Записки Ленинградского орденов Ленина
и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова
т. XXXV, вып. 1, 1957 г.

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ЗНАЧЕНИИ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УЧАСТКА УГОЛЬНЫХ ШАХТ

В. П. Муравьев

Как известно, нагрузка забойных электродвигателей имеет резко переменный характер. При расчете кабельной сети необходимо исходить из максимального обеспечения производительности забойных машин и механизмов. Поэтому особенно важен выбор режима расчета участковой кабельной сети. Для этого необходимо знать требуемую величину напряжения при различных режимах работы главного двигателя, которым в условиях участка угольной шахты является двигатель комбайна или врубовой машины.

При пуске двигателя МАД-191/11 напряжение на зажимах должно быть 300 *в* при $U_н$ равном 380 *в* и 520 *в* при $U_н$ равном 660 *в*.

Опытные данные, полученные для ряда шахт Донбасса при работе комбайна „Донбасс" и врубовой машины МВ-60, свидетельствуют о том, что для различных горногеологических условий отношение максимальной мощности двигателя МАД-191/11 к эквивалентной $\frac{P_{max}}{P_{экв}}$ находится в пределах от 1,4 до 1,75 [1]. Поэтому, когда для производительной работы указанных машин необходимо иметь отношение $\frac{P_{max}}{P_{экв}}$ не менее 1,75 при потребной эквивалентной мощности 55—60 *квт* (особенно при работе на углях крепких и средней крепости), должна быть обеспечена максимальная мощность около 100 *квт*.

Зная, что максимальная мощность на валу двигателя МАД-191/11, соответствующая номинальному напряжению, составляет примерно 110 *квт*, определяем необходимое напряжение при опрокидывании

$$U_{оп} = U_н \sqrt{\frac{P_{max}}{P_{max\,н}}} = 380 \sqrt{\frac{96}{110}} = 350 \text{ в}.$$

При $U_н$, равном 660 *в*, величина $U_{оп}$ должна быть не менее 605 *в*. Обеспечение максимального момента двигателя МАД-191/11, соответственно полученным значениям напряжений, приведет к увеличению скоростей подачи комбайнов и врубовых машин, а следовательно, к повышению их производительности и уменьшению удельного расхода электроэнергии.

Рассчитывая кабельную сеть по часовому режиму, заведомо получаем кратность перегрузочного момента значительно меньше номинальной, тем более, если учесть неточность расчета по обычному методу. Поэтому опрокидывание двигателя МАД-191/11 происходит при мощности 70—80 *квт*. Это свидетельствует о том, что производительная работа забойных машин часто невозможна не потому, что недостаточен максимальный момент двигателя МАД-191/11, а потому, что практически в реальных условиях участковой кабельной сети без специальных мероприятий невозможна реализация максимального момента, соответствующего номинальному напряжению.

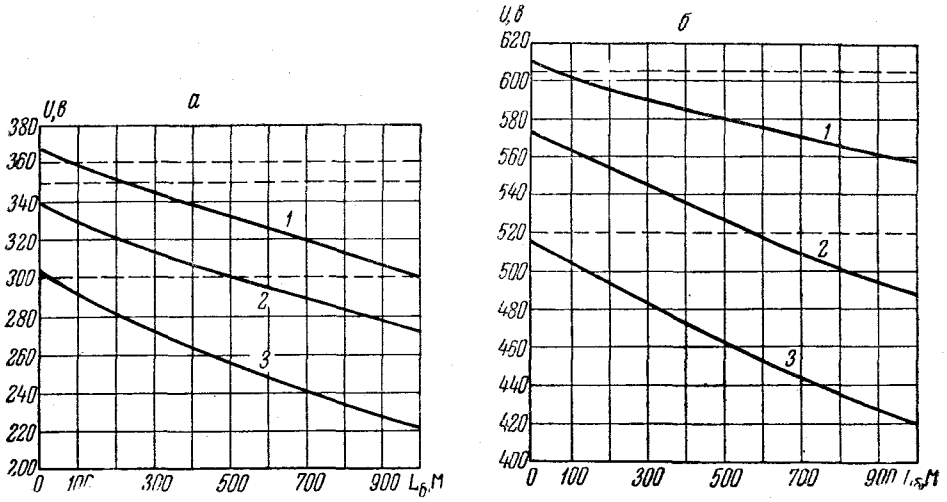


Рис. 1. Зависимость напряжения двигателя МАД-191/11 от длины бронированного кабеля:

а — при $U_н = 380$ *в*; *б* — при $U_н = 660$ *в*.

