*Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института, т. XXXIII, вып. I, 1956 г.*

# ВЫБОР НАИВЫГОДНЕЙШЕЙ ВЕЛИЧИНЫ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ УСТРОЙСТВ СЦБ ПОДЗЕМНОЙ ЭЛЕКТРОВОЗНОЙ ОТКАТКИ

*С. П. Васильевский*

Устройства по сигнализации, централизации и блокировке, применяемые на отечественных шахтах, работают при напряжении от 12 до 250 *в* — в диапазоне шкалы низкого напряжения.

Как показал опыт эксплуатации, надежность СЦБ не зависит от величины напряжения, при котором работают данные устройства. Безопасность эксплуатации устройств СЦБ, с точки зрения их обслуживания, находится в обратной зависимости от величины напряжения. Но, учитывая, что устройства СЦБ являются низковольтными стационарными установками, выполнение правил техники безопасности, ликвидирующих возможность несчастных случаев при больших из принятых величин напряжения, во время их эксплуатации не вызывает значительных трудностей.

Основным фактором, определяющим оптимальность величины напряжения устройств СЦБ, являются экономические затраты на питание. При этом наивыгоднейшая величина напряжения будет являться и оптимальной для данных конкретных условий.

Вопрос о наивыгоднейшей величине напряжения питания устройств СЦБ не подвергался тщательному теоретическому исследованию. При определении наивыгоднейшей величины напряжения учитывался лишь один из факторов, характеризующих экономические затраты на питание устройств СЦБ, — величина амортизационных отчислений на кабельную сеть и совершенно не учитывались стоимость расхода энергии, потребляемой устройствами, и величина амортизационных отчислений на источники питания. Более того, амортизационные отчисления на кабельную сеть ошибочно принимались за величину, обратно пропорциональную напряжению. Такое одностороннее и ошибочное решение вопроса о наивыгоднейшей величине напряжения привело к неправильному выводу: чем больше величина напряжения, тем она выгоднее.

Основным потребителем электрической энергии в устройствах СЦБ являются лампы светофоров. Для нормальной работы светофоров надо создать определенную освещенность. Для этого, как видно из таблицы, при различной величине напряжения потребуется различная мощность. Причем, чем выше напряжение, тем бо́льшая мощность необходима для создания той же освещенности.

Таким образом, повышение напряжения в $n$ раз приводит к уменьшению тока в $n - i$ раз. Следовательно, для определения оптимальной

Таблица

| Мощность, *вт* | Световой поток, *лм* | | Разница потребления мощности, % |
|---|---|---|---|
| | при 220 *в* | при 110 *в* | |
| 15 | 125 | 145 | 16 |
| 25 | 230 | 255 | 11 |
| 40 | 395 | 470 | 19 |
| 60 | 660 | 820 | 24 |

величины напряжения необходимо учитывать все факторы, влияющие на величину годовых эксплуатационных затрат.

Величина годовых эксплуатационных затрат $S$ является какой-то функцией напряжения $U$.

$$S=f(U).$$

Если найти выражение этой функции и, взяв производную $\frac{dS}{dU}$, приравнять ее нулю $\frac{dS}{dU}=0$, то, очевидно, получим условия экстремума величины годовых эксплуатационных затрат $S$ на всю систему питания.

Годовые эксплуатационные затраты на систему питания складываются из:

а) стоимости годового расхода энергии $K$, потребляемой всеми устройствами СЦБ;

б) годовых амортизационных отчислений на кабельную сеть $Л$;

в) годовых амортизационных отчислений на источники питания $П$.

Стоимость, а следовательно, и величина годовых амортизационных отчислений на буферное питание, на определение оптимальной величины напряжения никакого влияния не оказывает, так как применяемые в настоящее время стрелочные электроприводы питаются от троллейного провода или самостоятельного токоисточника и имеют следующую техническую характеристику:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Вес | 125 *кг* | Время перевода . | 0,3—0,4 *сек* |
| Сила тяги . . . . | 100 *кг* | Диаметр обмотки провода . . | 0,8 *мм* |
| Номинальное напряжение | 250 *в* | Число витков | 4500 |
| Минимальное напряжение | 160 *в* | Ход перьев | До 65 *мм* |
| Ток | 4,4 *а* | Мощность | 1,146 *квт* |

Применение электропривода с более низким напряжением ведет к увеличению и без того значительных веса и габаритов, поэтому необходимо считать $U=250$ *в* $=\text{const}$.

