

УДК 692.66:62-83

Семенюк В.Ф., д.т.н.; Бойко А.А., к.т.н.

## ОПТИМИЗАЦИЯ МАССЫ ПРОТИВОВЕСА ЛИФТОВЫХ ПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ

Для выбора массы противовеса подъемных механизмов пассажирских лифтов применяется общеизвестное расчетное выражение, учитывающее уравнивание масс кабины и части массы номинального груза [1]:

$$m_{\text{п}} = m_{\text{к}} + \varphi m_{\text{гр}}, \quad (1)$$

где  $m_{\text{к}}$  – масса кабины лифта, кг;  $m$  – номинальная масса груза, кг;  $\varphi$  – коэффициент уравнивания груза в кабине (с учетом статистических характеристик изменения фактической величины груза, рекомендуется принимать, как правило, равным 0,5.)

Применение, для питания приводного двигателя лебедки, преобразователя напряжения с фазовым параметрическим управлением, вносит ряд особенностей в общую картину потребления энергии механизмом подъема лифта [2,3]. В то же время, детальный расчет и анализ энергопотребления позволяет выбирать массу противовеса не на основании эмпирического коэффициента, а на основе конечной информации, которая позволит не только оценить степень влияния параметров подъемного механизма на суммарные потери энергии, но и формировать рекомендации по их выбору. Это определяет задачи исследования:

- разработка универсального машинного алгоритма и программы расчета потребляемой энергии лебедкой с асинхронным двигателем (АД) (как односкоростным, так и двухскоростным) и тиристорным преобразователем напряжения;

- оптимизация массы противовеса по критерию минимуму потребляемой энергии.

Несмотря на относительную несложность электромеханических переходных процессов в лифтовых лебедках с АД, при расчёте мощности двигателя и расхода электроэнергии существует множество параметров, учёт которых необходим, но приводит к громоздким и трудоёмким расчётам. Синтез и применение комплексного алгоритма расчета позволяет учесть большинство параметров механической и электрических составляющих, повысить точность расчётов, приводить циклические расчёты при варьировании значений одного или нескольких параметров, что является основой при поиске оптимальных решений. Идея оптимизации массы противовеса, по критерию минимума потребляемой энергии, базируется на основных положениях:

- при выборе мощности и габарита двигателя лебедки с тиристорным фазовым параметрическим управлением, для пассажирского лифта наибольшее значение имеют параметры динамических режимов (динамические моменты, потери энергии). Потребление энергии в статических режимах намного меньше, чем в переходных процессах и поэтому принцип статического уравновешивания кабины нельзя признать оптимальным.

- потоки пассажиров в жилых зданиях при подъёмах и спусках существенно отличаются. Коэффициенты загрузки кабины при подъёме больше, чем при спуске. Усреднённое значение веса груза при круговых поездках в часы пик также отличается от половины номинальной грузоподъёмности. В связи с этим, число пусковых и тормозных операций, проходящих в двигательном, наиболее не экономичном и в тормозном, более экономичном, режимах при существовании способа выбора массы противовеса распределяется не оптимальным образом.

Приближение к оптимуму будет более близким, если оптимизацию проводить за как можно более длительный отрезок времени, например, за год. Однако сведения, необходимые для этого расчёта (усреднённые коэффициенты загрузки кабины, длины поездок и их частота при подъёмах и спусках) отсутствуют, в связи, с чем расчёты проводились с учётом параметров, характеризующих работу лифта в часы пик. Исходные данные необходимы для расчета разделяются на три части: параметры движения кабины и пассажиропотока: скорость, ускорение, рывок кабины лифта, этажность здания, грузоподъёмность, коэффициенты загрузки кабины при подъёме и спуске, время остановки на этаже; параметры подъемного механизма лифта: масса кабины, массы канатов, моменты инерции шкивов и поступательно движущихся частей подъемного механизма; коэффициенты потерь АД:  $a_{м2}$  - коэффициент потерь в меди ротора;  $a_{м1}$  - коэффициент потерь в меди статора;  $a_{ст}$  - коэффициент потерь в стали;  $a_{нам}$  - коэффициент потерь в статоре от токов намагничивания;  $a_{пр}$  - прочие потери [4].

