Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LIII, вып. 1, 1966 г.

УДК 62—83 + 622.67

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПОДЪЕМНЫМИ МАШИНАМИ *

Людгер Шклярский, Богдан Фиялковский

При проектировании подъемной установки необходимо исходить из технологических условий (максимальной производительности), безопасности труда и надежности работы установки, капитальных и эксплуатационных затрат.

Поэтому следует правильно выбрать оптимальную скорость подъема и оптимальный вес полезного груза. Изменение стоимости приводной части вследствие изменения мощности и момента подъемного двигателя оказывают незначительное влияние на себестоимость 1 m полезного ископаемого. Однако при недостаточной производительности подъемной машины будет ограничена производительность всей шахты.

Предлагаются разные критерии выбора оптимальной скорости [Еланчик, 1953; Landau, 1953]. Однако все исследователи считают, что для шахтных подъемных установок единственной рациональной тахограммой будет трапецеидальная при максимальной скорости от 0,4 до 0,7 *максимальной скорости треугольной диаграммы скорости*.

Ф. Ландау [1953] принимает максимальную скорость 0,4 — 0,5. Такая скорость ограничивает эффективный момент и обеспечивает самое короткое время подъема.

Вл. Штвертня [1957] рекомендует принимать эту зависимость в границах от 0,6 до 0,7. Она обеспечивает самые низкие капитальные затраты и эксплуатационные расходы всей подъемной установки (включая стоимость копра, ствола, оборудования поверхности и т. п.).

Рассматривая оптимальную тахограмму, П. Дежерату (1965 г.) выводит для симметричной тахограммы зависимость

$$z = \frac{t_1}{T} = \frac{y^2}{y^2+1},$$

где t_1 и T — время разгона и время всего цикла; y — скорость в относительных единицах, $y = \frac{v_{max}}{v_0}$, v_{max} — установившаяся скорость; v_0 — максимальная скорость треугольной тахограммы.

На основании этой формулы получена диаграмма $z = fy$ рис. 1 [Minasievicz, 1966]. Диаграмма дает границы оптимальной скорости

* Статья публикуется в соответствии с соглашением о содружестве между Краковской горно-металлургической академией (ПНР) и Ленинградским горным институтом им. Г. В. Плеханова.

подъема с точки зрения минимального пика мощности P_{min} (при z от 0,3 до 0,4), минимального эффективного момента $M_э$ (для $z = 0{,}33$) и минимальной номинальной мощности $P_н$ (для $z = 0{,}1$ до 0,2). При изменении параметров подъемной установки (например, рабочего гори-

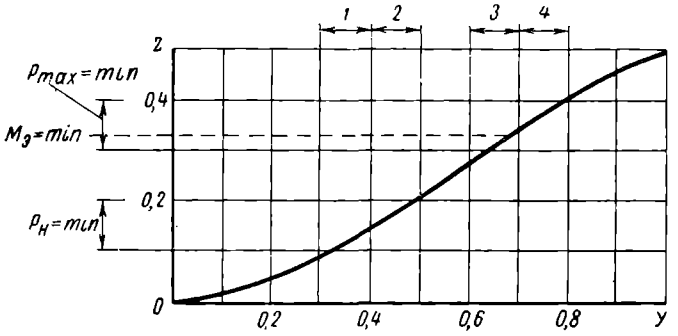


Рис. 1. Зависимость некоторых параметров подъемной установки от относительной скорости.

Минимум максимальной мощности P_{max} для $z = 0{,}3 \div 0{,}4$; минимум эффективного момента $M_э$ для $z = 0{,}33$; минимум номинальной мощности $P_н$ для $z = 0{,}1$ 0,2.
По данным: *1* — СССР [Еланчик, 1953]; *2* — Швеции [Landau, 1953]; *3* — Польской Народной Республики (Sztwiertnia, 1957)]; *4* — максимально допустимая скорость с точки зрения безопасности.

зонта) можно сохранить минимальную эффективную мощность подъемного двигателя. С этой целью необходимо изменить максимальную скорость, а следовательно, ускорение и замедление, т. е. тахограмму.