Таким образом, для осуществления буферного питания стрелочных электроприводов необходима батарея на $U=250$ *в*. Напряжение ламп светофоров и реле может изменяться в диапазоне от 12 до 250 *в*. Создавать самостоятельный источник буферного питания для релейной схемы и светофоров нерационально, так как с имеющегося токоисточника 250 *в* можно снять любое необходимое напряжение.

Стоимость буферного питания на 250 *в* не будет оказывать влияния на выбор напряжения для релейной схемы и ламп. Дополнительный расход энергии на реле и лампы может быть вызван только аварийными случаями, поэтому он не может служить каким-либо основанием в доказательстве влияния стоимости этой величины энергии на напряжение

реле и ламп. При выборе оптимальной величины напряжения амортизационные отчисления на буферное питание нами учитываются. Таким образом,

$$S = K + Л + П.$$

Выразив все слагаемые через $U$, определим

$$S = f(U).$$

### 1. Стоимость годового расхода энергии

Потребителями электрической энергии устройств СЦБ, как указывалось выше, являются лампы светофоров и реле. [1]

Величина энергии, расходуемой на работу реле, незначительна и составляет $\rho\,\%$ от энергии, потребляемой лампами светофоров (согласно данным практики, $\rho = 5—10\,\%$).

Определив величину стоимости годового расхода энергии, потребляемой лампами светофоров, находим общую стоимость годового расхода энергии, так как

$$K = M + P,$$

где $M$ — стоимость годового расхода энергии, потребляемой всеми лампами светофоров;

$P$ — стоимость годового расхода энергии, потребляемой реле.

По формуле В. М. Хрущева [1], мощность $P$, необходимая для создания освещенности $\Phi$,

$$P = \Phi\,(f + jU),$$

где $f$ и $j$ — постоянные величины, отнесенные к 1 *лм*, *квт*.

Тогда стоимость годового расхода энергии, потребляемой всеми лампами светофоров,

$$M = \Phi\,(f + jU)\,Tm, \qquad (1)$$

где $\Phi$ — световой поток, создаваемый одновременно всеми горящими лампами, число которых равно числу светофоров, *лм*;

$U$ — напряжение, *в*;

$T$ — годовая продолжительность горения ламп светофоров, час.;

$m$ — стоимость 1 *квт-ч* энергии.

Соответственно стоимость годового расхода энергии, потребляемой реле,

$$P = M\frac{\rho}{100} = \Phi\,(f + jU)\,Tm\,\frac{\rho}{100},$$

$$P = \Phi\,(f + jU)\,Tm\,\frac{\rho}{m}. \qquad (2)$$

Тогда общие годовые расходы на энергию, потребляемую всеми устройствами СЦБ,

$$K = \Phi\,(f + jU)\,Tm + \Phi\,(f + jU)\,Tm\,\frac{\rho}{m},$$

$$K = \Phi\,(f + jU)\left(1 + \frac{\rho}{100}\right)Tm. \qquad (3)$$

---

[1] Потребление энергии индуктивными датчиками не учитывается, так как они работают на переменном токе. Это делает невозможным в условиях шахт резервирование питания, а следовательно, и надежности работы устройств СЦБ.

Для обеспечения надежной работы устройств СЦБ целесообразны «педальные» датчики, не требующие никакого питания и хорошо зарекомендовавшие себя в работе.

## 2. Амортизационные отчисления на кабельную сеть

Для определения величины годовых амортизационных отчислений на кабельную сеть необходимо знать стоимость кабельной сети и срок амортизации или годовой процент амортизационных отчислений.

Срок амортизации или процент годовых амортизационных отчислений — величина заданная. Стоимость кабельной сети зависит от нескольких параметров: а) *общего сечения жил кабелей* $q$; б) *числа* кабельных участков; в) длины кабелей на участках; г) марки кабелей (вида изоляции); д) способа прокладки и монтажа.

Так как в устройствах СЦБ подземной электровозной откатки применяется низкое напряжение, марка кабеля, способ монтажа и прокладки не зависят от величины напряжения (для данных определенных условий). Следовательно, марка кабеля, способ его монтажа и прокладки на определение оптимальной величины напряжения влияния не оказывают.