Алгоритм расчета предполагает 5 этапов.

Этап 1. В начале расчёта вводится предварительная мощность двигателя, определяемая согласно выражению [4]:

$$P_{предв} = (m_k + m_{гр} - m_{пр}) g \cdot V_n \quad (2)$$

где  $m_k$ ,  $m_{гр}$ ,  $m_{пр}$  – массы кабины, груза и противовеса, соответственно;  $V_n$  – номинальная скорость кабины.

В расчетную программу закладываются параметры базового приводного двигателя: момент инерции двигателя, номинальное скольжение, синхронная скорость, номинальный и максимальный моменты, КПД, номинальная мощность потерь. На данном этапе

существует возможность расчета мощности двигателя лебедки на основании новых скорректированных параметров подъемного механизма.

Этап 2. На каждом участке подъема и спуска определяется вид оптимальной диаграммы движения лифта, на основании заданных значений скорости, ускорения, рывка кабины, этажности здания, вероятного числа остановок при подъеме и спуске [5]. Оптимальная диаграмма одной элементарной поездки включает пуск, работу на установившейся скорости и торможение. Эта диаграмма рассчитывается и разбивается на 7 характерных участков, в пределах которых скорость кабины изменяется по одному определенному закону (рис. 1): 1-участок определяется временем  $t_A$  нарастания ускорения до номинального значения; 2-участок определяется временем  $t_B$  равноускоренного движения при  $a = a_1$ ; 3- участок определяется также временем  $t_A$  спадания ускорения до нуля и перехода к установившемуся движению; 4- участок определяется временем  $t_V$  установившегося движения; 5,6,7- участки характеризуются длительностями, аналогичными участкам 1,2,3 и описывают замедление кабины лифта.

Этап 3. Расчет мощности потерь в лебедке производится с учетом номинальных параметров (момента -  $M_n$ , потерь -  $\Delta P_n$ , скольжения -  $s_n$ ), коэффициентов распределения потерь.

Потери в двигательном режиме при работе на  $i$ -том участке оптимальной диаграммы определяются

$$\Delta W_{дв} = \Delta P_n \int_0^t \left[ \frac{a_{m1} + a_{m2}}{M_n \cdot S_n} \cdot (\pm M_{ci} \pm M_{дин}) \cdot \left( 1 - \frac{\omega(t)}{\omega_0} \right) + (a_{нам} + a_{ст}) \frac{M_i}{M_n} + a_{пр} \right] dt \quad (3)$$

При работе в тормозном режиме

$$\Delta W_T = \Delta P_n \int_0^t \left[ \frac{a_{m2}}{M_n \cdot S_n} \cdot (\pm M_{ci} \pm M_{дин}) \cdot \left( 1 - \frac{\omega(t)}{\omega_0} \right) + a_{стТ} \frac{M_i}{M_n} + a_{намТ} + a_{пр} \right] dt \quad (4)$$

где  $a_{намТ} = a_{нам} \left( \frac{I_{от}}{I_{он}} \right)^2$  - коэффициент потерь в АД от тока

намагничивания при торможении, определяемый по соотношению реального тока намагничивания при данных значениях момента номинального тока холостого хода [4];  $a_{стТ} = 0,5a_{ст}$  - коэффициент потерь в стали АД при торможении.

На каждом из семи участков оптимальной диаграммы, в зависимости от соотношения величин и знаков статического и динамического моментов, двигатель лебедки может работать либо в двигательном, либо в тормозном режиме. Вместе с тем для каждого из рассматриваемых участков характерно своё значение среднего

ускорения,  $a$ , следовательно, и динамического момента, а также определённая функциональная зависимость скорости от времени.