Изменить тахограмму можно «вручную» или автоматически при помощи оптимизатора, задающего диаграмму скорости. На схеме рис. 2

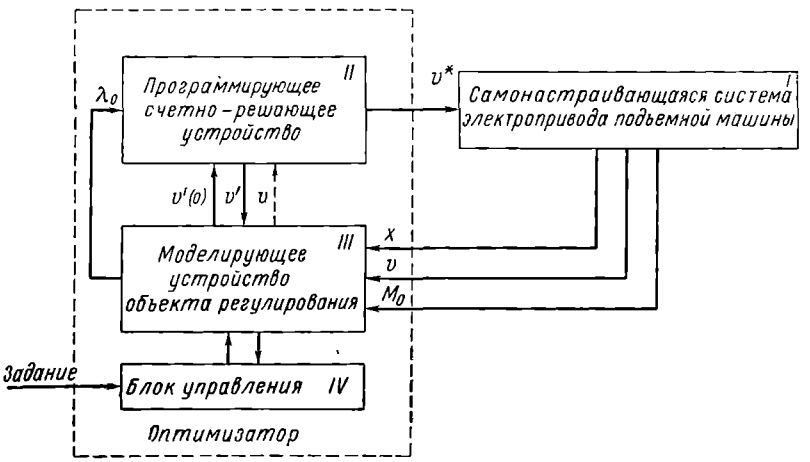


Рис. 2. Блок-схема оптимизации управления самонастраивающейся системы электропривода подъемной установки.

звено *I* содержит привод подъемной установки, подъемный двигатель, каскад мощности якоря, каскад мощности возбуждения и систему управления скорости.

Уравнения Эйлера, вытекающие из критерия оптимальности, полученного по вариационному принципу, решаются в звене *II*. Таким образом,

на выходе звена получаются искомые заданные оптимальные диаграммы скорости, ускорения и тока * Сигнал скорости, получаемый на выходе звена *II*, будет сигналом заданной скорости v^*. Этот сигнал подводится на вход системы автоматического управления скоростью (звено *I*). Звено *III* в зависимости от конкретных условий (полезного груза M_0, пути x, положения подъемного сосуда, скорости v, ускорения v') изменяет параметры звена *II* подачей суммирующих сигналов λ_0 и v_0'. Звено *IV* построено на базе логических элементов. Оно управляет звеньями *II* и *III*.

Система управления электроприводом должна обеспечить возможность изменения скорости подъемной машины не только в границах от нуля до номинальной, но иногда и выше номинальной. При этом требуе-

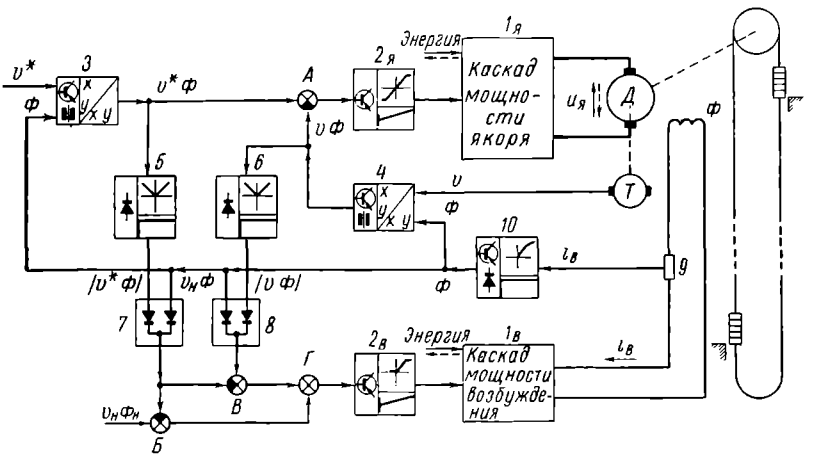


Рис. 3. Самонастраивающаяся система электропривода, соответствующая звену *I* рис. 2.

мая работа со скоростью выше номинальной может иметь место при уменьшенном поднимаемом грузе, т. е. в этом случае номинальная мощность не будет превзойдена, а двигатель выбирается по условиям номинального режима.

В соответствии с приведенным выше на кафедре горной электротехники Краковской горно-металлургической академии разработана самонастраивающаяся система управления скоростью подъемной машины с применением аналоговых вычислительных и логических элементов (рис. 3). Эта система при необходимости позволяет получить расширенный диапазон регулирования скорости. Регулирование сначала осуществляется изменением напряжения якоря двигателя, а затем изменением его поля возбуждения в зависимости от требуемой максимальной скорости подъема, задаваемой оптимизатором. Идея регулирования подъемного двигателя постоянного тока изменением напряжения якоря и потока возбуждения была использована несколько лет тому назад фирмами в системах Variflux и Contiflux [Ludwig, 1954; Prowse, 1965].