Из перечисленных выше факторов лишь сечение жил кабеля $q$ и длина кабеля $l$ связаны функциональной зависимостью с величиной напряжения, так как

$$q = \frac{200Pl}{57\sigma U^2},$$

где $P$ — передаваемая кабелем мощность, *квт*;

$\sigma$ — падение напряжения в кабеле, %.

Для определения зависимости стоимости кабельной сети от величины напряжения полную стоимость кабельной сети необходимо разделить на части, зависящие и не зависящие от величины напряжения.

### Стоимость меди всей кабельной сети

Как установлено выше, из всех параметров, определяющих стоимость кабельной сети, с величиной напряжения функциональной зависимостью связаны лишь сечение и длина кабеля. Поэтому, выразив зависимость стоимости материала (меди) кабельной сети $C_м$ от величины напряжения, установим зависимость стоимости кабельной сети $Л_с$ от величины напряжения $U$.

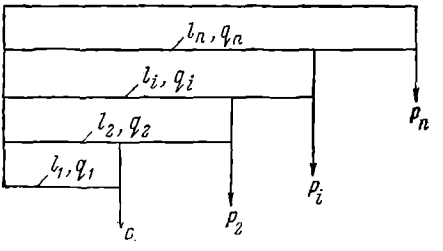



Рис. Схема распределения нагрузки в сети

Всю кабельную сеть можно представить в виде ряда $i$ параллельных магистралей с сечением проводов $q_i$, длиной $l_i$ и несущих загрузку $P_i$. Так, на рис. 1 $q_i$ — сечение проводов питающих какой-то $i$-ый токоприемник; $l_i$ — длина провода до $i$-го токоприемника; $P_i$ — мощность $i$-го токоприемника.

Схематично кабельная сеть будет иметь вид провода, рассчитанного на постоянную плотность тока. Величину падения напряжения у всех токоприемников принимаем одинаковой.

Чтобы определить стоимость меди подобного провода, являющуюся функцией величины напряжения $C_м = f(U)$, необходимо знать объем меди, затрачиваемой на этот провод и величину стоимости единицы меди.

Положим, что длина 1 *м* провода сечением 1 *мм*$^2$ стоит $b$, тогда

$$C_м = b\sum_{i=1}^{i=n} q_i l_i.$$

Но известно, что объем меди провода с одинаковой плотностью тока равен объему меди провода с приведенным однородным сечением $V_q$ при условии равенства максимальных падений напряжений

$$V_i = V_q = V_{\text{пр}}$$

и

$$\Delta U_{i_{\max}} = \Delta U_{q_{\max}}.$$

Но приведенный объем при однородном сечении

$$V_{\text{пр}} = 2l_{\text{п}}q_{\text{пр}},$$

где $l_{\text{п}}$ — длина провода до самого удаленного токоприемника;
$q_{\text{пр}}$ — приведенное сечение провода.

$$q_{\text{пр}} = \frac{200P_{\text{пр}}l_{\text{п}}}{57\sigma U^2},$$

где $P_{\text{пр}}$ — приведенная мощность токоприемников к длине $l_{\text{п}}$.

$$P = P_1 + P_2 + \quad + P_i + \ldots P_n,$$

где $P$ — общая суммарная мощность всех токоприемников.

$$\alpha = \frac{\int\limits_0^L ixdx}{L\int\limits_0^L idx} = \frac{\int\limits_0^{l_{\text{п}}} ixdx}{l_{\text{п}}\int\limits_0^{l_{\text{п}}} idx},$$

где $\alpha$ — коэффициент приведения, характеризующий распределение нагрузки,
так как $L = l_{\text{п}}$
Тогда

$$q_{\text{пр}} = \frac{200\alpha Pl_{\text{п}}}{57\sigma U^2}.$$

Объем меди

$$V_i = V_q = 2\,\frac{200\alpha Pl_{\text{п}}^2}{57\sigma U^2},$$

а стоимость меди всей кабельной сети

$$C_{\text{м}} = \frac{400\alpha bPl_{\text{п}}^2}{57\sigma U^2}$$

Мощность всех токоприемников устройств

$$P = \Phi(f + jU)\left(1 + \frac{\rho}{100}\right).$$

Подставляя в формулу стоимости, получим

$$C_{\text{м}} = \frac{400\alpha b}{57\sigma U^2}\, l_{\text{п}}^2\Phi(f + jU)\left(1 + \frac{\rho}{100}\right). \qquad (4)$$

### 3. Стоимость изоляции и монтажа кабельной сети

Две части стоимости кабельной сети, как указано выше, не связаны функциональной зависимостью с величиной напряжения и независимо от его величины являются постоянными для данной сети.