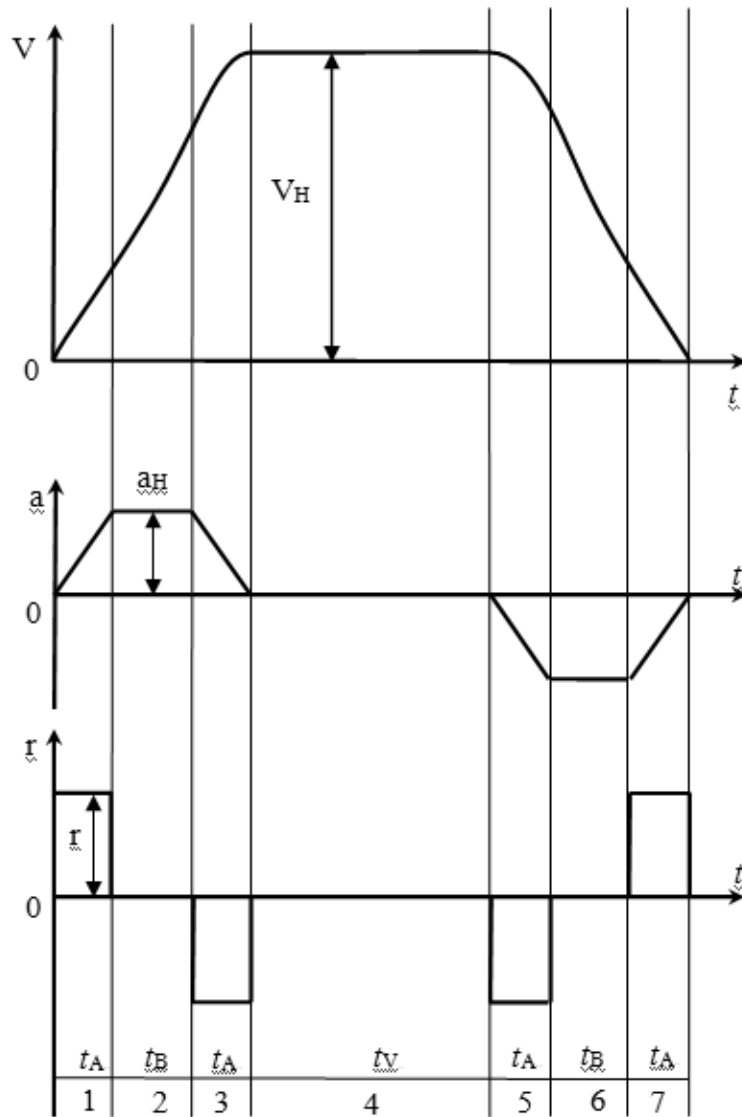


Рис.1. Оптимальная диаграмма движения кабины лифта

Поэтому после интегрирования выражений (3) и (4) и подстановки в них заданных значений скорости, ускорения и рывка определяются возможные выражения потерь:

- для двигательного режима

$$\Delta W_{П1} = \Delta P_H \cdot t_A \left[ K_1 \left( M_c + \gamma \frac{\epsilon}{2} \right) - \frac{\epsilon^2}{6\omega_0 r} \left( M_c + \gamma \frac{3\epsilon}{4} \right) + (a_{ст} + a_{нам}) \frac{M}{M_H} + a_{пр} \right];$$

$$\Delta W_{П2} = \Delta P_H \cdot t_B \left[ K_1 (M_c + \gamma \epsilon) \left( 1 - \frac{\omega}{2\omega_0} \right) + (a_{ст} + a_{нам}) \frac{M}{M_H} + a_{пр} \right];$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{II3} &= \Delta P_H \cdot t_A \left[ K_1 \left( M_c + \gamma \frac{\varepsilon}{2} \right) - \frac{1}{\omega_0} \left[ M_c \left( \omega_H - \frac{\varepsilon^2}{6r} \right) + \gamma \frac{\varepsilon}{2} \left( \omega_H - \frac{\varepsilon^2}{4r} \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + (a_{ct} + a_{HAM}) \frac{M}{M_H} + a_{np} \right]; \\ \Delta W_{II4} &= \Delta P_H \cdot t_y \left[ K_1 M_c \left( 1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right) + (a_{ct} + a_{HAM}) \frac{M}{M_H} + a_{np} \right]; \\ \Delta W_{II5} &= \Delta P_H \cdot t_A \left[ K_1 \left( M_c + \gamma \frac{\varepsilon}{2} \right) - \frac{1}{\omega_0} \left[ M_c \left( \omega_H - \frac{\varepsilon^2}{6r} \right) - \gamma \frac{\varepsilon}{2} \left( \omega_H - \frac{\varepsilon^2}{4r} \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + (a_{ct} + a_{HAM}) \frac{M}{M_H} + a_{np} \right]; \\ \Delta W_{II6} &= \Delta P_H \cdot t_B \left[ K_1 (M_c - \gamma \varepsilon) \left( 1 - \frac{\omega}{2\omega_0} \right) + (a_{ct} + a_{HAM}) \frac{M}{M_H} + a_{np} \right]; \\ \Delta W_{II7} &= \Delta P_H \cdot t_A \left[ K_1 \left( M_c - \gamma \frac{\varepsilon}{2} \right) - \frac{\varepsilon^2}{6\omega_0 r} \left( M_c - \gamma \frac{\varepsilon}{4} \right) + (a_{ct} + a_{HAM}) \frac{M}{M_H} + a_{np} \right]; \end{aligned} \right\}$$

