроксимированный график карт линий уровня удельного электропотребления от ПЗМ и отношения вода/переработка для полусекции 5-5

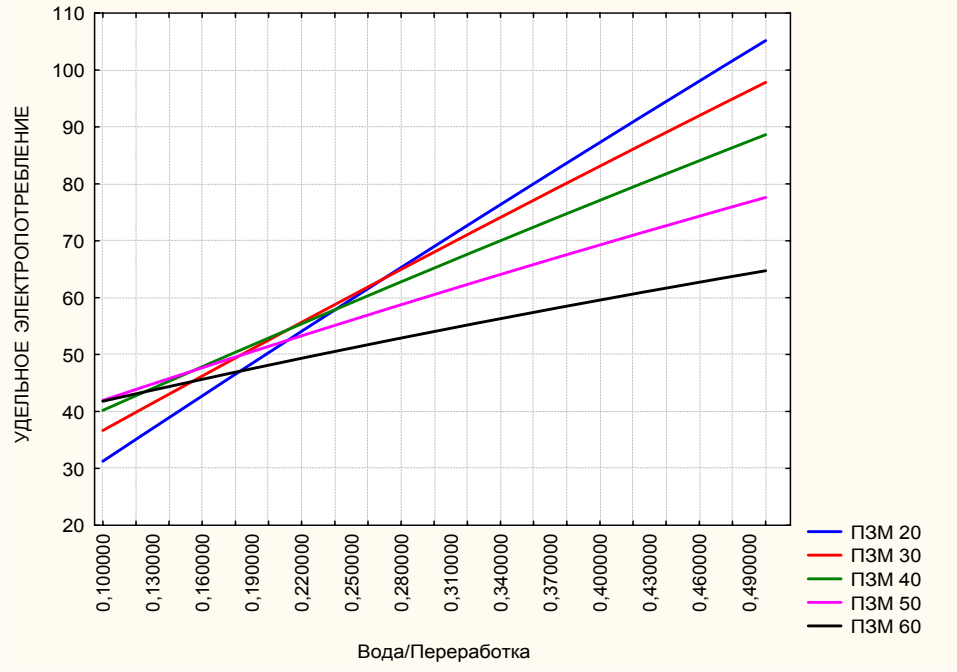


Рис. 3. "Разрезы" графика поверхности зависимости удельного электропотребления от отношения вода/переработка при фиксированном ПЗМ для полусекции 5-5

№ полу-секции	Удельная норма/ПЗМ/(Вода/Переработка)
1-5	Wуд = -4,6421+235,1914*x+1,0687*y-36,765*x*x-1,3303*x*y-0,009*y*y
1-6	Wуд = 41,9422-20,435*x+0,4281*y+305,3306*x*x-1,0574*x*y-0,0014*y*y
2-5	Wуд = 1,1574+133,0272*x+1,5927*y+163,672*x*x-2,9215*x*y-0,0166*y*y
2-6	Wуд = -0,0061+255,9021*x+0,5596*y+191,1179*x*x-6,0931*x*y+0,0091*y*y
3-5	Wуд = 46,7971+20,3007*x-0,3522*y+157,4686*x*x+0,3937*x*y+0,0028*y*y
3-6	Wуд = 34,0917+168,5829*x-0,7352*y+30,0895*x*x-0,8841*x*y+0,0118*y*y
4-5	Wуд = 33,1857-20,5524*x+0,6944*y+281,7951*x*x+0,107*x*y-0,0116*y*y
4-6	Wуд = 69,854-44,7048*x-1,4592*y+216,2038*x*x+1,6287*x*y+0,0149*y*y
5-5	Wуд = -10,8721+260,1566*x+1,3186*y-19,4324*x*x-3,1872*x*y-0,0092*y*y
5-6	Wуд = 27,9383+52,7483*x-0,1803*y+119,9737*x*x+0,3186*x*y+0,0067*y*y
6-5	Wуд = 65,9095+37,1668*x-1,3737*y+387,6092*x*x-2,4019*x*y+0,028*y*y
6-6	Wуд = 44,8061+46,5195*x-0,4042*y+277,9886*x*x-1,5003*x*y+0,0099*y*y
7-5	Wуд = 46,321+37,0333*x-0,4846*y+105,8636*x*x+1,1372*x*y+0,0045*y*y
7-6	Wуд = 37,6962-13,1747*x+0,5773*y+292,8614*x*x-0,2019*x*y-0,0078*y*y
8-5	Wуд = 44,7037+212,674*x-1,2388*y+58,5496*x*x-3,3556*x*y+0,0242*y*y
8-6	Wуд = 110,294-85,2879*x-2,7091*y+219,1014*x*x+1,7519*x*y+0,0265*y*y
10-6	Wуд = 25,9983+124,7544*x-0,1104*y-28,2243*x*x-0,1789*x*y+0,0029*y*y
11-6	Wуд = 74,8372+70,4663*x-2,518*y-90,6372*x*x+1,8027*x*y+0,0277*y*y
12-6	Wуд = 36,1051+64,5031*x-0,4791*y-40,733*x*x+1,6054*x*y+0,0033*y*y
13-6	Wуд = 55,8-16,7519*x-0,8144*y+71,1359*x*x+1,3278*x*y+0,0089*y*y
14-6	Wуд = -29,9298+170,3769*x+2,4552*y-61,9878*x*x-1,4945*x*y-0,0258*y*y
15-6	Wуд = 45,7615+91,9329*x-1,2535*y-32,629*x*x+0,9966*x*y+0,0161*y*y
16-6	Wуд = 50,227-3,1641*x-0,9391*y+198,3648*x*x-0,8609*x*y+0,0178*y*y
17-6	Wуд = 12,3864+72,1853*x+0,4897*y+135,083*x*x-1,5844*x*y+0,0004*y*y
18-1-6	Wуд = 27,3237+8,5755*x+0,564*y+54,8863*x*x-0,044*x*y-0,0026*y*y
18-2-6	Wуд = 10,8628+281,3299*x-0,8875*y-171,8274*x*x-2,2742*x*y+0,0226*y*y
19-1-6	Wуд = -40,7415+332,6789*x+1,4781*y-374,3737*x*x-0,5965*x*y-0,0146*y*y
19-2-6	Wуд = 34,4081+317,3267*x-2,1444*y-29,2491*x*x-5,3719*x*y+0,0505*y*y
20-1-6	Wуд = 7,2024+20,0907*x+1,0182*y-108,8244*x*x+2,9396*x*y-0,0162*y*y
20-2-6	Wуд = 83,5425+165,3433*x-3,0413*y-105,2382*x*x-0,5346*x*y+0,0398*y*y
21-1-6	Wуд = -50,0012+192,7169*x+2,798*y-33,8602*x*x-2,6069*x*y-0,0199*y*y
21-2-6	Wуд = -51,8323+197,0319*x+3,3614*y+101,5335*x*x-5,0192*x*y-0,0219*y*y
21-3-6	Wуд = 30,6245+81,282*x-0,2939*y-118,8431*x*x+1,7439*x*y+0,0025*y*y
21-4-6	$W_{уд} = -2,0175 + 112,028x + 1,2656y + 1,255xx - 1,3123xy - 0,0058yy$

Проверка адекватности модели осуществляется с помощью критерия Фишера. Используя вышеописанную методику, определяются линейные модели зависимости электропотреб-ления основ-

ного потребителя измельчительного ряда, мельницы мокрого самоизмельчения.

Анализ статистического материала показывает, что уравнение зависимости может иметь вид:

$W\ (R, V_в / V_р) \rightarrow \min.$

где W – удельное электропотребление ММС; R – уровень загрузки мельницы; $V_в$ – объем воды подаваемой в мельницу; $V_р$ – объем руды переработанной мельницей.

Уравнение зависимости удельного электропотребления от уровня загрузки мельницы и отношения вода/переработка выглядит следующим образом:

$$W_{уд} = b_o + b_1 x + b_2 y + b_{11} xx + b_{12} xy + b_{22} yy$$

где $W_{уд}$ – удельное электропотребление; x – отношение вода/ переработка; y – процент загрузки мельницы (ПЗМ).

Результаты регрессионного анализа представлены в таблице.

Графическое отображение формул представляет собой аппроксимированные поверхности (рис. 1), позволяющие наглядно определить значение электропотребления при соответствующих параметрах: отношение вода/переработка, процент загрузки мельницы (ПЗМ).

При проекции данной поверхности на плоскость получаем аппроксимированный график карт линий уровня (рис. 2).

При фиксированном значении одного из факторов возможно вырождение поверхности в двумерный график (рис. 3), фактически являющийся разрезами поверхности, что позволяет более точно характеризовать удельное электропотребление.

Полученные зависимости целесообразно использовать для управления электропотреблением с целью повышения энергоэффективности обогатительного производства.

Реализация вышеприведенных математических моделей приведет к получению оптимальных характеристик для процесса управления и стабилизации энергетических режимов работы технологического оборудования. Вместе с этим результаты работы целесообразно использовать при нормировании электропотребления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рыжов П.А.* Математическая статистика в горном деле – М.: Высшая школа, 1973.
2. *Боровиков В.* STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов. 2-е. изд. – СПб.: Питер, 2003.
3. *Елисеева И.И., Юзбашев М.М.* Общая теория статистики – М.: Финансы и статистика, 2000.

Коротко об авторах

Ляхомский А.В. – профессор, доктор технических наук,
Вахрушев С.В. –
Дьячков Н.Б., Малявин В.Б. – аспиранты,

кафедра «Электрификация горных предприятий», Московский государственный горный университет.

© Н.М. Кузнецов, В.И. Щуцкий, 2006

УДК 658.26:658.511.3

Н.М. Кузнецов, В.И. Щуцкий

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОАО «АПАТИТ»

Семинар № 21

Потребление электроэнергии в горной промышленности зависит от множества горно-технологических факторов, большинство которых в настоящее время не учитывается при анализе и планировании на всех уровнях. В связи с этим необходимо установление взаимосвязей между технологическими и энергетическими режимами производственных процессов. При этом во многих случаях оптимальным режимам электропотребления соответствует максимальная производительность технологического оборудования с минимальными удельными расходами электроэнергии. Поэтому интенсификация производственных процессов и улучшение их организации почти всегда обуславливают экономию электроэнергии. В этом смысле удельный расход электроэнергии представляет собой обобщающий показатель технико-экономического уровня производства в целом.

В изменяющихся условиях деятельности горных предприятий важным является анализ электропотребления для оценки затрат электроэнергии. Для исследования и планирования электропотребления, разработки методики нормирования расхода электроэнергии в условиях ОАО «Апатит» необходимо установление энергоемкости каждого технологического передела и места, занимаемого этим переделом в балансе электропотребления.