Принцип действия самонастраивающейся системы электропривода подъемной установки. В существующих системах электропривода постоянного тока подъемных машин заданной величиной является скорость v^*. Сигнал этот сравнивается с сигналом действительной скорости v, давая в результате ошибку Δv. Этот сигнал, проходя через регулятор,

* Звездочкой помечены заданные параметры.

управляет каскадом мощности объекта управления, регулируя таким образом подъемный двигатель.

Если необходимо осуществить управление приводом обоими способами, т. е. изменением напряжения якоря двигателя (при постоянном моменте) и его полем возбуждения (при постоянной мощности двигателя), сигнал заданной скорости v^* превращается в сигнал заданной э. д. с. двигателя E^* (см. рис. 3). Этот сигнал равен произведению заданной скорости v^* и действительной величины магнитного потока Ф

$$E^* = \Phi v^*$$

Таким образом, сигнал заданной величины э. д. с. будет одновременно сигналом обеих заданных величин напряжения якоря и потока возбуждения. Подобным образом сигнал действительной скорости превращается в сигнал э. д. с. E^*, равный произведению сигнала скорости v и потока возбуждения Ф

$$E = \Phi v.$$

Следовательно, сигнал заданной величины E^* и сигнал действительной величины E дают в результате сигналы ошибок, которые необходимы для регулирования скорости подъемного двигателя.

Переход от режима при $\Phi = \text{const}$ к режиму при $\Phi v = \text{const}$ становится возможным благодаря аналоговым логическим элементам типа «больше чем». Реверсирование подъемного двигателя осуществляется при помощи аналогового логического элемента типа «модуля» и изменением сигнала заданной скорости v^*. Каскады мощности цепи якоря и возбуждения $1_я$ и $1_в$ могут быть любого типа, т. е. генератор (при системе *Г — Д*) или управляемый статический преобразователь (при системе *УСП — Д*). Каскады мощности $1_я$ и $1_в$ управляются соответственно регуляторами $2_я$ и $2_в$ пропорционально-интегрирующего или пропорционально-интегро-дифференцирующего типа.

Система управления содержит также множительные звенья *3* и *4*, звенья типа «модуль» (звенья абсолютных величин) *5* и *6*, и, наконец, звенья типа «больше чем» *7* и *8*.

Сигнал действительной скорости измеряется тахогенератором *T*, сигнал действительной величины магнитного потока возбуждения трансформатором постоянного тока или шунтом *9*. Этот сигнал проходит через нелинейный преобразователь *10*, который моделирует поток возбуждения двигателя в функции тока возбуждения.

Работа системы при $\Phi = \text{const}$. Система начинает работать при полном возбуждении двигателя. Регулирование скорости осуществляется изменением сигнала заданной скорости v^* в соответствии с заданной тахограммой в границах.

$$0 \leqslant v^* \leqslant 1. \qquad (1)$$

Этот сигнал множится на сигнал действительной величины потока возбуждения Ф при помощи множительного звена *3* (см. рис. 3), которое дает сигнал э. д. с.

$$E^* = \Phi v^*.$$

С другой стороны, умножение сигнала действительной скорости v на сигнал действительной величины потока возбуждения Φ (в звене *4*) дает сигнал действительной величины э. д. с.

$$E = \Phi v. \qquad (3)$$

Сигналы абсолютных величин заданной $|E|^*$ и действительной $|E|$ э. д. с. двигателя, полученные на выходе звеньев *5* и *6*, совместно

с сигналом э. д. с. E, соответствующим номинальной скорости $v_н$ и действительной величине потока Ф ($E = \Phi v_н$), подводятся к звеньям «больше чем» *7* и *8*.

Таким образом, в суммарных узлах $Б$ и $В$ получим

$$\Delta E_Б = \Phi_н v_н - \max(\Phi v^* \operatorname{sign} \Phi v^*, \Phi v_н), \tag{4}$$

$$\Delta E_В = \max(\Phi v \operatorname{sign} \Phi v, \Phi v_н) - \max(\Phi v^* \operatorname{sign} \Phi v^*, \Phi v_н). \tag{5}$$

Здесь $\Phi_н v_н = E_н$ является сигналом номинальной э. д. с. двигателя.