Общая стоимость изоляции всей кабельной сети

$$\gamma = \gamma' \sum_{i=1}^{i=n} l_i,$$

где $\gamma'$ — стоимость изоляции 1 *м* кабеля;

$\sum_{i=1}^{i=n} l_i$ — сумма длин всех участков сети.

Стоимость монтажа

$$\omega = \omega' \sum_{i=1}^{i=n} l_i,$$

где $\omega'$ — стоимость монтажа 1 *м* кабеля.

Оба эти члена не оказывают влияния на выбор оптимальной величины напряжения, так как для данных конкретных условий $\omega' = \text{const}$, $\gamma' = \text{const}$, $\sum_{i=1}^{i=n} l_i = \text{const}$ являются постоянными слагаемыми.

Зная части полной стоимости кабельной сети и процент годовых амортизационных отчислений, можно определить годовые амортизационные отчисления на кабельную сеть

$$Л = (C_м + \omega + \gamma)\frac{\nu}{100},$$

где $\nu$ — процент годовых амортизационных отчислений на кабельную сеть.

Или, подставляя значения $C_м$, $\omega$ и получим

$$Л = \left[\frac{400\alpha b}{57\sigma U^2} l_п^2 \Phi (f + jU)\left(1 + \frac{\rho}{100}\right) + \omega' \sum_{i=1}^{i=n} l_i + \gamma' \sum_{i=1}^{i=n} l_i\right]\frac{\nu}{100};$$

$$Л = \left[\frac{7{,}02\alpha b}{\sigma U^2} l_п^2 \Phi (f + jU)\left(1 + \frac{\rho}{100}\right) + (\omega' + \gamma') \sum_{i=1}^{i=n} l_i\right]\frac{\nu}{100}. \qquad (5)$$

### 4. Стоимость источников питания

Для определения стоимости источников питания напряжением $U$ мощностью

$$P = \Phi (f + jU)\left(1 + \frac{\rho}{100}\right)$$

предварительно необходимо установить часть стоимости источников питания, отнесенную к 1 *квт* мощности.

Положим $\psi'$ — часть стоимости источника питания, отнесенная к 1 *квт*;

$\lambda$ — стоимость одного элемента источника питания (шайбы);

$\beta$ — число элементов источника.

Очевидно,

$$\psi' = \lambda\beta, \text{ но } \beta = \frac{10^3}{ui},$$

где $u$ — величина обратного напряжения одной шайбы;

$i$ — максимальный ток на одну шайбу.

Тогда полная стоимость источников питания, исходя из $\psi = \psi' P$, будет

$$\psi = \lambda\Phi \frac{10^3}{ui} (f + jU)\left(1 + \frac{\rho}{100}\right). \qquad (6)$$

В пределах допустимой погрешности положим, что процент годовых амортизационных отчислений на источники питания равен проценту годовых амортизационных отчислений на кабельную сеть $\nu$.

Величина годовых амортизационных отчислений на источники питания

$$П = \lambda\Phi \frac{10^3}{ui}(f + jU)\left(1 + \frac{\rho}{100}\right)\frac{\nu}{100}. \tag{7}$$

Таким образом определены части стоимости годовых эксплуатационных затрат на систему питания. Но

$$S = K + Л + П$$

или, подставляя значения $K$, $Л$, $П$, получим

$$S = \Phi Tm(f + jU)\left(1 + \frac{\rho}{100}\right) + \left[\frac{7{,}02ab}{\sigma U^2} l_п^2 \Phi (f + jU)\left(1 + \frac{\rho}{100}\right) + \right.$$

$$\left. + (\omega' + \gamma') \sum_{i=1}^{i=n} l_i + \lambda\Phi \frac{10^3}{ui}(f + jU)\left(1 + \frac{\rho}{100}\right)\right]\frac{\nu}{100}. \tag{8}$$