Кривые соответствуют: *1* — опрокидыванию; *2* — пуску; *3* — нормальной работе двигателя. Пунктир— требуемая величина напряжения

Анализируя схемы электроснабжения при $U_н$, равном 380 и 660 *в*, рассмотрим работу двигателя МАД-191/11 с часовой мощностью 65 *квт* как самого мощного на участке. Полное использование мощности двигателя ограничено кабельной сетью. Анализ произведен по разработанной нами методике расчета [2] для следующих данных: длина гибкого кабеля 200 *м*, его сечение 35 *мм*^{2}, трансформаторы мощностью 100 и 180 *ква* и отсутствие нормально работающих двигателей.

Как видно на рис. 1, *а*, при напряжении кабельной сети 380 *в* невозможно получить требуемое напряжение во время опрокидывания двигателя даже при длине бронированного кабеля $L_б$, равной нулю. При пуске требуемое напряжение можно получить при $L_б$, равной 40 *м*.

Расчет кабельной сети в зависимости от требований, предъявляемых к перегрузочному моменту, следует производить из условий пуска или опрокидывания двигателя комбайна или врубовой машины. Это обеспечивает требуемую величину напряжения, соответствующую часовой мощности двигателя.

Поскольку в участковых кабельных сетях при напряжении 380 *в* невозможно получить требуемые пусковые и перегрузочные характеристики двигателей, для улучшения электроснабжения участка рассмотрим

следующие мероприятия: а) переход на номинальное напряжение 660 *в*, б) применение передвижных трансформаторных подстанций.

На рис. 1, *б* представлена зависимость напряжения двигателя МАД-191/11 во время пуска и опрокидывания при $U_н = 660$ *в* от длины бронированного кабеля при наличии нормально работающих двигателей. Напряжение двигателя МАД-191/11 при пуске определялось согласно выражению

$$U_п = \frac{U_0 - \sqrt{3}\sum_{к=1}^{m}(R_к + X_к)\sum_{i=1}^{n_к} I_{а.н_i}}{1 + \sqrt{3}\frac{I_{п.н}}{U_н}R\cos\varphi_п + \sqrt{3}\frac{I_{п.н}}{U_н}X\sin\varphi_п}, \quad (1)$$

где U_0 — напряжение холостого хода трансформатора;
$I_{а.н_i}$ — активный номинальный ток нормально работающего двигателя;
m — число ветвей;
$I_{п.н}$ — пусковой ток двигателя при номинальном напряжении;
$n_к$ — число нормально работающих двигателей;
$\cos\varphi_п$ — коэффициент мощности при пуске двигателя;
R, X — активное и индуктивное сопротивления трансформатора и кабелей до пускаемого двигателя;
$R_к$, $X_к$ — активное и индуктивное сопротивления магистральной ветви.

Сопротивление кабелей

$$R' = \frac{L10^3}{qS} \quad (2)$$

и

$$X' = 0{,}07L, \quad (3)$$

где L — длина соответствующей ветви кабеля, *км*;
q — проводимость меди *м/ом·мм²*;
S — сечение кабеля, *мм²*.

По условию пуска двигателя МАД-191/11 (рис. 1, *б*) при нормальной работе параллельно включенных двигателей переход на напряжение 660 *в* позволяет получить на его зажимах требуемое напряжение (520 *в*) при $L_б$ до 600 *м*. При опрокидывании для тех же условий требуемое напряжение получим только при $L_б$ до 60 *м*, т. е. при существующей мощности двигателя МАД-191/11 переход на напряжение 660 *в* не всегда обеспечивает требуемые перегрузочные характеристики, но коренным образом улучшает электроснабжение участка. Увеличение мощности главного двигателя комбайна до 100—120 *квт* и при напряжении в сетях 660 *в* приведет к тому же, что имеет место при существующей мощности двигателя МАД-191/11 в кабельных сетях с $U_н = 380$ *в*. Это иллюстрируется кривой *3* рис. 2, полученной из условия пуска двигателя. Поэтому переход на напряжение 660 *в* в полной мере не решает поставленной задачи. Применение передвижных трансформаторных подстанций технически целесообразно, так как может сократить $L_б$ до 100 *м* и снизить потери напряжения. Однако технический эффект от применения подстанций незначителен. Потери напряжения в бронированном кабеле меньше, чем в гибком кабеле и трансформаторе. Необходимость использования регуляторов напряжения не исключается, так

как часто и при $L_б = 0$ приемники не получают требуемого напряжения. Техническая целесообразность применения передвижных подстанций должна быть подтверждена экономически.