- для тормозного режима

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{III} &= \Delta P_H \cdot t_A \left[ K_2 \left( -M_c + \gamma \frac{\varepsilon}{2} \right) - \frac{\varepsilon^2}{6\omega_0 r} \left( -M_c + \gamma \frac{3\varepsilon}{4} \right) + a_{CT} \frac{M}{M_H} + \right. \\ &\quad \left. + a_{HAM_T} + a_{np} \right]; \\ \Delta W_{III2} &= \Delta P_H \cdot t_B \left[ K_2 (-M_c + \gamma \varepsilon) \left( 1 - \frac{\omega}{2\omega_0} \right) + a_{CT} \frac{M}{M_H} + a_{HAM_T} + a_{np} \right]; \\ \Delta W_{III3} &= \Delta P_H \cdot t_A \left[ K_2 \left( -M_c + \gamma \frac{\varepsilon}{2} \right) - \frac{1}{\omega_0} \left[ -M_c \left( \omega_H - \frac{\varepsilon^2}{6r} \right) + \gamma \frac{\varepsilon}{2} \left( \omega_H - \frac{\varepsilon^2}{4r} \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + a_{CT} \frac{M}{M_H} + a_{HAM_T} + a_{np} \right]; \\ \Delta W_{III4} &= \Delta P_H \cdot t_y \left[ K_2 (-M_c) \left( 1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right) + a_{CT} \frac{M}{M_H} + a_{HAM_T} + a_{np} \right]; \\ \Delta W_{III5} &= \Delta P_H \cdot t_A \left[ K_2 \left( -M_c - \gamma \frac{\varepsilon}{2} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\omega_0} \left[ -M_c \left( \omega_H - \frac{\varepsilon^2}{6r} \right) - \gamma \frac{\varepsilon}{2} \left( \omega_H - \frac{\varepsilon^2}{4r} \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + a_{CT} \frac{M}{M_H} + a_{HAM_T} + a_{np} \right]; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta W_{\Pi 6} &= \Delta P_H \cdot t_B \left[ K_2 (-M_c - \gamma \epsilon) \left( 1 - \frac{\omega}{2\omega_0} \right) + a_{\text{CTT}} \frac{M}{M_H} + a_{\text{HAMT}} + a_{\text{np}} \right]; \\ \Delta W_{\Pi 7} &= \Delta P_H \cdot t_A \left[ K_2 \left( -M_c - \gamma \frac{\epsilon}{2} \right) - \frac{\epsilon^2}{6\omega_0 r} \left( -M_c - \gamma \frac{\epsilon}{4} \right) + a_{\text{CTT}} \frac{M}{M_H} + \right. \\ &\quad \left. + a_{\text{HAMT}} + a_{\text{np}} \right]; \end{aligned} \right\}$$

где  $K_1 = \frac{a_{m1} + a_{m2}}{M_H \cdot S_H}$ ;  $K_2 = \frac{a_{m2}}{M_H \cdot S_H}$ .