Так как в рассматриваемом сейчас режиме

$$\Phi v^* \operatorname{sign} \Phi v^* < \Phi v_н, \tag{6}$$

$$\Phi v \operatorname{sign} \Phi v < \Phi v_н \tag{7}$$

и

$$v_н = 1, \tag{8}$$

то

$$\Delta E_Б = \Phi_н - \Phi, \tag{9}$$

$$\Delta E_В = 0. \tag{10}$$

Таким образом, в узле $Г$ сигнал ошибки будет

$$\Delta E_Г = \Delta E_Б + \Delta E_В = \Phi_н - \Phi. \tag{11}$$

Этот сигнал управляет каскадом мощности цепи возбуждения двигателя при помощи регулятора $2_в$ таким образом, что сохраняется зависимость

$$\Phi \approx \Phi_н = 1 = \text{const}. \tag{12}$$

Условие это не зависит от возможных возмущений.

В это же время сигналы заданной и действительной величины э. д. с. двигателя сравниваются в узле $А$, на выходе которого получает сигнал ошибки э. д. с.

$$\Delta E_А = \Phi v^* - \Phi v = \Phi(v^* - v). \tag{13}$$

Принимая во внимание зависимость (12), формула (13) может быть представлена в виде

$$\Delta E_А = v^* - v = \Delta v. \tag{14}$$

Таким образом сигнал ошибки $\Delta E_А$ при помощи регулятора $2_я$ и каскада мощности $1_я$ регулирует скорость подъемного двигателя в соответствии с заданной тахограммой, т. е. при соблюдении зависимости

$$v \approx v^* \tag{15}$$

при

$$\Phi \approx \Phi_н = 1 = \text{const}.$$

Работа системы при $\Phi v = \text{const}$. Если требуется увеличение скорости сверх номинальной, необходимо увеличить сигнал заданной скорости v^* так, чтобы он стал больше единицы

$$v^* > 1. \tag{16}$$

В этом случае

$$\Phi v^* \operatorname{sign} v^* \Phi > \Phi v_н \tag{17}$$

и

$$\Phi v \operatorname{sign} \Phi v > \Phi v_н, \tag{18}$$

получим

$$\Delta E_{Б} = \Phi_{н} v_{н} - \Phi v^{*} \operatorname{sign} \Phi v^{*}, \tag{19}$$

$$\Delta E_{В} = \Phi v \operatorname{sign} \Phi v - \Phi v^{*} \operatorname{sign} \Phi v^{*} \tag{20}$$

и

$$\Delta E_{Г} = \Delta E_{Б} + \Delta E_{В} = \Phi_{н} v_{н} + \Phi v - 2\Phi v^{*} \tag{21}$$

Последний сигнал ошибки $\Delta E_{Г}$ при помощи регулятора $2_{в}$ каскада мощности $1_{в}$ ослабляет поток возбуждения Ф так, что двигатель получает желаемую скорость.

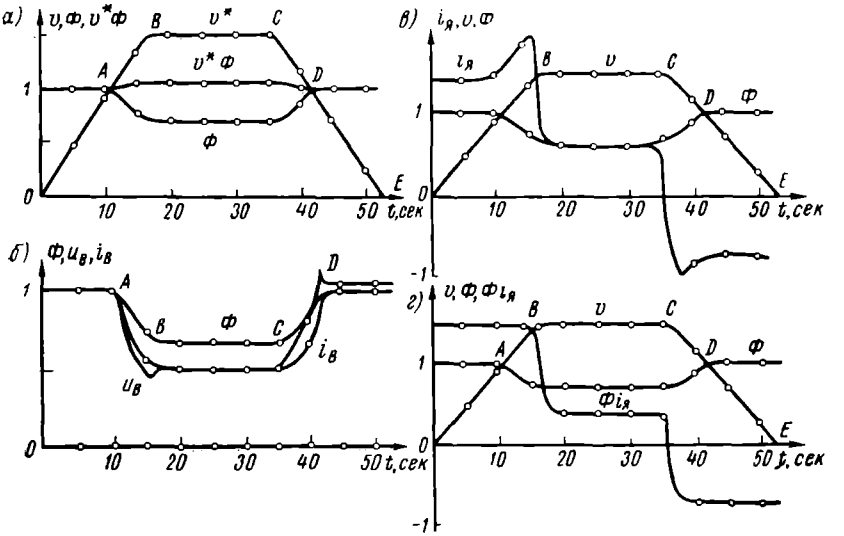


Рис. 4. Осциллограммы: *а* — скорости, потока возбуждения и э. д. с. двигателя; *б* — цепи возбуждения; *в* — тока якоря; *г* — момента двигателя.