Структура потребления электрической энергии предприятиями ОАО «Апатит» представлена на рис. 1. Обогатительное производство как одно из самых энергоемких переделов составляет существенную часть в балансе электрической энергии. Одним из основных показателей электропотребления предприятий являются удельные расходы электроэнергии на единицу продукции (рис. 2). Для установления энергетических характеристик наиболее целесообразен способ пассивного эксперимента, при котором регистрация контролируемых технологических и энергетических параметров производится в режиме нормальной работы без внесения каких-либо преднамеренных возмущений. Однако при этом необходимо иметь в виду, что расход электроэнергии и выпуск продукции за любой период времени, зависящие от многих факторов, являются случайными величинами. Погрешность определения электропотребления определяется величиной ошибок технологических параметров и видом зависимости расхода электроэнергии. При расчетах и планировании расхода электроэнергии необходимо уменьшать число учитываемых технологических показателей производства и рассматривать только те, которые оказывают непосред-

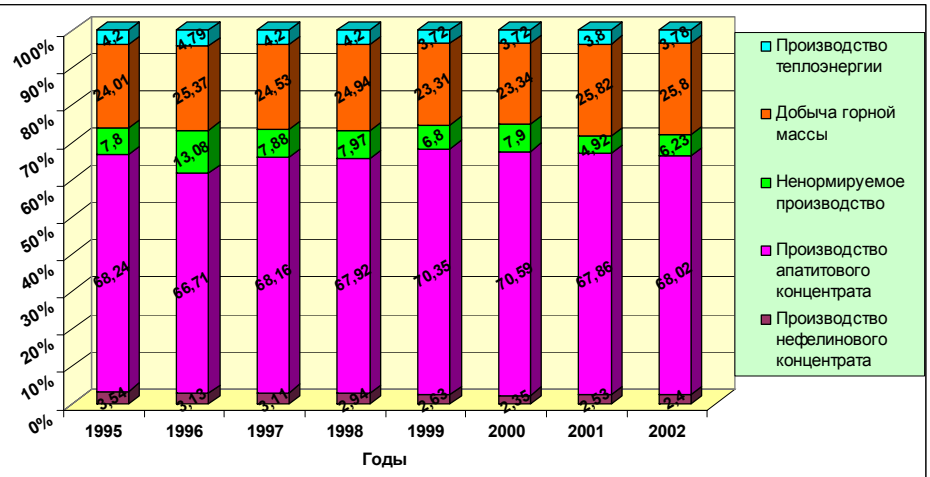


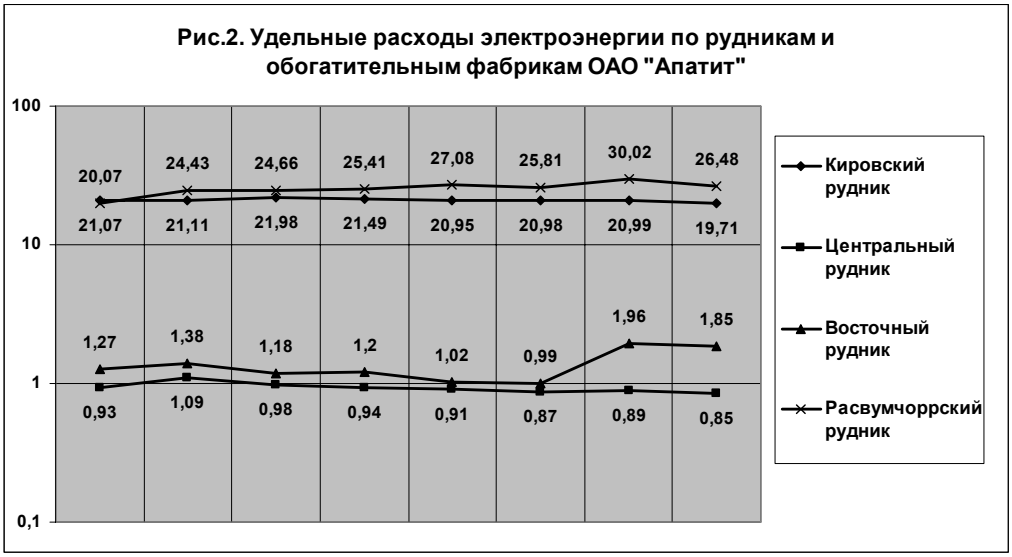
Рис.1. Структура электропотребления ОАО "АПАТИТ"

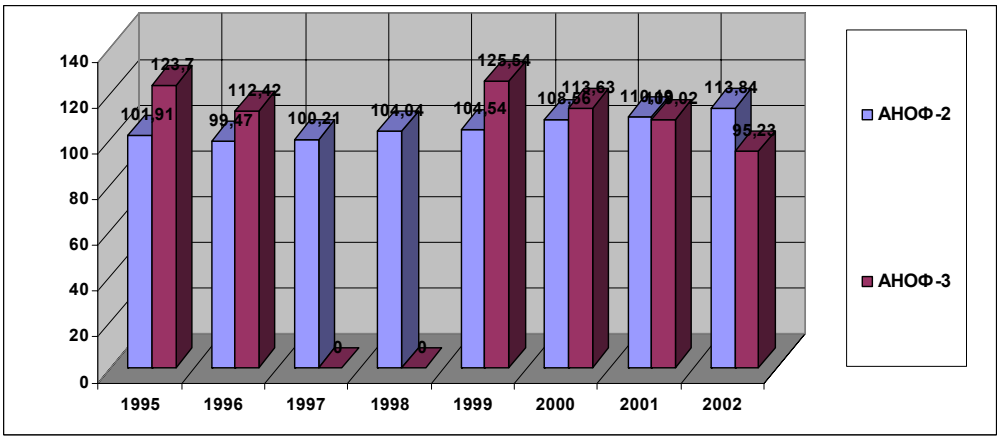
ственное влияние на величину электропотребления.

При подземной добыче руды режимы работы горного оборудования определяются горно-геологическими условиями и технологическими схемами разработки. Основными потребителями электрической энергии при открытой добыче руды являются экскаваторы и буровые станки. Нахождение и использование энергетических характеристик трудоемкая задача из-за большого количества машин и механизмов, имеющих различные конструктивные особенности и режимы работы. Поэтому для анализа и планирования электропотребления при добыче руды необходимо определять закономерности электропотребления в целом по карьерам и рудникам.

Для практического использования энергетических характеристик необходимо рассматривать показатели, которые учитываются в процессе производства. Это позволяет проводить анализ, контроль и планирование электропотребления. При определении влияния на расход электрической энергии при подземной и открытой добыче апатито-нефелиновой руды учитываются следующие факторы: добыча горной массы, добыча руды, проходка горных выработок, вскрыша. Анализ коэффициентов корреляционных матриц показывает, что наибольшее влияние на электропотребление оказывает добыча горной массы. Энергетические характеристики по рудникам при добыче апатито-нефелиновой руды приведены на рис. 3.

Обогатительное производство является самым энергоемким и составляет около 70 % в балансе потребления электрической энергии ОАО «Апатит». Наиболее энергоемкими потребителями на обогатительных фабриках являются процессы измельчения, флотации и сушки, которые потребляют более 80 % электроэнергии. Анализ энерготехнологических данных показал, что для обогатительных фабрик наблюдается постоянное увеличение удельных расходов электроэнергии, что связано с уменьшением содержания полезного компонента в руде (рис. 4).





Расход электроэнергии обогатительной фабрики состоит из двух составляющих: постоянной, не зависящей от величины выпуска продукции, и переменной, в первом приближении прямо пропорциональной величине выпуска продукции. Поэтому при анализе и нормировании электропотребления важную роль играют энергетические характеристики, которые выражают зависимость электропотребления от уровня производственной программы, т.е. от количества выпускаемой продукции и от факторов, влияющих на электропотребление. Для условий обогатительной фабрики причинами, серьезно влияющими на уровень производства, являются недопоставка руды, срывы в материально-техническом снабжении (обеспечение основными материалами и реагентами), поставка вагонов под отгрузку готовой продукции, аварийность оборудования и др. Из-за высокой энергоемкости обогатительных производств анализ влияния выпуска продукции на энергетические затраты имеет большое значение. Диапазон построения энер-

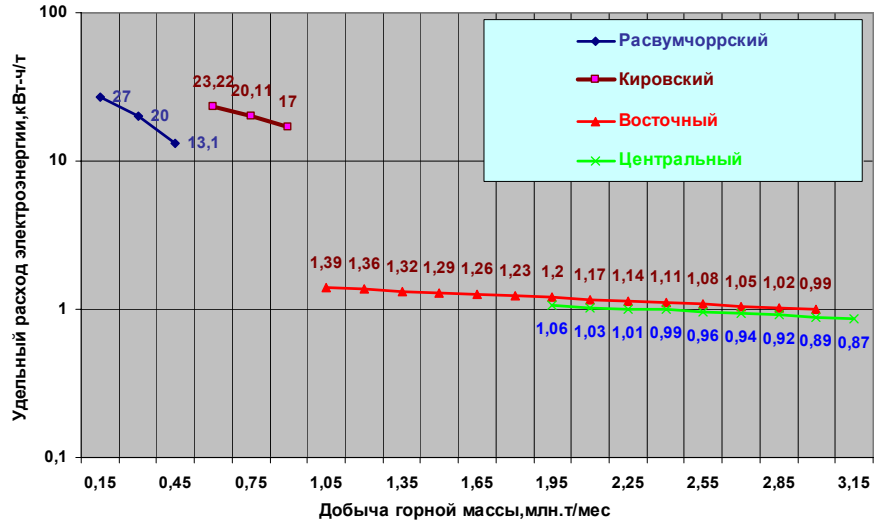


Рис.3. Энергетические характеристики рудников

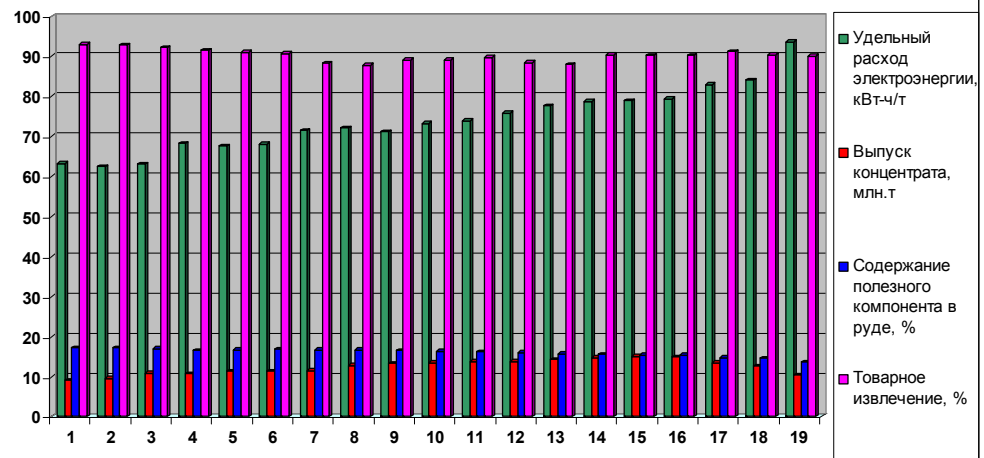


Рис.4. Электротехнологические показатели АНОФ-2

гетических характеристик определяется индивидуально для каждого производства характерными пределами колебания выпуска продукции (рис. 5).Учет основных технологических показателей при анализе электропотребления повышает научную обоснованность и точность определения норм удельного расхода электроэнергии (рис. 6).