В качестве мероприятия, способного обеспечить качественное электроснабжение участка, следует рассматривать автоматическое регулирование напряжения в кабельной сети. Мощность регулятора напряжения должна выбираться из условий пуска или опрокидывания наиболее мощного на участке двигателя.

Поскольку требуемое напряжение у электроприемников обеспечивается указанными выше мероприятиями, техническое решение вопроса должно быть экономически наивыгоднейшим и удобным с точки зрения эксплуатации. Параметры кабельной сети, выбираемые при проектировании схем электроснабжения участка из условия допустимых потерь напряжения, являются далеко не всегда экономичными. Надежное и качественное электроснабжение участка возможно лишь при условии регулирования напряжения как в случае перехода на 660 *в*, так и в случае применения передвижных подстанций.

Экономически наивыгоднейшим окажется такой вариант схемы электроснабжения, при котором годовые затраты по эксплуатации кабельной сети участка будут наименьшими. При анализе этих затрат наибольший практический интерес представляют затраты, связанные с длиной низковольтного бронированного кабеля

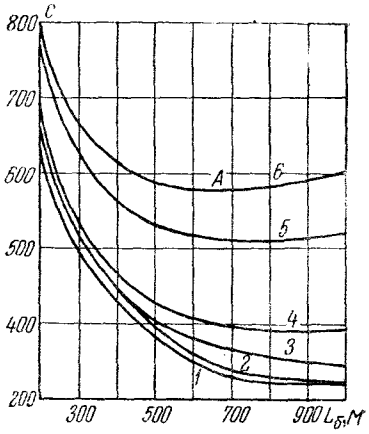


Рис. 2. Зависимость годовых затрат на эксплуатацию кабельной сети от длины бронированного кабеля:

1, 4, 6 — при $U_н = 380$ *в*; *2, 3, 5* — при $U_н = 660$ *в*

$$C_L = aL + \frac{A_г^2 \tau\, 10^{-3} c}{T^2 U_н^2 \cos^2 \varphi q S} L + \frac{A_г^2\, 10^{-3} b}{T^2 U_н^2 \cos^2 \varphi q S} L + k \frac{BL'}{L}, \qquad (4)$$

где a — стоимость амортизации 1 *пог. м* бронированного кабеля, руб/год;

$A_г$ — количество электроэнергии, потребляемое в год через рассматриваемый бронированный кабель, *квт-ч*;

c — плата за 1 *квт-ч* электроэнергии, руб.;

b — плата за 1 *ква* установленной мощности, руб.;

$U_н$ — номинальное напряжение, *кв*;

S — сечение бронированного кабеля, *мм*^{2};

q — проводимость меди, *м/ом·мм*^{2};

T — время использования максимальной нагрузки, час.;

$\cos \varphi$ — средний по участку коэффициент мощности;

τ — время максимальных потерь, час.;

L' — годовое подвигание забоя, *м*;

B — стоимость трансформаторной камеры, включая монтаж и демонтаж электрооборудования, руб.;

L — длина бронированного кабеля, *м*;

k — коэффициент, учитывающий провисание бронированного кабеля.

Третий член формулы (4) отражает двухставочный тариф платы за пользование электроэнергией.

Очевидно, зависимость $C_L = f(L)$ имеет минимум. Длина бронированного кабеля, при которой годовые затраты минимальны, является экономически наивыгоднейшей и определяется обычным путем, т. е. $\frac{dC_L}{dL}$ приравнивается нулю, откуда

$$L_{эк} = \sqrt{\frac{kBT^2U_н^2qSL'\cos^2\varphi}{aT^2U_н^2qS\cos^2\varphi + A_г^2 10^{-3}(\tau c + b)}}. \qquad (5)$$

Для условий Донбасса $L_{эк}$ составляет примерно 1000 *м*, а для Эстонсланца 500 *м*. С увеличением величины напряжения $L_{эк}$ увеличивается до своего максимума, а затем уменьшается, так как $a \equiv U_н$. То же происходит при увеличении сечения кабеля, ибо $a \equiv S$.