Расчётная мощность потерь за одну круговую поездку лифта

$$\Delta P_p = \frac{\sum \Delta W_{\text{Дв}i} + \sum \Delta W_{\text{Y}i} + \sum \Delta W_{\text{T}i}}{\sum \Delta t_{\text{Дв}i} + \sum \Delta t_{\text{Y}i} + \sum \Delta t_{\text{T}i} + \sum \Delta t_0}, \quad (7)$$

где  $t_0$  – время стоянки на этаже.

Этап 4. Проверка выбора двигателя лебедки по нагреву и перегрузочной способности [6]

$$\frac{\Delta P_H - \Delta P_p}{\Delta P_H} \leq 0,05, \quad (8)$$

$$M_{\text{max p}} < M_{\text{max дв}}. \quad (9)$$

Этап 5. Расчёт потребляемой из сети энергии проводится также с учётом режима работы лебедки, в зависимости от соотношения статического и динамического моментов. При работе в двигательном режиме затраты энергии складываются из энергии потерь и энергии, идущей на совершение полезной механической работы на канатоведущем шкиве подъемного механизма [7]:

$$\Delta W_9 = \int_0^{t_i} M\omega(t) dt. \quad (10)$$

По участкам оптимальной тахограммы:

$$\begin{aligned} \Delta W_{91} &= \frac{1}{\eta} \left( M_c + \gamma \frac{3\epsilon}{4} \right) \frac{rt_A^3}{6}; \quad \Delta W_{92} = \frac{1}{\eta} t_B (M_c + \gamma \epsilon) \frac{\omega}{2}; \\ \Delta W_{93} &= \frac{1}{\eta} t_A \left[ M_c \left( \omega - \frac{\epsilon^2}{6r} \right) + \gamma \epsilon \left( \frac{\omega}{2} + \frac{\epsilon^2}{8r} \right) \right]; \quad \Delta W_{94} = \frac{1}{\eta} M_c t_y \omega; \\ \Delta W_{95} &= \frac{1}{\eta} t_A \left[ M_c \left( \omega - \frac{\epsilon^2}{6r} \right) - \gamma \epsilon \left( \frac{\omega}{2} - \frac{\epsilon^2}{8r} \right) \right]; \\ \Delta W_{96} &= \frac{1}{\eta} t_B (M_c - \gamma \epsilon) \frac{\omega}{2}; \quad \Delta W_{97} = \frac{1}{\eta} \left( M_c - \gamma \frac{3\epsilon}{4} \right) \frac{rt_A^3}{6}; \end{aligned} \quad (11)$$

При работе двигателя лебедки в генераторном режиме механическая энергия, преобразуемая в электрическую, рассеивается в виде тепла. Из сети расходуется лишь энергия, пропорциональная потерям от тока намагничивания:

$$\Delta W_{ЭТ} = \Delta P_{нi} \cdot a_{намT}. \tag{12}$$

При исследованиях на основании разработанного алгоритма, кроме затрат энергии, также анализировались значения потребляемой лебедкой мощности и значения максимального приведенного момента нагрузки подъемного механизма [8]. Результаты исследования базового варианта пассажирского лифта, основные параметры для которого приведены в табл. 1, показали, что при существующем способе статического уравнивания веса кабины с учетом половины номинального веса груза, все три расчётных показателя - мощность двигателя лебедки, затраты энергии и значения максимальной нагрузки не являются оптимальными (рис. 2 – 4). Для каждого из этих показателей значение оптимума массы противовеса оказывается различным, однако во всех случаях оптимальная масса меньше массы реального противовеса исследуемого лифта.