Анализ полученных удельных расходов электроэнергии производится путем сравнения фактических и расчетных показателей отчетного года с использованием прогнозной модели электропотребления. Результаты анализа целесообразно использовать для количественной оценки степени влияния изменения производственных и технологических факторов на изменение удельных расхо-

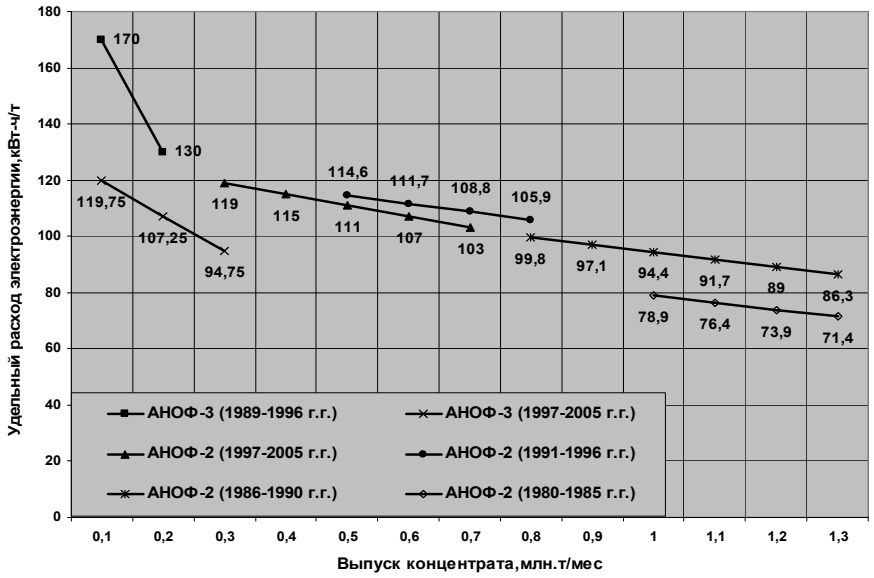


Рис.5. Энергетические характеристики обогатительных фабрик

дов электроэнергии. Достоверность математических моделей электропотребления оценивается коэффициентом соответствия, который определяется отношением фактического удельного расхода электроэнергии в отчетном году к удельному расходу электроэнергии, рассчитанному по значениям факторов, которые сложились в отчетном году. При прогнозировании электропотребления с достаточной точностью для практических расчетов можно применять математическую модель, если коэффициент соответствия изменяется от 0,95 до 1,05 (рис. 7).

При планировании электропотребления на перспективу необходимо учитывать изменение удельного расхода электроэнергии при проведении мероприятий по экономии электрической энергии.

Спрос на энергию в рыночных условиях определяется тремя главными факторами – развитием экономики, эффективностью энергоиспользования и динамикой цен на энергоносители, которые тесно взаимосвязаны и совместно формируют возможные сценарии развития экономики. Поэтому проведение мероприятий по энергосбережению имеет важное значение.

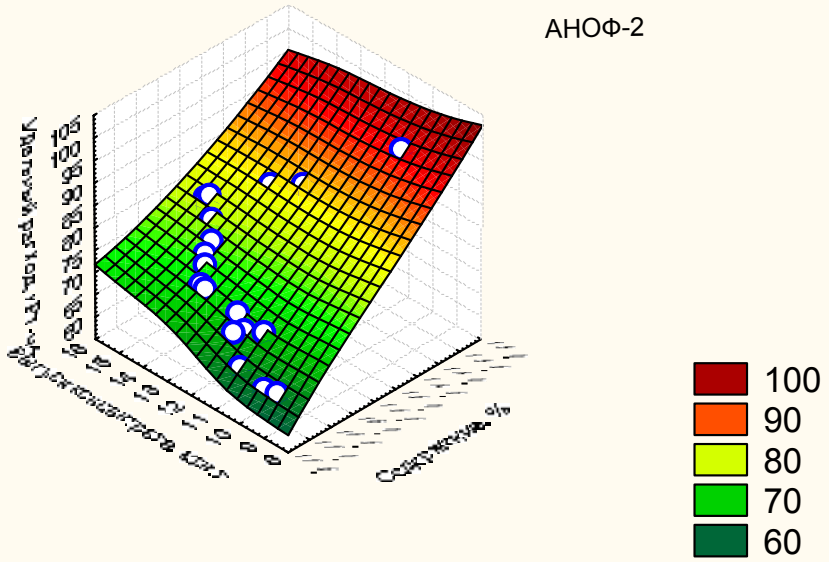
Проекты по энергосбережению выполняются в пять этапов: идентификация проекта, сканирование, энергоаудит, осуществление, работа (рис. 8). Этап идентификации проекта включает:

- диалог со специалистами предприятий, для которых предполагается выполнение проекта энергосбережения;
- сбор энерготехнологической информации;
- оценку возможностей предприятия и его интереса к осуществлению проекта энергосбережения.

Если идентификация проекта покажет, что его осуществление будет положительным, то процесс выполнения проекта энергосбережения

Рис. 6. Зависимость удельного расхода электроэнергии от выпуска концентрата и содержания полезного компонента в руде

Рис.6. Зависимость удельного расхода электроэнергии от выпуска концентрата и содержания полезного компонента в руде



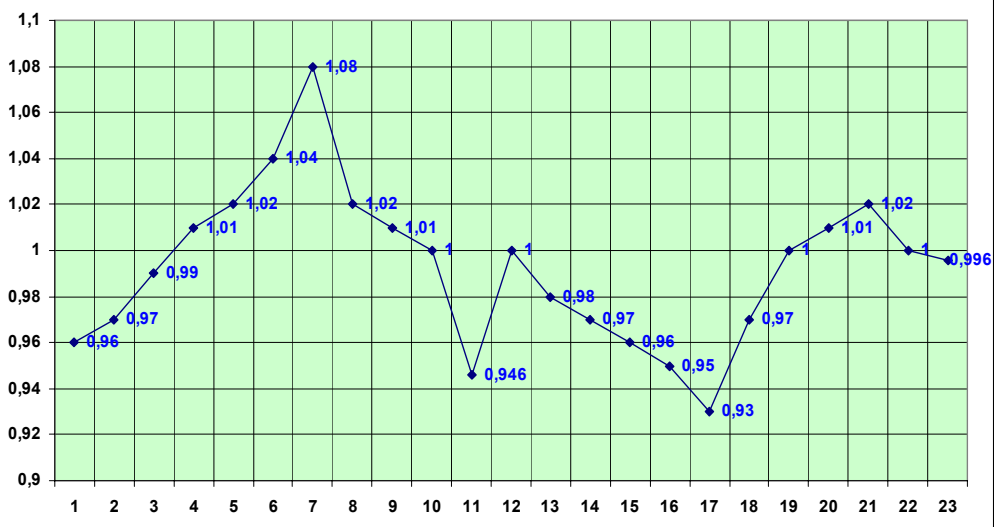


Рис.7. Коэффициент соответствия

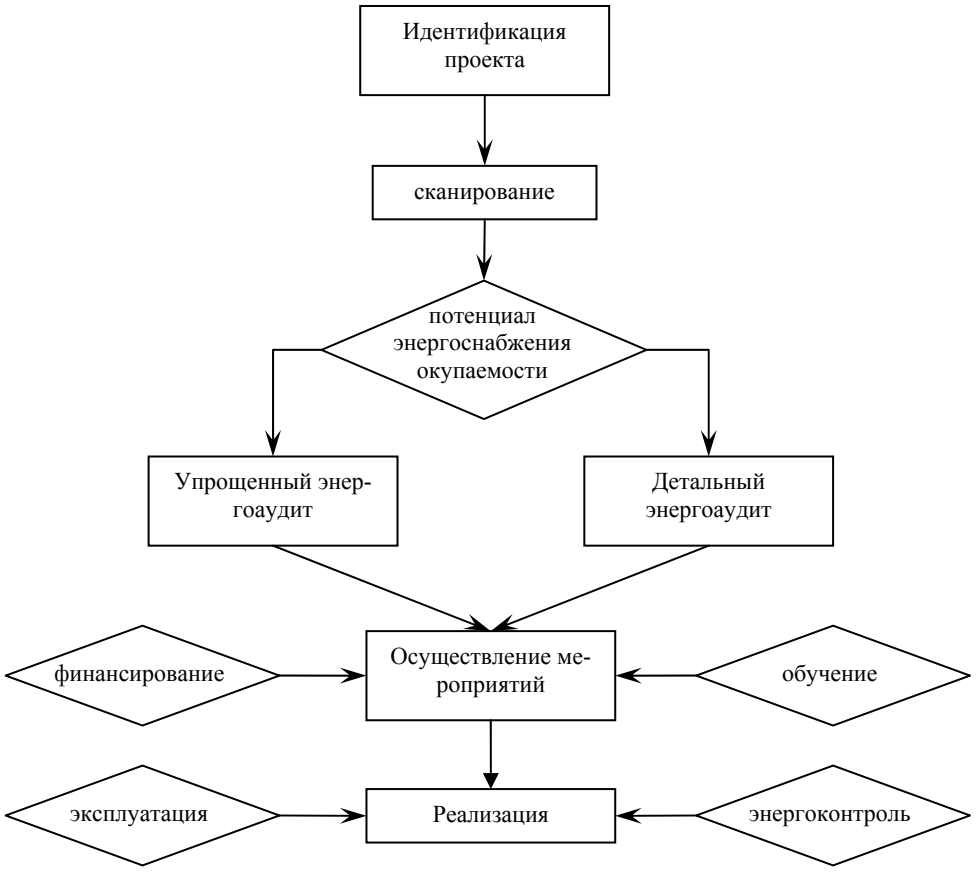


Рис. 8. Блок-схема реализации проекта энергосбережения

продолжается на стадии сканирования, где определяется экономия энергии и получаемая прибыль.

При решении продолжить выполнение проекта энергосбережения выполняется этап энергоаудита, в результате которого определяется экономия и окупаемость каждого энергосберегающего мероприятия энергосберегающего проекта.

Следующим этапом выполняется осуществление намеченных мероприятий по энергосбережению, который включает в себя следующие пункты: проектирование, руководство проектом, контроль за доставкой энергосберегающего оборудования, обучение персонала, строительная документация, энергоуправление, мониторинг, помощь в обслуживании энергосберегающего оборудования.

Анализ электропотребления выполняется на информационно-моделирующей системе, которая постро-ена на основе концепции единства исследуемые системы с различной степенью детализации и на разных иерархических уровнях в соответствии с многоуровневым характером изучаемых систем.

Программное обеспечение включает общесистемные и прикладные программы, предназначенные для реализации математических моделей, организации вычислительных процедур, обеспечение диалога пользователя с системой, выдача информации в удобном для пользователя виде. Программы должны разрабатываться на основе модульного принципа, обеспечивающего наращиваемость и нерасстраиваемость структуры комплекса. Другими словами, базовым строительным блоком и наименьшей заменяемой единицей модели является программный модуль, воплощающий расчетную методику или алгоритм обслуживания. Связи между модулями должны иметь иерархическую структуру: связи верхнего уровня, определяющие конфигурацию системы, и связи нижнего уровня – по входу и выходу.