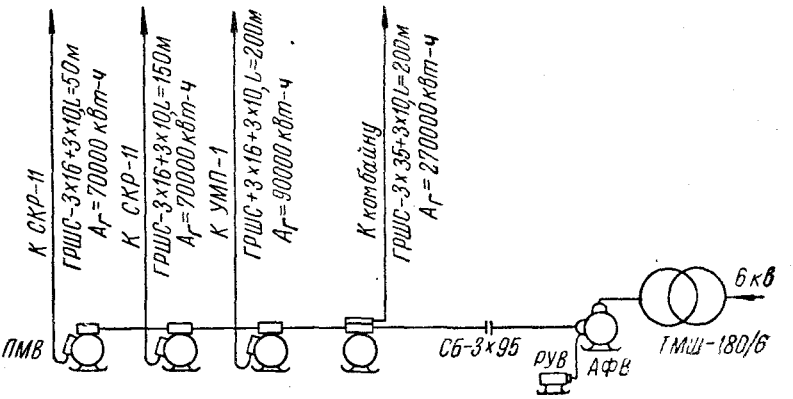


Рис. 3. Схема электроснабжения участка

Для Донбасса экономическую длину бронированного кабеля можно принять равной 600—700 *м*. Принимаемая на практике длина бронированного кабеля 200—400 *м* является далеко не экономичной. Увеличение $L_б$ до $L_{эк}$ приведет к экономии по каждой трансформаторной подстанции до 10 000—25 000 руб/год. Решение этой задачи возможно только при переходе на напряжение 660 *в*, а также при создании надежных регуляторов напряжения.

При переходе на напряжение 660 *в* потери мощности и электроэнергии в кабельной сети уменьшатся втрое, но увеличатся расходы на гибкие кабели, низковольтную аппаратуру и электродвигатели. Стоимость гибких кабелей на напряжение 1000 *в* по предварительным подсчетам увеличится на 25—30%. Стоимость электроаппаратуры в среднем возрастет на 25%. Экономическое сравнение схем электроснабжения производилось при условии обеспечения двигателя МАД-191/11 требуемой величиной напряжения при пуске. Для получения необходимой величины напряжения при $U_н$, равном 380 *в*, необходимо применение регулятора напряжения.

На рис. 2 представлены годовые затраты по эксплуатации кабельной сети участка в зависимости от длины бронированного кабеля для схемы электроснабжения, изображенной на рис. 3, при следующих данных: $a = 4$ руб.; $B = 20\,000$ руб.; $L' = 450$ *м*; $T = 4500$ час.; $\cos\varphi = 0{,}7$; $\tau = 3500$ час.; $k = 1{,}05$; $A_г = 500\,000$ *квт-ч*; $A_г = 20\,000$ *квт-ч*;

$q = 50$; $S = 95$ *мм*^{2}. Стоимость электроэнергии: для Донбасса $c = 0{,}05$ руб.; $b = 122$ руб.; для Эстонсланца $c = 0{,}230$ руб.; $b = 480$ руб. Кривые *1* и *2* (см. рис. 2) показывают, что для комбайна „Донбасс" и условий Донбасса при $A_г = 200\,000$ *квт-ч* некоторое экономическое преимущество на стороне напряжения 380 *в*. По мере роста электропотребления преимущество переходит на сторону напряжения 660 *в* (кривые *3* и *4*). Для районов с высокой платой за электроэнергию напряжение 660 *в* становится высокоэкономичным. Кривые *5* и *6* построены для условий Эстонсланца.

При применении на участке комбайнов «Горняк» или ВОМ-2, когда по тепловому режиму при $U_н$ равном 380 *в* нельзя подводить к двигателям ток одним гибким кабелем, экономическое преимущество оказывается на стороне напряжения 660 *в* и для районов с низкой платой за электроэнергию. То же относится к схемам электроснабжения участка, где мощность главного двигателя равна 100—120 *квт*.

Нельзя также не учитывать эксплуатационного неудобства при работе в лаве с двумя гибкими кабелями. Без регуляторов напряжения экономическое преимущество напряжения 660 *в* по сравнению с напряжением 380 *в* очень велико. Например, по условию пуска двигателя МАД-191/11 при 380 *в* примем $L_б$ равным 200 *м* (хотя согласно кривой *2*, рис. 1, *а*, требуемое напряжение можно получить только при $L_б$, достигающей 60 *м*), при напряжении 660 *в* $L_б$ равно 600 *м*. Годовые затраты на эксплуатацию кабельной сети для Донбасса соответственно равны 65 000 и 37 000 руб., а для Эстонсланца — 71 000 и 51 000 руб.