Таблица 1 – Основные технические данные лифта

<i>Параметр</i>	<i>Ед. изм.</i>	<i>Значение</i>
Номинальная скорость кабины	м/с	1
Грузоподъемность (масса груза)	кг	500
Масса кабины	кг	1250
Маса противовеса	кг	1500
Высота 1-9 этажей	м	3,2
Высота подъема по (паспорту):	м	27,3
Дополнительное сопр-ние движению	Н	344
Статические испытания в течении 10 мин	кг	1150
Динамические испытания с грузом	кг	550
Диаметр канатоповодящего шкива	м	0,93
Момент инерции канатоповодящего шкива	кг·м <sup>2</sup>	4,6
Тип редуктора	РГЛ-180-47	
Тип приводного двигателя	АСС 92-6/24	
Тип станции управления	ТСУР-2	
Диаметр тяговых канатов	мм	12
Число вервей тяговых канатов	мм	4
Удельная масса тягового каната	0,52 кг/м	0,52
Длина тягового каната	м	30
Масса тяговых канатов	кг	63
Момент инерции тормозного шкива	кг · м <sup>2</sup>	0,071
Момент электромагнитного тормоза	Н·м	100

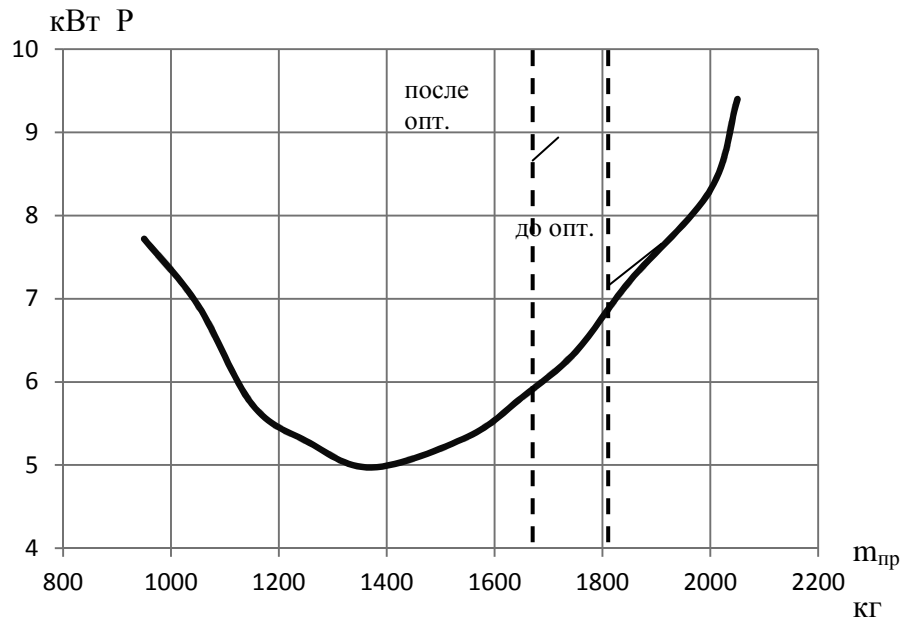


Рис. 2. Зависимость потребляемой мощности от массы противовеса

$m_{пр}$   
кг

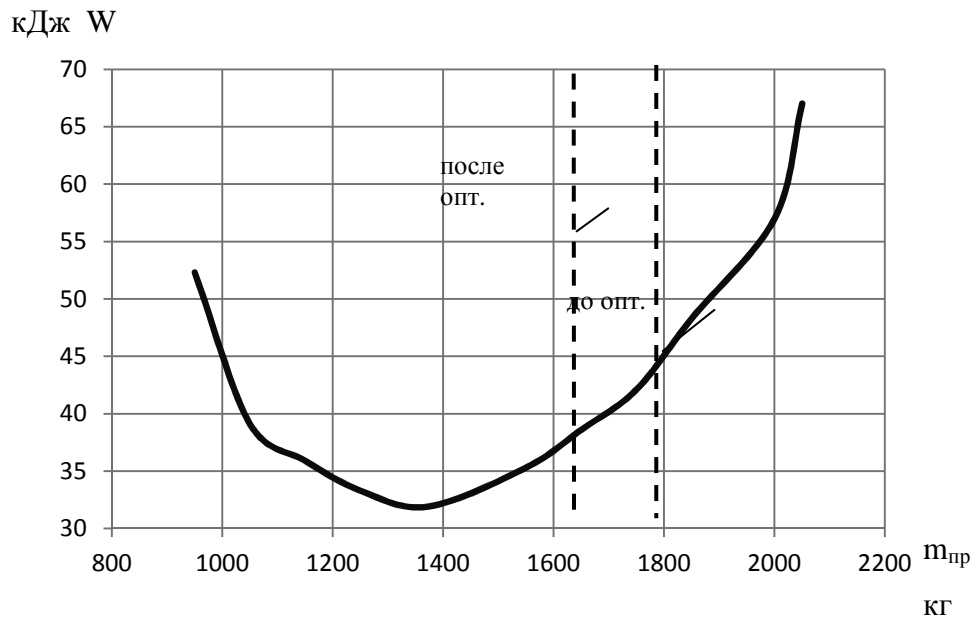


Рис. 3. Зависимость энергии, потребляемой за одну круговую поездку от массы противовеса

$m_{пр}$   
кг



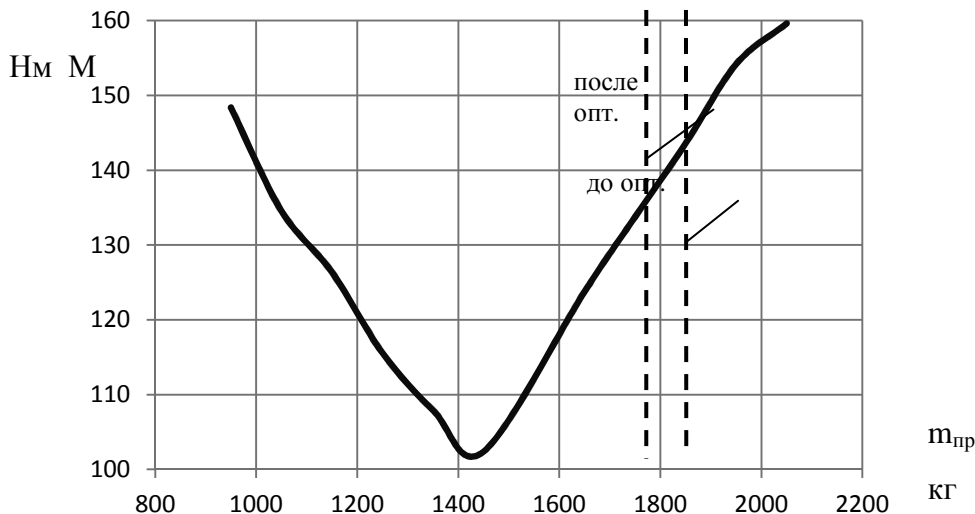


Рис. 4. Зависимость момента нагрузки от массы противовеса

m<sub>пр</sub>

кг