Техническое обеспечение базируется на использовании современных средств вычислительной техники, обладающих необходимым быстродействием, объемом памяти и широким набором сервисных возможностей, предоставляемых пользователю.

Анализ энергопотребления предприятия, проводимый системой, дает возможность прогнозировать электропотребление, разрабатывать рекомендации по формированию политики технического перевооружения, рассчитывать как плановые, так и фактические удельные расходы электроэнергии при отклонении технологических параметров от плановых, указывая при этом, какие факторы повлияли на изменение удельных расходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кузнецов Н.М.* Особенности прогнозирования энергопотребления в горнорудной промышленности // Проблемы энергообеспечения Мурманской области. - Апатиты, 1992.- с.94-96.
2. *Кузнецов Н.М., Коробко Ю.Г., Токарева Е.А.* Информационно-моделирую-щая система анализа энергопотребления промышленного предприятия // Энергетика Мурманской области в переходный период. – Апатиты, 1994.–с.113-126.
3. *Кузнецов Н.М., Щуцкий В.И.* Рациональное энергопотребление на горнодобывающих и горно-обогатительных предприятиях. – Апатиты, 1997.- 211 с.

Коротко об авторах

Кузнецов Н.М. –кандидат технических наук, доцент,
Щуцкий В.И. – профессор, доктор технических наук,

Московский государственный горный университет.

© Г.М. Петров, Я.А. Жигарловский, 2006

УДК 621.316.176

Г.М. Петров, Я.А. Жигарловский

ВЛИЯНИЕ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ КАРЬЕРА

Семинар № 21

Широкое использование электрической энергии при всевозрастающих темпах развития открытых горных работ, дальнейший рост энерговооруженности производства, повсеместная механизация работ на карьерах определяют необходимость глубокого и всестороннего изучения работы электроустановок с точки зрения обеспечения безопасности и бесперебойности электроснабжения потребителей. При эксплуатации электрифицированного железнодорожного транспорта на карьерах работа контактной сети протекает в условиях воздействия на нее механических, метеорологических, химических и других факторов, вызывающих в некоторых случаях короткие замыкания. Особенностью работы электротяговой сети является возможность возникновения в ней коротких замыканий с большими токами короткого замыкания на землю (металлическое замыкание контактного провода на рельсы вблизи тяговой подстанции) и коротких замыканий с малыми токами, сравнимыми с токами нагрузки (касание ковшом экскаватора контактного провода, замыкание контактного провода на землю через горную массу в думпкаре, обрыв контактного провода и падение его на землю). Бесперебойность и безопасность работы карьерного электрифицированного транспорта зависит от надежной защиты тяговых сетей, как от больших токов, так и от малых токов короткого замыкания на землю.

Защита от коротких замыканий с большими токами удовлетворительно осуществляется максимальными токовыми защитами автоматических выключателей, но защита от малых токов сопряжена с рядом трудностей. До настоящего времени, несмотря на разнообразие методов, не существует универсальной и эффективной защиты, надежно работающей при коротких замыканиях с малыми токами замыкания на землю. При создании такой защиты следует обратить внимание на устройство заземления карьерного экскаватора, работающего на погрузке горной массы в думпкары электрифицированного железнодорожного транспорта.

Заземление экскаватора карьерной электрической сети осуществляется подсоединением к общему заземляющему устройству карьера, которое состоит из главного заземлителя, магистрали заземления, заземляющих проводников и местных заземлителей. Сопротивление общего заземляющего устройства должно быть не более 4 Ом. В качестве главных заземлителей должны использоваться заземлители подстанций напряжением 35/10–6 кВ и естественные заземлители. Для питания электропотребителей карьера применяются электрические сети напряжением не выше 35 кВ с изолированной нейтралью

трансформаторов или заземленной через высокоомные резисторы либо трансформаторы ста-билизации сети. Токи однофазного замыкания на землю в данных сетях находятся в пределах до 10А.

Питание электрифицированного карьерного железнодорожного транс-порта осуществляется от тяговых подстанций постоянного или переменного тока. Постоянный (выпрямленный) ток используется напряжением 1650 и 3300 В. В качестве переменного тока используется однофазный переменный ток промышленной частоты напряжением 10,5 и 27,5 кВ. В частности, на Лебединском ГОКе питание карьерного железнодорожного транспорта осуществляется от трехфазной электрической сети напряжением 10,5 кВ с глухозаземленной нейтралью трансформатора. Токи однофазного замыкания на землю в данных сетях могут достигать больших величин (до 10000 А).

На корпусе карьерного экскаватора, работающего на погрузке горной массы в думпкары электрифицированного железнодорожного транспорта, вследствие касания ковшом экскаватора контактного провода, может оказаться ток на несколько порядков выше тока однофазного замыкания на землю карьерной электрической сети. Величина этого тока недопустима для заземляющей сети карьера и может вывести ее из строя (могут выйти из строя кабели, а также аппаратура управления и защиты). Вместе с этим возникают и другие дополнительные опасности:

- увеличивается напряжение прикосновения к корпусу экскаватора;
- создается напряжение прикосновения на всем оборудовании карьера за счет выноса потенциала по заземляющим проводам ЛЭП и кабелей 6 кВ;
- создается перенапряжение в низковольтной аппаратуре СЦБ и связи, приводящие к пробою изоляции и последующему ее выходу из строя.

Снижение опасности поражения электрическим током при касании ковшом экскаватора контактного провода может быть достигнуто за счет мероприятий трех направлений [1]:

- исключение возможности касания ковшом экскаватора контактного провода, находящегося под рабочим напряжением;
- мгновенное отключение тяговой сети при касании ковшом экскаватора контактного провода;
- снижение опасных напряжений прикосновения и ограничение их распространения по общей сети заземления.

К мероприятиям первого направления относятся исключение возможности опасного приближения ковша экскаватора к контактному проводу или снятие рабочего напряжения с контактного провода во время погрузки полезного ископаемого или грунта экскаватором. В частности, здесь могут использоваться устройства, не допускающие непосредственного касания ковшом экскаватора контактного провода, использующие различные принципы построения защиты (например, емкостной).

К мероприятиям второго направления относится применение защит различного принципа действия. В частности, могут быть применены устройства защиты, реагирующие на резкое возрастание тягового тока (такие защиты должны обладать высоким быстродействием) или тока, протекающего по заземляющему контуру карьера. Принципиально возможно применение устройств, создающих искусственное замыкание тяговой сети с целью увеличения аварийного тока.

К мероприятиям третьего направления относится заземление каждого экскаватора на индивидуальный заземляющий контур или соединение корпуса экскаватора с

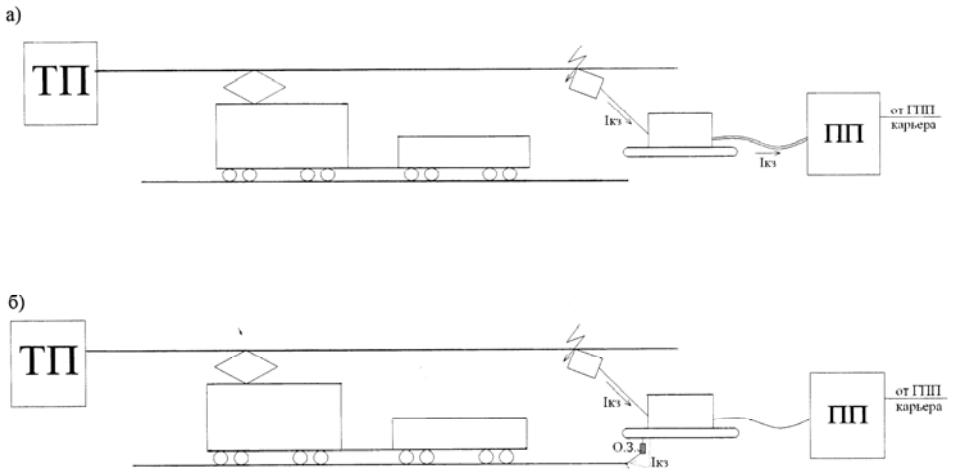


Рис. 1. Заземление экскаватора, работающего на погрузке горной массы, на общее заземляющее устройство (а) и на обособленный заземлитель, металлически связанный с рельсами железнодорожных путей (б)

рельсами в момент касания ковшом контактного провода.

Согласно ЕПБ [2] заземление экскаваторов (рис. 1), работающих на погрузке горной массы в забоях с контактными сетями электрифицированного транспорта, должно осуществляться:

- на общее заземляющее устройство (рис. 1, *а*) при оборудовании забойной контактной сети защитой, отключающей напряжение контактной сети при прикосновении ковша экскаватора к контактному проводу;

- на обособленный заземлитель (рис. 1, *б*), металлически не связанный с общей сетью заземления, но металлически связанный с рельсами железнодорожных путей горного участка, при отсутствии защиты, реагирующей на прикосновение ковша к контактному проводу.

Общее заземляющее устройство должно включать в себя заземляющую сеть карьерной электрической сети и заземляющую сеть электрифицированного железнодорожного транспорта, связанную с рельсами. В этом случае защита, отключающая напряжение контактной сети при прикосновении ковша экскаватора к контактному проводу, должна снять напряжение за малый промежуток времени, при котором бы ток однофазного замыкания на землю не нанес урон электрохозяйству карьерной электрической сети. В этом случае защита должна быть мгновенного действия.

При эксплуатации карьерных тяговых сетей ощущается необходимость в защите как мгновенного действия, реагирующей на токи замыкания, перегрузки и касания ковшом экскаватора контактного провода, так и от малых токов замыкания на землю с выдержкой времени. Задача последней защиты – отключение тяговой сети при замыканиях контактного провода на груз в думпкаре или при его падении на землю, что также небезопасно.

Данные виды защит используют различные принципы, в основе которых заключается отключение только токов замыкания на землю, но которые не реагируют на тяговые нагрузки контактной сети. На рисунке представлена структурная схема защиты от малых

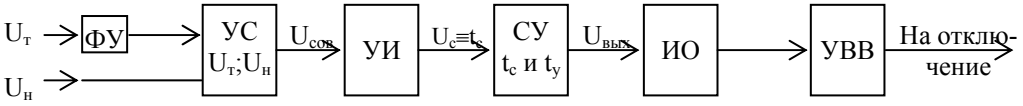


Рис. 2. Структурная схема защиты от малых токов замыкания

токов замыкания, которая отключает контактную электрическую сеть от чисто активного тока (ток замыкания) и не отключает от активно-индуктивного тока (тяговая нагрузка).

На схеме (рис. 2) представлены: ФУ – фазосдвигающее устройство; УС – устройство совпадения; УИ – устройство интегрирования; СУ – сравнивающее устройство; ИО – исполнительной орган; УВВ – устройство ввода-вывода.