Увеличение заданной и действительной скоростей (v^{*} и v) компенсируется уменьшением действительной величины потока возбуждения. Вследствие этого в узле A сигнал ошибки будет

$$\Delta E_{А} = \Phi v^{*} - \Phi v = \Phi (v^{*} - v) = \Phi \Delta v. \tag{22}$$

Этот сигнал управляет скоростью двигателя при помощи регулятора $2_{я}$ и каскада мощности $1_{я}$, благодаря чему действительная скорость v все время остается близкой к заданной v^{*} при сохранении условия

$$E = E_{н} = 1 = \text{const}.$$

Результаты исследования системы на аналоговой вычислительной машине. Описанная система электропривода подъемной машины моделирована и исследована на аналоговой вычислительной машине. За основу принят электропривод типа УСП-Д, мощностью 500 *квт*, при номинальной скорости двигателя 375 *об/мин* и напряжении 500 *в*.

На рис. 4, *а* кроме заданной тахограммы представлены диаграммы заданной скорости v^{*}, действительного магнитного потока двигателя Ф и диаграмма произведения заданной скорости на магнитный поток, полученная на выходе множительного звена *3* (рис. 3). Это произведение равно заданной величине э. д. с. двигателя. В интервале *OA* (рис. 4, *а*) пуск двигателя *D* происходит при постоянном потоке возбуждения и

линейно возрастающей э. д. с. двигателя $E^* = v^*$ Ф. Кривая заданной скорости и кривая заданной э. д. с. в интервале OA совпадают.

В интервале AB дальнейшее возрастание скорости происходит при постоянной э. д. с. v^* Ф и убывающим потоке возбуждения Ф. В этом интервале сохраняется постоянная величина э. д. с. (v^* Ф = const). Интервал BC соответствует режиму постоянной скорости, равной 1,5 $v_н$. Интервал CE соответствует замедлению подъемного двигателя.

На рис. 4, *б* представлены соответствующие осциллограммам рис. 4, *а*, осциллограммы потока возбуждения Ф, напряжения $u_в$ и тока возбуждения $i_в$.

На рис. 4, *в* представлены осциллограммы скорости двигателя v, потока возбуждения Ф и тока якоря $i_я$, на рис. 4, *г* — дополнительно кривые момента двигателя $Фi_я$. Кривые рис. 4, *в* и *г* соответствуют осциллограммам рис. 4, *а*. В интервалах AB и $CД$ ток якоря изменяется линейно (рис. 4, *в*), а момент двигателя $Фi_я$ остается постоянным (рис. 4, *г*).

Выводы

Для обеспечения минимальной стоимости подъемной установки рекомендуется установившаяся скорость подъема от 0,6 до 0,7 максимальной скорости при треугольной тахограмме, где эта максимальная скорость равна $\sqrt{aH}$ (a — ускорение, равное замедлению, H — глубина подъема). При этих скоростях пропускная способность ствола оказывается наибольшей [Sztwiertnia, 1957], а эффективный момент подъемного двигателя при заданной производительности — наименьшим. Понижение скоростей при заданной производительности потребует увеличения грузоподъемности сосудов. Однако максимальная скорость не должна превышать допустимую с точки зрения безопасности.

Самонастраивающаяся система электропривода подъемной установки дает возможность использовать полную номинальную мощность подъемного двигателя при изменяющихся режимах работы подъема.

ЛИТЕРАТУРА

Еланчик Г. М. Уравновешенные системы рудничного подъема. Углетехиздат, 1953.

Landau F. Design Principles for Friction Drive Hoists, Asea Journal, № 11—12, 1953.

Ludwig E. H. Das Contiflux-Verfahren. BBC-Druckschrift, Ind, 4034/m/s, 1954.

Minasiewicz St. Przegląd niektórych sposobów regulacji silników asynchronicznych maszyn wyciągowych. Referat, AGH, Kraków, 1966.

Prowse D. W. The Application of Transistors and Thyristors to Mine Winder Control. Bulletin A. E. *I.*, Rugly, 1965.

Sztwiertnia W. Materiały z konferencji «Napędy Elektryczne Maszyn Wyciągowych». AGH, Kraków, 1957.