Применение передвижных подстанций экономически целесообразно только в том случае, когда годовые затраты на эксплуатацию кабельной сети будут меньше, чем при применении стационарных подстанций. При прочих равных условиях годовые затраты на эксплуатацию кабельной сети определяются затратами, связанными с длиной бронированного кабеля. Анализ этих затрат, согласно формуле (4), в которой B — стоимость выработки для установки передвижной подстанции, показал, что в зависимости от стоимости и годового потребления электроэнергии $L_{эк}$ находится в пределах 300—700 *м*. Затраты, соответствующие $L_{эк}$, здесь меньше, чем для стационарных подстанций. Однако, если принять во внимание, что стоимость сухого трансформатора ТСШ значительно больше стоимости трансформатора ТМШ, экономического преимущества может и не быть.

Не имея более или менее достоверных данных о габаритах и стоимости передвижных подстанций, нельзя определенно говорить об экономической целесообразности их применения. Однако передвижные подстанции могут иметь существенное значение как комплектные установки, облегчающие монтаж и передвижку.

Пример. Найдем эксплуатационно необходимые и экономически наивыгоднейшие параметры участковой кабельной сети из условия пуска двигателя МАД-191/11 (рис. 3) для Донбасса при следующих данных: $A_г = 500\,000$ *квт-ч*; $U_н = 660$ *в*; $B = 20\,000$ руб.; $L' = 400$ *м*; $U_0 = 690$ *в*; $q = 50$, $c = 0{,}05$ руб.; $b = 122$ руб.; $U_{п.н} = 520$ *в*; $I_{п.н} = 317$ *а*; $\cos\varphi_п = 0{,}56$; $I_{а.н_1} = 15$ *а*; $I_{а.н_2} = 9{,}5$ *а*; $I_{а.н_3} = 10$ *а*.

Задача сводится к определению длины и сечения бронированного кабеля таким образом, чтобы, с одной стороны, выполнялись требования условий эксплуатации, предъявляемые к величине напряжения на зажимах двигателя при пуске, а с другой — требование выбора сечения и длины бронированного кабеля из условий наименьших затрат на

эксплуатацию кабельной сети. Исходя из этих требований, уравнения, которыми обычно определяются параметры кабельной сети из условия допустимых потерь напряжения и в частности формула (1), являются уравнениями с двумя неизвестными. Поэтому эти параметры могут не удовлетворять минимальным годовым затратам на эксплуатацию кабельной сети.

Формула (5) является также уравнением с двумя неизвестными, так как при прочих равных условиях $L_{эк} = f(S)$, поэтому любому сечению кабеля соответствует определенная $L_{эк}$, а следовательно, и минимальные затраты. Сечение и длина бронированного кабеля в этом случае могут не обеспечить эксплуатационно необходимое напряжение двигателя.

Очевидно, чтобы длина и сечение бронированного кабеля удовлетворяли экономическим и эксплуатационным требованиям, необходимо совместно решить уравнения (1) и (5). В общем виде решение этих уравнений относительно s и $L_{эк}$ слишком громоздко. Поэтому после подстановки в уравнения (1) и (5) заданных в примере числовых значений и полагая, что стоимость бронированного кабеля зависит от сечения, согласно выражению $a = 0{,}041s$, решаем их графически.

На рис. 4 зависимость $L = f(s)$, согласно уравнению (1), представлена кривой *2*, а зависимость $L_{эк} = f(s)$ — кривыми *1* и *3*. Находим параметры бронированного кабеля, удовлетворяющие обоим уравнениям: точка *a* для условий Донбасса, точка *b* для Эстонсланца. Слева от точек *a* и *b* параметры кривых *1* и *3* неприемлемы для расчетов, так как они не удовлетворяют уравнению (1) (кривая *2*), т. е. не обеспечивают при пуске двигателя требуемой величины напряжения. Параметры, удовлетворяющие кривой *1*, не являются экономически наивыгоднейшими. Справа от точек *a* и *b* параметры, выбираемые по кривым *1* и *3*, обеспечивают требуемое напряжение у двигателя. Параметры, соответствующие любой точке, взятой в заштрихованной площадке, не отвечают минимальным годовым затратам, так как будут находиться справа от точки *A* на кривой *6* (см. рис. 2) и для точек, расположенных ниже кривых *1* и *3*, годовые затраты будут слева от точки *A*.