Напряжение $U_т$ через фазосдвигающее устройство ФУ и напряжение $U_н$ подаются на схему совпадения УС, определяющую время t_c совпадения положительных полунапряжений $U_т$ и $U_н$. На выходе УС получаются прямоугольные импульсы напряжения $U_{сов}$ продолжительностью t_c. С помощью интегрирующей схемы УИ получают напряжение $U_c \equiv t_c$. Полученное напряжение, пропорциональное t_c, сравнивается с эталонным $U_{эт} \equiv t_у$ в устройстве СУ, на выходе которого появляется результирующее напряжение, подаваемое на исполнительный орган ИО. При $U_c > U_{эт}$ ИО срабатывает. При $U_c < U_{эт}$ ИО не срабатывает. Импульс на отключение подается с выдержкой времени, получаемой на элементе УВВ после срабатывания исполнительного органа.

Как показал анализ существующих защитных устройств от опасных последствий касания ковшом экскаватора контактного провода, защита от данного аварийного режима может быть построена на двух принципах: на предупреждении прикосновения ковша экскаватора к контактному проводу или на отключении тяговой сети при касании ковшом контактного провода. Наиболее эффективным представляется комплексное применение этих способов, т.к. при этом удается обеспечить как бесперебойность питания электровозного транспорта и экскаваторов, так и надежную защиту от последствий касания ковшом контактного провода.

Разработка комплексной защиты связана с созданием устройств, не допускающих приближения ковша экскаватора к контактному проводу, находящемуся под напряжением, и устройств, отключающих тяговую сети при касании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Электрификация* открытых горных работ: Учебник для вузов /С.А. Волотковский, В.И. Щуцкий, Н.И. Чеботаев и др. – М.: Недра, 1987.

2. *Единые* правила безопасности при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. – М.: Госгортехнадзор России, 2003.

Коротко об авторах

Петров Г.М., Жигарловский Я.А. – Московский государственный горный университет.

© Р.М. Валиев, В.И. Попельнюхов,

В.Н. Фащиленко, 2006

УДК 621.879

Р.М. Валиев, В.И. Попельнюхов, В.Н. Фащиленко

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУР УПРАВЛЕНИЯ ЭКСКАВАТОРНЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ В СТОПОРНЫХ РЕЖИМАХ

Семинар № 21

Увеличение единичной мощности главных электроприводов одноковшовых экскаваторов-мехлопат означает увеличение динамических нагрузок. Наиболее ярко это проявляется в электромеханических системах (ЭМС), содержащих упругие элементы, такие как канаты напора и подъема одноковшовых экскаваторов. Упругие усилия (моменты) носящие колебательный характер способствуют накоплению усталостных напряжений в элементах ЭМС, способствуют их быстрому износу и т.п. [1] Поэтому такие динамические нагрузки необходимо ограничивать на максимально допустимом уровне.

Известно, что работа экскаватора характеризуется двумя режимами работы, которые достаточно сильно отличаются друг от друга: это собственно режим копания (черпание породы) и режим стопорения рабочего органа (ковша). В первом случае электродвигатели главных механизмов работают приблизительно с номинальными моментами и значения этих моментов ограничены максимально допустимыми значениями. Упругие моменты не превышают максимального значения, но носят колебательный характер. Во втором же случае моменты, возникающие в упругих элементах ЭМС, могут превышать максимально допустимые в 3 и более раз и имеют большую колебательность.

Стопорный режим является аварийным режимом работы экскаватора, так как происходит практически мгновенная остановка рабочего органа и запасенная кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию деформации канатов, редукторов и т.п., что может привести к обрыву каната или поломке редуктора.

Так как стопорный режим быстротекущий процесс, то ограничение динамических нагрузок должно производиться в автоматическом режиме, без участия машиниста.

Ограничение динамических нагрузок в упругих элементах нужно производить в обоих случаях (и в режиме копания и в режиме стопорения рабочего органа) [2]. Однако режим стопорения является наиболее тяжелым режимом работы и поэтому ограничение динамических нагрузок в этом режиме наиболее целесообразно и необходимо.

Для рассмотрения переходных процессов, происходящих в режиме стопорения, были получены следующие собственные операторы переда-точных функций для систем УВ–Д и Г–Д с ТВ:

– ЭМС УВ-Д (И – регулятор тока) и Г–Д с ТВ (ПИ – регулятор тока)

$$Д(p) = p^5 T_{pm} T_п T_я \frac{T_1^2}{\lambda_2 + \lambda_3} + p^4 T_{pm}(T_п + T_я)\frac{T_1^2}{\lambda_2 + \lambda_3} +$$

$$+ p^3 (T_п T_я + T_1^2)\frac{T_{pm}}{\lambda_2 + \lambda_3} +$$

$$+ p^2 (\frac{T_{pm}}{\lambda_2 + \lambda_3}(T_п + T_я) + T_1^2 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_3}) +$$

$$+ p(T_{pm} + T_н + \lambda_1 \gamma \frac{T_1^2}{T_м})\frac{1}{\lambda_2 + \lambda_3} + 1;$$

– ЭМС УВ-Д (ПИ – регулятор тока) и Г–Д с ТВ (ПИД – регулятор тока)

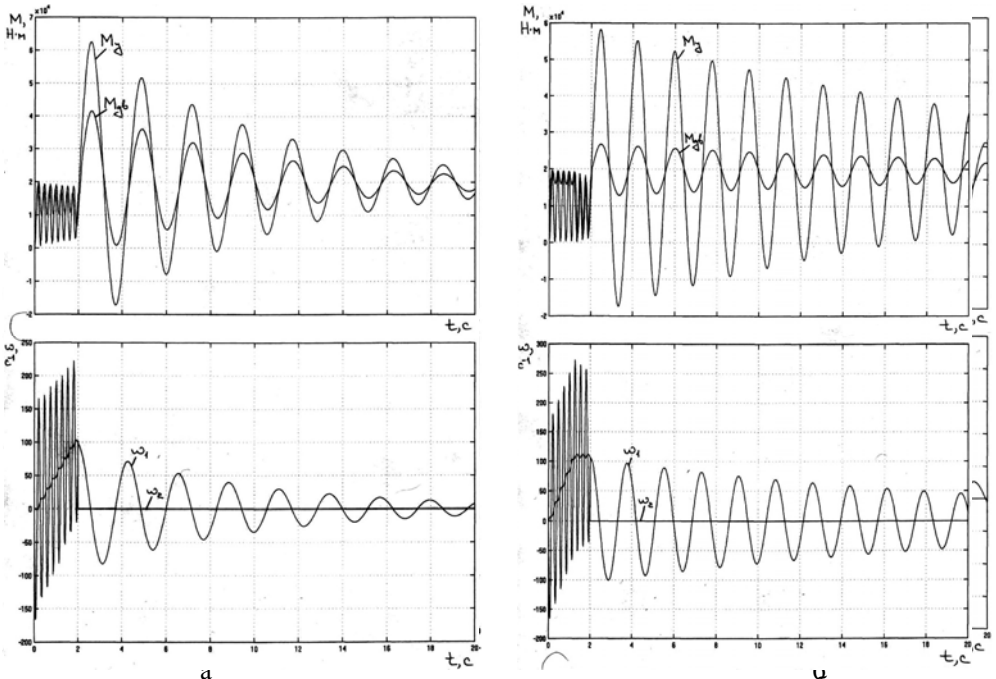


Рис. 1. Переходные процессы в ЭМС при стопорении рабочего органа: а) система УВ–Д с ПИ – рег. тока б) система Г–Д с ТВ с ПИ – рег. тока

Рис. 2. Переходные процессы в ЭМС при стопорении рабочего органа: а) система УВ–Д с И – рег. тока б) система Г–Д с ТВ с ПИД – рег. тока

$$Д(p) = p^4 T_{pm} T_п \frac{T_1^2}{\lambda_2 + \lambda_3} + p^3 T_{pm} \frac{T_1^2}{\lambda_2 + \lambda_3} +$$

$$+ p^2 (T_{pm} T_п + \lambda_2 T_1^2) \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_3} +$$

$$+ p (T_{pm} + T_н + \lambda_1 \gamma \frac{T_1^2}{T_м}) \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_3} + 1.$$

Как видно из полученных соотношений, собственные операторы передаточных функций для стопорного режима отличаются от аналогичных собственных операторов, полученных для рабочего режима (снизился порядок полиномов, и изменились параметры при соответствующих степенях).

Переходные процессы, соответствующие стопорному режиму показаны на рис. 1, 2.

Как видно из графиков переходных процессов максимальное значение момента в упругом элементе превышает допустимое значение в 3 раза и имеет значительный колебательный характер с малым затуханием, что является очень вредным для ЭМС экскаватора и соответственно недопустимым.

Стоит отметить, что качество переходных процессов в ЭМС с И – регулятором тока лучше, чем в системе с ПИ – регулятором тока (система УВ-Д).

В тоже время качество переходных процессов в ЭМС с ПИД – регулятором тока хуже, чем в системе с ПИ – регулятором тока (система Г-Д с ТВ).

Ограничение по амплитуде и демпфирование колебаний в упругом элементе производится путем введения дополнительной гибкой отрицательной обратной связи по моменту нагрузки в упругом элементе (ГООСН).

Использование метода нормированных передаточных функций позволяет увязывать параметры ЭМС и показатель колебательности в стопорном режиме. С помощью полученной системы уравнений рассчитываются необходимое значение ГООСН и другие параметры [3].

Графики переходных процессов в ЭМС с подчиненным регулированием координат систем УВ–Д и Г–Д с ТВ с использованием ГООСН приведены на рис. 3.

Анализируя полученные переходные процессы можно сделать следующие выводы:

1. Удалось снизить максимальное значение момента нагрузки в упругом элементе в 1,9 и 1,3 раза для соответственно систем УВ–Д и Г–Д с ТВ по сравнению со стандартной настройкой системы на “технический оптимум”;
2. Переходный процесс носит колебательный характер с относительно небольшим перерегулированием и большим затуханием колебаний;
3. Уменьшилось время переходного процесса как минимум в 2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г.* Тиристорные системы электропривода с упругими связями. – Л.: Энергия, 1979. – 160 с.
2. *Соловьев А.С.* Динамика электромеханических систем электроприводов карьерных экскаваторов: Текст лекций. – Л.: Изд-во

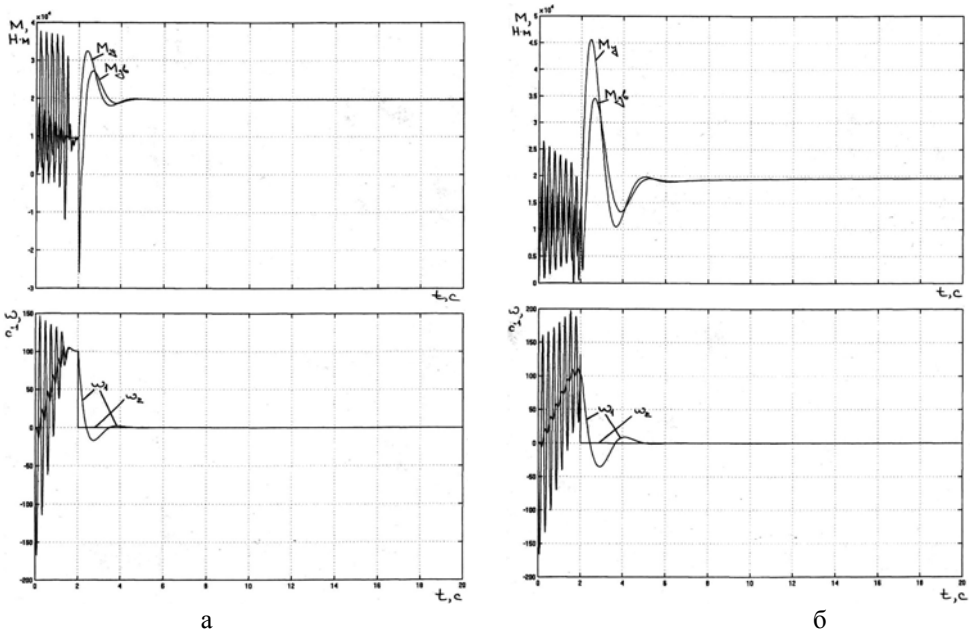


Рис. 3. Переходные процессы в ЭМС при стопорении рабочего органа: а) система УВ–Д с ПИ – рег. тока и ГООСН; б) система Г–Д с ТВ с ПИ – рег. тока и ГООСН

ЛГИ, 1989. – 31 с.
3. *Ляхомский А.В., Фащиленко В.Н.* Управление электромеханическими системами горных машин: Монография. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 296 с.