Если обозначить через $B$, $C$ и $D$ коэффициенты при $U$, $\frac{1}{U^2}$, $\frac{1}{U}$, то стоимость выразится следующей формулой:

$$S = f(U), \quad S = E + \frac{C}{U^2} + \frac{D}{U} + BU. \tag{9}$$

При этом

$$E = (\omega' + \gamma') \sum_{i=1}^{i=n} l \frac{\nu}{100};$$

$$B = \Phi j\left(1 + \frac{\rho}{100}\right)\left(Tm + \lambda \frac{10\nu}{ui}\right);$$

$$C = \frac{7{,}02ab}{\sigma} l_п^2 \Phi f\left(1 + \frac{\rho}{100}\right)\frac{\nu}{100};$$

$$D = \frac{7{,}02ab}{\sigma} l_п^2 \Phi j\left(1 + \frac{\rho}{100}\right)\frac{\nu}{100}.$$

Теперь необходимо выяснить, имеет ли эта функция минимум и определить условия этого минимума.

Взяв первую производную $\frac{dS}{dU}$ и приравняв ее нулю, получим условие extr

$$\frac{dS}{dU} = B - \frac{2C}{U^3} - \frac{D}{U^2} = 0$$

или

$$BU^3 - DU - 2C = 0. \tag{10}$$

Графическое решение этого уравнения представлено рис. 2. Очевидно, равенство (10) справедливо при $BU^3 = DU + 2C$; $BU^3 = F_1(U)$ — кубическая парабола; $DU + 2C = F_2(U)$ — прямая с начальной ординатой $2C$.

При каком-то значении $U^*$ (extr) при $F_1(U) = F_2(U)$ парабола прямой пересекутся (рис. 2).

Чтобы определить характер extr, необходимо взять вторую производную $\frac{d^2S}{dU^2} \begin{cases} < 0 - \max \\ > 0 - \min \end{cases}$

$$\frac{d^2S}{dU^2} = \frac{6C}{U^4} + \frac{2D}{U^3} \tag{11}$$

Так как коэффициенты $C$ и $D$, какой бы они ни были величины, могут иметь только положительное значение при любой величине напряжения, всегда $\frac{d^2S}{dU^2} > 0$, т. е. имеется минимум — условие оптимальности величины напряжения как минимума годовых эксплуатационных затрат $S$ на систему питания (рис. 3).

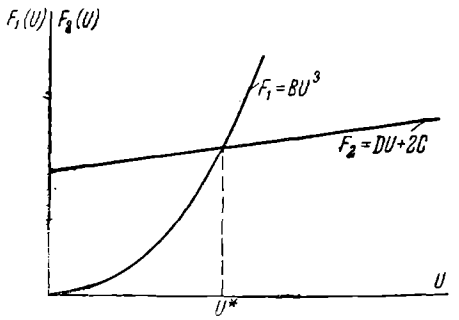



Рис. 2. Графическое определение величины напряжения

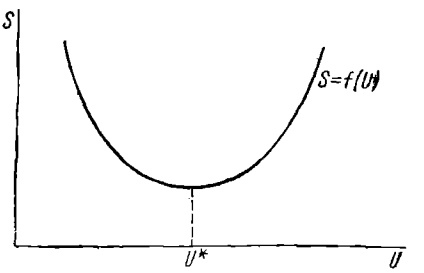



Рис. 3. Зависимость стоимости от величины напряжения

Вследствие того, что оптимальная величина напряжения в зависимости от условий будет различной и может принимать (для условий шахт) любое значение в диапазоне от 12 до 250 *в*, вопрос оптимальности величины $U$ представляет лишь теоретический интерес.

На практике не представляется возможным принимать напряжения *любой* (пусть даже *оптимальной*) величины, так как вся применяемая аппаратура стандартизована и разработана на напряжение 24—36—110—220 *в*. Поэтому отпадает необходимость в решении уравнения

$$BU^3 - DU - 2C = 0.$$

Задачей проектирующих и промышленных организаций является обеспечение максимальной экономичности системы питания, исходя из условий возможности использования стандартных величин напряжения.

Для выполнения этой задачи необходимо, определив для условий проектируемой шахты значения коэффициентов $B$, $C$, $D$ и подставляя эти значения в основное уравнение стоимости годовых эксплуатационных затрат

$$S = E + \frac{C}{U^2} + \frac{D}{U} + BU$$

при различных значениях напряжения, найти $S_{min}$.

Величина напряжения при которой $S = S_{min}$, и явится наивыгоднейшей для проектируемой шахты.

**Литература**

Хрущев В. М. Электрические сети и линии, Ч. . Энергоиздат, 1932.