Поскольку $L_{эк} = f(s)$, минимальные годовые затраты также зависят от сечения кабеля. Зависимость $C_s = f(s)$ представлена на рис. 4 кривыми *4* и *5*, соответственно для условий Донбасса и Эстонсланца. Практически оказываются неприемлемыми или экономическое сечение, или экономическая длина кабеля, соответствующие $C_{s\,min}$.

Для Донбасса приемлемым является экономически наивыгоднейшее сечение кабеля, но неприемлема длина. Однако, как видно из рис 2, при $s = 95$ *мм*^{2} и увеличении длины бронированного кабеля сверх 600—700 *м* величина C_L уменьшается незначительно.

Для Эстонсланца $L_{эк}$ колеблется около 600 *м*, но сечение кабеля составляет примерно 180 *мм*^{2}, что практически неприемлемо, так как шахтная аппаратура не допускает подключения бронированного кабеля сечением выше 95 *мм*^{2}. Прокладка параллельного кабеля вызовет дополнительные затраты, значительно превосходящие выигрыш, получаемый от увеличения сечения сверх 95 *мм*^{2}, так как при увеличении сечения величина C_s уменьшается незначительно, не говоря уже о нежелательности увеличения расходов цветных металлов.

Таким образом, практически сечение бронированного кабеля 95 *мм*^{2} является экономически наивыгоднейшим, а экономическую длину бронированного кабеля следует определять по формуле (5).

Таким образом, расчет кабельной сети сводится к проверке величины напряжения двигателя. Если требуемое напряжение двигателя не обеспечивается, то находим потери напряжения, подлежащие компенсации, а затем и мощность регулятора напряжения.

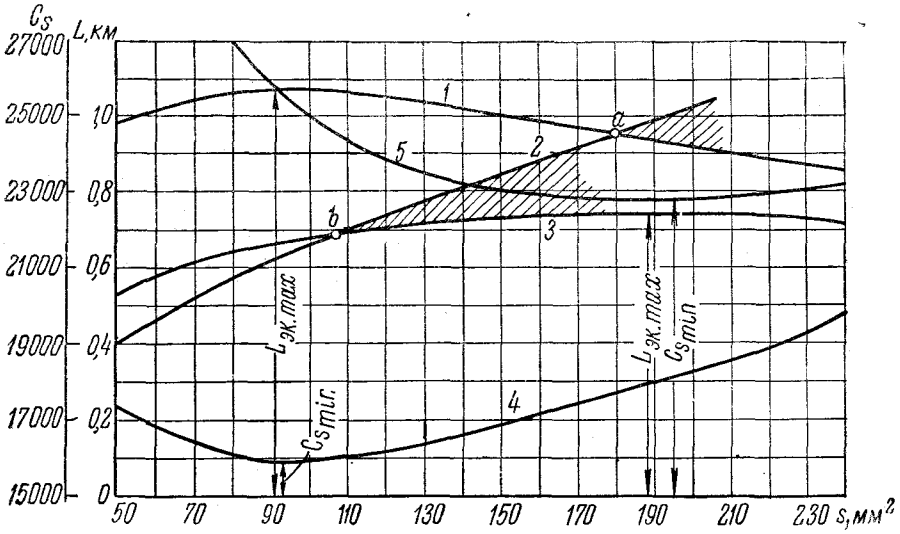


Рис. 4. К выбору наивыгоднейших параметров

Выводы

1. В зависимости от требований, предъявляемых к величине максимальной мощности, кабельную сеть следует рассчитывать на основании условий пуска или опрокидывания двигателя.

2. При существующей мощности двигателя МАД-191/11 переход на напряжение 660 *в* хотя и не всегда обеспечивает требуемые перегрузочные характеристики, но коренным образом улучшает электроснабжение участка.

3. Применение передвижных подстанций только в некоторой степени может улучшить электроснабжение участка. Получить требуемые пусковые и перегрузочные характеристики двигателей можно только при применении автоматических регуляторов напряжения.

4. Напряжение 660 *в* является более экономичным, чем 380 *в*, за исключением случаев с низкой платой за электроэнергию при низком годовом электропотреблении.

5. При проектировании электроснабжения участка необходимо находить экономически наивыгоднейшие и эксплуатационно необходимые параметры кабельной сети согласно изложенной методике.

Использованная литература

1. Кривоносов В. Ф., Маслюк Г. М., Колесников Е. Г. Режим работы электродвигателей комбайна «Донбасс». Работы ДонУГИ, сб. 7, Углетехиздат, 1950.

2. Муравьев В. П. Оптимальная величина напряжения при электрификации участка угольных шахт. Автореферат, 1954.