Коротко об авторах

Валиев Р.М., Фащиленко В.Н. – Московский государственный горный университет,
Попельнюхов В.И. – ЛГОК.

© **И.М. Хошмухамедов, 2006**

УДК 621.879:621.313.13:621.3.019.3

И.М. Хошмухамедов

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ГЛАВНЫХ МЕХАНИЗМОВ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Семинар № 21

Работа электродвигателей постоянного тока главных механизмов карьерных экскаваторов характеризуется высоким уровнем резкопеременных динамических нагрузок и, как следствие, повышенной вибрацией, результатом чего являются отказы в работе главных механизмов карьерных экскаваторов, составляющее по данным эксплуатации до 32 % от общего времени простоя экскаваторов во внепланых ремонтах.

В результате анализа статистических данных отказов электродвигателей установлено, что наименее надежными элементами являются: обмотка якоря, коллекторный, подшипниковый и щеточные узлы. Число отказов по коллекторному узлу достигает 21 %, по щеткодержательному аппарату – 16 %, по обмотке якоря до 42 % [2].

Из-за низкой коммутационной надежности электродвигателей происходит подгар пластин коллектора, который в процессе работы развивается по всей

контакторной поверхности. Он вызывает перегрев деталей, способствует образованию перебросов и круговых огней, снижает ресурс деталей как самого коллектора, так и конусно-нажимного узла.

Наиболее тяжелым видом отказа в процессе эксплуатации является образование кругового огня на коллекторе, который составляет 14 % относительно всех отказов, а также пробой изоляции катушек статора между витками на корпус.

Как показывает анализ статистических данных восстановление электродвигателей главных механизмов требует значительных затрат временных ресурсов, что также сказывается на времени нахождения в простое карьерных экскаваторов. Увеличение технического ресурса электродвигателей в послеремонтный период требует разработки методов прогнозирования надежности с учетом особенностей восстановления их элементов.

Функции плотности вероятности времени восстановления f ($\tau_в$) и вероятности восстановления P ($\tau_в$) электродвигателей (рисунок) с высокой степенью согласия (по критерию Колмогорова) отвечают распределению Вейбулла и характеризуются следующими зависимостями:

$$f(\tau_в) = 0,178\left(\frac{\tau_в}{7,3}\right)^{0,3} \exp\left[-\left(\frac{\tau_в}{7,3}\right)^{1,3}\right];$$

$$P(\tau_в) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\tau_в}{7,3}\right)^{1,3}\right].$$

Проверка согласия фактического и теоретического распределения значений f ($\tau_в$) и P ($\tau_в$) по критерию Колмогорова при доверительной вероятности γ = 0,9 дает хорошую сходимость.

Все выше сказанное позволяет отметить, что имея статистические данные о техническом состоянии электродвигателей и условий их эксплуатации, можно построить математическую модель прогнозирования надежности, которая позволит получить оптимальные параметры отвечающие требованиям эксплуатации.

Проблема эксплуатационной надежности электродвигателей главных механизмов карьерных экскаваторов, выработавших свой технический ресурс, требует особого внимания. Для беспере-

Функция плотности вероятности f ($\tau_в$) и вероятность восстановления P ($\tau_в$) электродвигателя ДПА-82А механизма подъема экскаватора ЭКГ-8И

бойной работы карьерных экскаваторов необходима разработка оптимальной системы планово-пре-дупредительных ремонтов.

Как показывает анализ результатов исследований надежности электродвигателей главных механизмов, ряд принятых в настоящее время параметров надежности (вероятность возникновения отказа, параметр потока отказов и остаточный ресурс) не могут в полной мере характеризовать техническое состояние указанных электродвигателей. Предложим критерии, которые позволяют оценить характеристики коэффициента готовности для использования в расчетах рациональной системы межремонтного обслуживания электродвигателей главных механизмов карьерных экскаваторов, что предопределило рассмотрение вопроса о связи параметров надежности электродвигателей с надежностью карьерных экскаваторов в целом, для чего вводится понятие коэффициента готовности $K_{г.эд}$ и коэффициента технического использования $K_{т.эд}$, специфичных для оценки надежности оборудования карьерных экскаваторов.

Как следует из выражения для коэффициента технического использования карьерных экскаваторов

$$K_{Т} = \frac{t_{Р} + t_{Т}}{t_{Р} + t_{Т} + t_{В} + t_{ОБ}}, \qquad (1)$$

где $t_{Р}$ – время эффективной работы; $t_{Т}$ – время выполнения технических операций; $t_{В}$ – время устранений отказов; $t_{ОБ}$ – время выполнения технического обслуживания, этот коэф-фициент учитывает совокупность тех факторов, которые определяют на данном календарном отрезке время нахождения карьерного экскаватора в работоспособном состоянии [1, 2].

В силу того, что надежное функционирование карьерного экскаватора зависит от надежности составляющего его структуру оборудования, к этому оборудованию можно отнести все показатели, входящие в коэффициент технического использования карьерного экскаватора, т.е.

$K_{Т} = f\,(K_{Т.МО}; K_{Т.ЭД}; K_{Т.СУ})$,

где $K_{Т.МО}$ – коэффициент технического использования механического оборудования; $K_{Т.СУ}$ – коэффициент технического использования системы управления.

Исходя из выше сказанного, $K_{Т}$ для электродвигателя можно записать

$$K_{Т.ЭД} = \frac{t_{Ф.ЭД} + t_{Ф.Т.ЭД}}{t_{Ф.ЭД} + t_{Ф.Т.ЭД} + t_{В.ЭД} + t_{ОБ}}, \qquad (2)$$

где $t_{Ф.ЭД}$ – время функционирования электродвигателя при выполнении карьерного экскаватора эффективной работы, в процессе которого на него, кроме массовых параметров приводимого в действие механизма, воздействуют динамические нагрузки, возникающие в процессе работы; $t_{Ф.Т.ЭД}$ – время функционирования электродвигателя при выполнении технологических операций, в процессе которого на электродвигатель в основном воздействуют массовые параметры приводимого механизма; $t_{В.ЭД}$ – время устранения отказов; $t_{ОБ}$ – время выполнения технического обслуживания карьерного экскаватора.

Другим показателем надежности функционирования карьерного экскаватора является коэффициент готовности $K_{Г}$, характеризующий техническое состояние системы в определенный период времени, обеспечивающее работу карьерного экскаватора

$$K_{Г} = \frac{t_{Р} + t_{Т}}{t_{Р} + t_{Т} + t_{В}}. \qquad (3)$$

По аналогии с коэффициентом $K_{Т}$ можно записать

$K_{Г} = f\,(K_{Г.МО}; K_{Г.ЭД}; K_{Г.СУ})$

а для электродвигателя выражение для $K_Г$ имеет вид

$$K_{Г.ЭД} = \frac{t_{Ф.ЭД} + t_{Ф.Т.ЭД}}{t_{Ф.ЭД} + t_{Ф.Т.ЭД} + t_{В.ЭД} + t_{ОБ}}. \quad (4)$$

Для оценки взаимосвязи коэффициента готовности $K_{Г.ЭД}$ с коэффициентом технического использования $K_{Т.Э}$ выразим составляющие календарного фонда времени $t_К$

$$t_{К.ЭД} = t_{Ф.ЭД} + t_{Ф.Т.ЭД} + t_{В.ЭД} + t_{ОБ} + t_{ОР}, \quad (5)$$

где $t_{ОР}$ – время простоев по организационным причинам; через коэффициент готовности (4) и коэффициент технического обслуживания

$$K_{ОБ.ЭД} = \frac{t_{К.ЭД} - t_{ОБ.ЭД}}{t_{К.ЭД}}. \quad (6)$$

Из выражения (4) имеем

$$t_{Ф.ЭД} + t_{Ф.Т.ЭД} + t_{В.М} = \frac{t_{Ф.ЭД} + t_{Ф.Т.ЭД}}{K_{Г.ЭД}}.$$

Из выражения (6) имеем

$$t_{ОБ.ЭД} = t_{К.ЭД} \cdot (1 - K_{ОБ.ЭД}).$$

Подставляя эти выражения в (5) и имея ввиду выражения

$$t_Р + t_Т = \frac{t_Р}{K_Т} \text{ или } t_{Ф.ЭД} + t_{Ф.Т.ЭД} = \frac{t_{Ф.ЭД}}{K_{Т.ЭД}}$$

для коэффициента потерь на организационные простои

$$t_{ОР} = t_К \cdot (1 - K_Р),$$

получим

$$t_{Ф.ЭД} = t_{К.ЭД} \cdot K_Т \cdot K_{Г.ЭД} \cdot (K_{ОБ.ЭД} + K_{ОР} - 1). \quad (7)$$

Таким образом, в зависимости от эффективной работы (7) основным количественным показателем надежности является коэффициент готовности, функциональная связь которого с коэффициентом технического использования может быть получена из сопоставления выражений

$$t_{Ф.ЭД} = t_{К.ЭД} \cdot K_Т \cdot K_{Г.ЭД} \cdot K_{ОР} \text{ и } (7)$$

и имеет вид

$$K_{Г.ЭД} = \frac{K_{ОБ.ЭД} + K_{ОР} - 1}{K_{ОР}}. \quad (8)$$

Из формулы (8) видно, что коэффициент готовности выражает надежность при фиксированном значении $K_{ОБ.ЭД}$, являющегося функцией времени обслуживания $t_{ОБ.ЭД}$. С увеличением $t_{ОБ.ЭД}$ снижается вероятность постепенных отказов и повышается в связи с этим коэффициент готовности. Однако появление внезапных отказов не зависит от планового обслуживания, а время, затраченное на него, может использоваться для полезной работы. Таким образом, существует оптимальное значение коэффициента обслуживания $K_{ОБ.ЭД}$, при котором $K_{Г.ЭД}$ и время полезной работы будут максимальны.

Можно отметить, что все параметры, входящие в выражения $K_Т$ и $K_Г$, которые характеризуют уровень надежности карьерного экскаватора как системы, находятся в прямой зависимости от таких же параметров, характеризующих надежность ЭД.

В свою очередь, применительно к рассматриваемому типу ЭД в качестве обобщенного количественного параметра надежности принимаются $K_{Г.ЭД}$, однозначно характеризующий с позиции надежности их основное функциональное назначение и отражающий связь изменения надежности ЭД с уровнем надежности, условиями работы и периодами функционирования карьерного экскаватора.

Рассмотрим вопрос прогнозирования коэффициента готовности ЭД как системы.

Конструкция вновь проектируемой системы в основном состоит из сочетания элементов и узлов, параметры надежности которых могут быть определе-

ны на основе анализа параметров надежности, находящихся в эксплуатации систем, что позволяет прогнозировать надежность новой системы.

При этом в соответствии с законом больших чисел возможная ошибка будет меньше, чем больше уровень разбиения системы на составляющие.

Наилучшие результаты при прогнозировании параметров надежности ЭД дает метод, основанный на использовании априорных данных, полученных в процессе эксплуатации. Сущность этого метода сводится к следующему. Система разделяется на две последовательные группы деталей, узлов и подсистем: первая охватывает детали, узлы и подсистемы, отказы которых носят случайный характер, вторая – объединяет детали, узлы и подсистемы, причины отказов которых известны и могут быть устранены во время ППР.

Обозначив коэффициенты готовности этих групп соответственно $K_{Г.СЛ}$ и $K_{Г.УСТ}$, можно записать:

$$K_{Г.СЛ} = \frac{t_Р}{t_Р + t_{В.СЛ}}; \qquad (9)$$

$$K_{Г.УСТ} = \frac{t_Р}{t_Р + t_{В.УСТ}}, \qquad (10)$$

где $t_{В.СЛ}$ – время восстановления при случайных отказах, $t_{В.УСТ}$ – время восстановления при устранимых отказах.

С учетом принятых обозначений коэффициент готовности системы можно записать

$$K_{Г.СИС} = \frac{t_Р}{t_Р + t_{В.СЛ} + t_{В.УСТ}} \qquad (11)$$

Если причины устранимых отказов выявлены и приняты меры, обеспечивающие устранение этих причин, то при последующей эксплуатации за тот же календарный отрезок времени $t_{В.УСТ}$, ранее затраченного только на восстановление отказавших элементов, причины проявления которых устранены, теперь будет распределяться между работой системы $t'_Р$, устранением $t_{В.СЛ}$ и $t_{В.УСТ}$ в тех же пропорциях, что и раньше (с тем же коэффициентом готовности).

На основании сказанного можно записать:

$$t_{В.УСТ} = t'_Р + t'_{В.СЛ} + t'_{В.УСТ};$$

$$K_{Г.СИС} = \frac{t'_Р}{t'_Р + t'_{В.СЛ} + t'_{В.УСТ}} = \frac{t'_Р}{t_{В.УСТ}}. \qquad (12)$$

При этом предполагается, что после устранения причин выявленных отказов, какая-то их часть, определяемая значением коэффициента готовности $K_{Г.УСТ}$ за календарный отрезок времени

$$t'_{В.УСТ} = \frac{t'_Р(1 - K_{Г.УСТ})}{K_{Г.УСТ}},$$ останется.

С учетом сказанного можно записать

$$K_{Г.СИС.ПР} = \frac{t_Р + t'_Р}{t_Р + t_{В.СЛ} + t_{В.УСТ}}. \qquad (13)$$

Из выражений (10) и (12) имеем:

$t'_Р = t_{В.УСТ} \cdot K_{Г.СИСТ}$;

$$t_{В.УСТ} = \frac{t_Р(1 - K_{Г.УСТ})}{K_{Г.УСТ}}.$$

Подставляя эти выражения в уравнение (13) и преобразовывая с учетом формулы (11), имеем

$$K_{Г.СИСТ.ПР} = K_{Г.СИСТ}\left[1 + \frac{K_{Г.СИСТ}(1 - K_{Г.УСТ})}{K_{Г.УСТ}}\right].$$

Таким образом можно отметить, что прогнозирование надежности электродвигателей главных механизмов карьерных экскаваторов должно базироваться на накоплении статистического материала по данным эксплуатации.

Коротко об авторах

Хошмухамедов И.М. – Московский государственный горный университет.

© Н.Г. Пейль, 2006

УДК 622:621.31

Н.Г. Пейль

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ОДНОМАССОВЫХ И ДВУХМАССОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РАБОЧИХ ОРГАНОВ В РЕЗОНАНСНОМ РЕЖИМЕ

Семинар № 21

Исследование резонансных режимов с замкнутой системой управления позволило выявить влияние различных обратных связей на поведение системы в целом, а так же решить две основные задачи: возможность активного воздействия на величину амплитуды колебаний в резонансном режиме и возможность настройки на резонанс с помощью обратной связи при статическом возмущающем воздействии.

Все исследования проводились в отношении одномассовой электромеханической системы (ЭМС) вращателя бурового станка. Однако особенности механики бурового станка требуют произвести сравнительный анализ его работы в резонансном режиме как двухмассовой ЭМС с упругими связями.

Резонансные режимы в одномассовой ЭМС с разомкнутым управлением

Предварительно произведён анализ резонансных режимов, возникающих в одномассовой ЭМС рабочих органов с разомкнутым управлением при наличии статических возмущающих воздействий, имеющих периодический колебательный характер.

Коэффициент динамичности по току для разомкнутой ЭМС системы при статическом возмущающем воздействии [2]:

$$\kappa_{\partial i} = \frac{A_i}{H_i} = \frac{\Omega^2}{\sqrt{(\Omega^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}}, \qquad (1)$$

где A_i - амплитуду вынужденных колебаний тока якоря двигателя; H_i - статическое смещение тока якоря двигателя при статическом возмущающем воздействии; Ω - частота собственных колебаний ЭМС, n – коэффициент затухания; ω – частота возмущающих воздействий.

Резонанс получается при ω = Ω. В этом случае

$$\kappa_{\partial i рез} = \frac{1}{2\xi}, \qquad (2)$$

т.е. получен результат, описанный в теории колебаний [1], при этом ξ = n/Ω – относительный коэффициент затухания.

Найдем максимальное значение коэффициента динамичности $\kappa_{\partial i}$. Для этого исследуем на экстремум подрадикальное выражение (1). Получаем значение квадрата частоты возмущающего воздействия, для которого имеем максимум $\kappa_{\partial i}$:

$$\omega^2 = \Omega^2 - 2n^2. \qquad (3)$$

Расчеты показывают, что угловая частота возмущающего воздействия, при которой наблюдается максимум коэффициента динамичности, не совпадает с резонансной частотой, что соответствует теории колебаний.

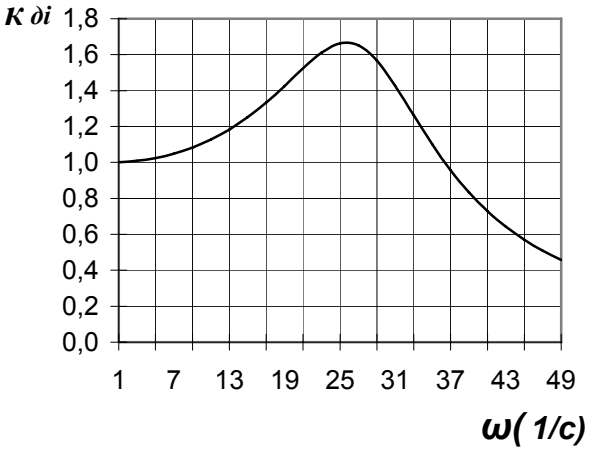


Рис. 1. Зависимость коэффициента динамичности по току от частоты возмущающего воздействия

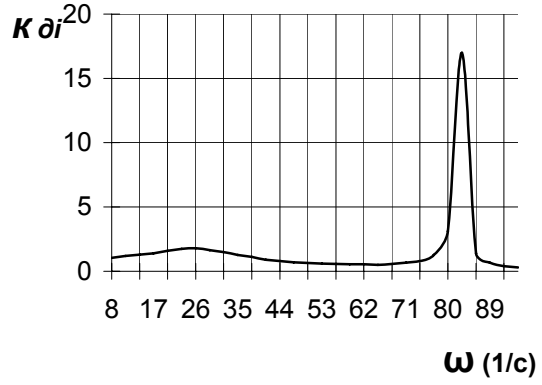


Рис. 2. Зависимость коэффициента динамичности по току от частоты возмущающих воздействий в двухмас-совой ЭМС вращателя

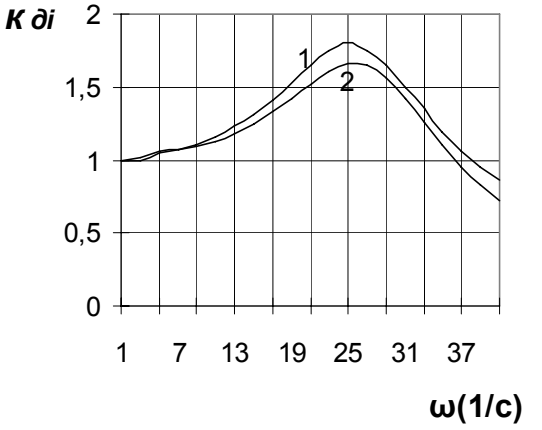


Рис. 3. Зависимость коэффициента динамичности по току от частоты возмущающих воздействий для разомкнутой ЭМС: *1* – двухмассовой, *2* – одномассовой

На рис. 1 представлен график зависимости коэффициента динамичности по току от угловой частоты возмущающего воздействия.

В качестве исходных данных рассматривалась электромеханическая система вращателя бурового станка типа СБШ – 250МН, имеющая следующие параметры: $T_я$ = 0,055 с, $T_м$ = =0,022с, $T_п = 0{,}005$ *с*. Для такой системы Ω = 28,75с$^{-1}$; частота собственных колебаний при наличии трения Ω_0 = 27,27с$^{-1}$;

$п = 9{,}091\ c^{-1}$; ξ = 0,316.

График на рис. 1 показывает наличие максимума коэффициента динамичности при ω = 25,72с$^{-1}$, что не совпадает с резонансной частотой Ω_0 = 27,27с$^{-1}$, но соответствует расчётам по формуле (3) и теории колебаний.

Из графика видно, что

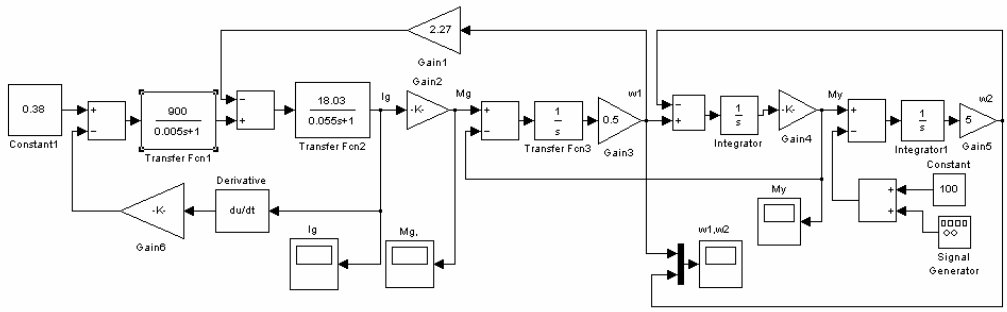


Рис.4. Структурная схема двухмассовой ЭМС вращателя с гибкой обратной связью по току

значения коэффициента динамичности на околорезонансных частотах от 20с$^{-1}$ до 31с$^{-1}$ превышает величины, допустимые по техническим требованиям.

Резонансные режимы в двухмассовой ЭМС с разомкнутым управлением

При исследовании электроприво-дов с упругими связями необходимо определить собственные частоты колебаний в системе. В практических целях обычно достаточно учитывать одну – две низкие частоты, определяющие характер механических колебаний и степень их влияния на скорость и ток (момент) электродвигателя в резонансных режимах.

Определение собственных частот колебаний и выявление главных из них (низших) позволяют приводить сложные расчётные системы электроприводов с упругими связями к более простым.

Частота собственных колебаний двухмассовой электромеханической системы с упругими связями определяется по формуле

$$\Omega_{уп} = \sqrt{\frac{c}{J_1} + \frac{c}{J_2}}, \qquad (4)$$

где с – коэффициент жёсткости; J_1, J_2 – моменты инерции.

Для электромеханической системы вращателя бурового станка типа СБШ – 250 МН с моментами инерции двигателя J_1 = 2 кГм^2 и бурового инструмента J_2 = 0,2 кГм^2 частота собственных колебаний $\Omega_{уп}$ = 81с$^{-1}$, что приблизительно составляет 13 Гц.

Таким образом, рассматривая электромеханическую систему вращателя как жёсткую одномассовую и одновремённо как двухмассовую с упругими связями, получаем два значения частоты собственных колебаний, при которых возможно возникновение резонансных режимов.

Математическое описание резонансных режимов двухмассовой электромеханической системы представляет собой достаточно сложную задачу. Поэтому ограничимся анализом резонансных режимов в такой системе на моделях MATLAB.

Проведённое моделирование разомкнутой двухмассовой системы подтвердило наличие двух резонансных режимов работы в области значений частот собственных колебаний, полученных для одно- и двухмассовых систем.

График зависимости коэффициента динамичности по току от частоты возмущающих воздействий на рис. 2 в диапазоне частот от 8 до 49 с$^{-1}$ практически полностью повторяет кривую, представленную на рис. 1, что подтверждает теоретические выводы для разомкнутой одномассовой системы. Второй резо-

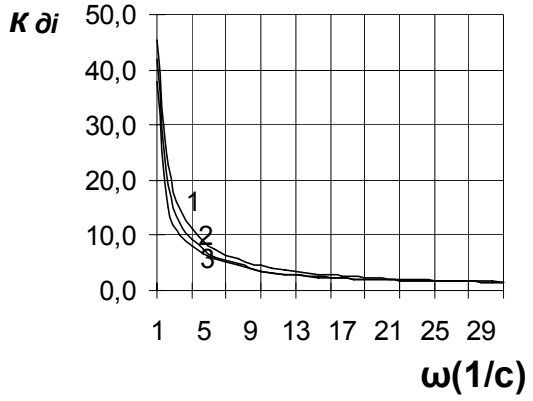


Рис. 5. Зависимости $к_{\partial i}$ при резонансе от частоты возмущающих воздействий для ЭМС с ГОСТ: *1* – расчётная; полученные при моделировании *2* – для одномассовой, *3* – для двухмассовой ЭМС

нансный пик амплитуды коэффициента динамичности приходится на значение, близкое к $\Omega_{уп}$ = 81с$^{-1}$, что удостоверяет возникновение резонанса со значительными величинами коэффициента динамичности.

Однако данный резонансный режим возможен лишь при возмущающих частотах около 13 Гц, что практически лежит вне рабочего диапазона. Поэтому достаточно проанализировать работу системы в резонансе только на первой частоте собственных колебаний, определяемой параметрами электродвигателя.

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента динамичности по току двигателя от частоты возмущающих воздействий $к_{\partial i}$ (ω) для разомкнутой одномассовой и двухмассовой ЭМС на частотах в пределах от 1 до 41с$^{-1}$. Данные получены путём моделированияСравнение графиков показывает, что коэффициент динамичности по

току двигателя для двухмассовой ЭМС всего на 6-12 % больше, чем в одномассовой, что подтверждает теоретические выводы. В **резонансном режиме на** частотах, близких к частоте собственных колебаний, $к_{\partial i}$ достигает своего максимума.

Из рис. 3 видно, что при работе разомкнутой ЭМС вращателя бурового станка достаточно большой набор частот (17–33 с$^{-1}$) возмущающих воздействий создаёт в системе вынужденные колебания с коэффициентом динамичности по току превышающим предельно допустимые значения по нагрузкам $к_{\partial i}$ = 1,4 .

Моделирование резонансного режима работы двухмассовой ЭМС с гибкой обратной связью по току.

Для получения регулируемого резонансного режима в одномассовой ЭМС применена гибкая обратная связь по току (ГОСТ) с целью изменения частоты собственных колебаний системы. Получены расчётные и путём моделирования зависимости коэффициента динамичности при резонансе от частоты возмущающих воздействий [3]. Моделирование режима работы при резонансе двухмассовой ЭМС с гибкой обратной связью по току (рис. 4) позволило сравнить протекание этого процесса с одномассовой ЭМС.

На рис. 5. приведены зависимости коэффициента динамичности при резонансе расчётные и снятые путём моделирования для одно- и двухмассовой ЭМС с ГОСТ вращателя бурового станка.

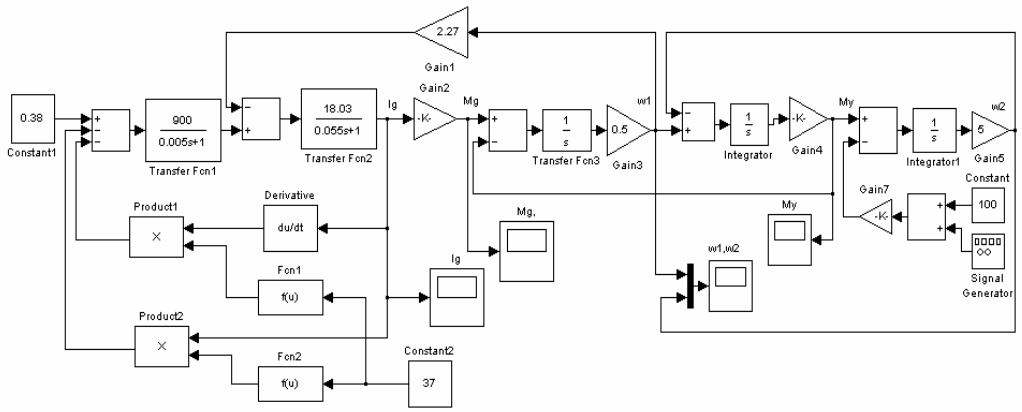


Рис. 6. Структурная схема двухмассовой ЭМС с гибкой и жёсткой обратными связями по току, настроенных на резонанс

Сравнение данных графиков показывает, что коэффициент динамичности по току в резонансном режиме для двухмассовой ЭМС с гибкой обратной связью по току незначительно отличается от расчётных значений, а также полученных при моделировании одномассовой ЭМС с ГОСТ.

Моделирование резонансного режима работы двухмассовой ЭМС в структуре с гибкой и жёсткой обратными связями по току.

Моделирование резонансного режима работы двухмассовой ЭМС при совместном действии гибкой и жёсткой обратных связей производилось по схеме, представленной на рис.6.

В процессе моделирования измерялись значения коэффициента динамичности при резонансе для условия поддержания функциями Fcn1 и Fcn2 значения m = 1,4.

На рис.7. представлены полученные зависимости коэффициента динамичности при резонансе от частоты возмущающих воздействий.

Сравнение графиков 2, 3 показывает, что расхождение данных, полученных при моделировании одно- и двухмассовой ЭМС незначительны и находятся в допустимых пределах. Из графиков видно, на частотах больше 34с$^{-1}$ начинается устойчивое отклонение от заданной величины $\kappa_{\partial ires}$ для двухмассовой ЭМС, что также соответствует расчётам для одномассовой ЭМС.

Вывод по результатам моделирования.

Структура двухмассовой ЭМС с гибкой и жёсткой обратными связями по току при резонансе поддерживает значение коэффициента динамичности m = 1,4 при статическом возмущении в диапазоне частот ω = 1…34с$^{-1}$ (0,1–5,7 Гц), что соответствует теоретическим расчётам, полученным для одномассовой ЭМС [3]. Расхождения результатов с одномассовой ЭМС незначительны (7…15 %).

Окончательный вывод. Результаты моделирования двухмассовой ЭМС в структурах с разомкнутым и замкнутым управлением при резонансе показали незначительные расхождения (6–15 %) с данными, полученными при тех же условиях работы для од

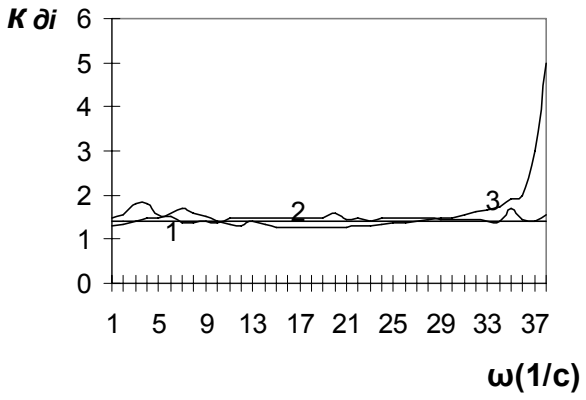


Рис.7. Зависимость $к_{дires}$ от ω для ЭМС с гибкой и жёсткой обратными связями по току: *1* - расчётное значение; полученные при моделировании: *2* – для одномассовой ЭМС, *3* – для двухмассовой ЭМС

номассовой ЭМС. Поэтому, учитывая сложность математических выражений для двухмассовой системы, приближённо можно использовать для исследования управляемых резонансных режимов в качестве основной модель ЭМС с жёсткими механическими связями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Обморшев А.Н.* Введение в теорию колебаний. – М.: Наука, 1965. – 276с.

2. *Хапаев А.Б.* Разработка электропривода вращателя бурового станка по энергосберегающей технологии: Дис. … канд. техн. наук: 05.09.03 / Моск. горный ун–т. – М., 2004.–162с.

3. *Фащиленко В.Н., Пейль Н.Г.* Анализ резонансных режимов электромеханических систем с обратными связями: Отдельные статьи Горного информационно – аналитического бюллетеня. – 2005. – № 10 - 21с. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2005.

Коротко об авторах

Пейль Н.Г. – доцент кафедры «Электрификация и энергоэффективность горных предприятий», Московский государственный горный университет.