Применительно к лифтовым лебедкам традиционной конструкции с двухскоростными асинхронными двигателями с регулированием от тиристорных станций управления, оптимизация массы противовеса, на основании предложенного алгоритма, может привести к уменьшению его массы на 8-15% (для исследуемого лифтового механизма на 13,4%). При этом, установленная мощность двигателя лебедки, потребление энергии и момент максимальной нагрузки могут быть снижены, в среднем на 4-10 %. (для исследуемого пассажирского лифта на 5,4%, 6,2% и 4,4%, соответственно).

#### ВЫВОДЫ:

Оптимизация по критерию минимума потерь потребляемой лифтом энергии, на основании разработанного алгоритма, позволяет давать рекомендации по уменьшению масс противовесов. При этом, так же могут быть снижены установленная мощность двигателей лебедок, потребление лифтом энергии и моменты максимальной загрузки. Особенностями предложенной методики и разработанного на ее основе алгоритма, является их универсальность и возможность применения для всех пассажирских лифтов с лебедками традиционной конструкции.

---

ЛИТЕРАТУРА

1. Лифты. Учебник для вузов / под общей ред. Д. П. Волкова. - М.: изд-во АСВ, 1999. - 480 с.
2. Браславский И.Я., Зюзев А.М. Опыт внедрения тиристорных асинхронных электроприводов с фазовым управлением // Автоматизированный электропривод. - Свердловск: Обл. Совет НТО. -1981. - Вып. 3. - С. 47-53.
3. Масандилов Л.Б. Применение системы электропривода тиристорный преобразователь напряжения - асинхронный двигатель для грузоподъемных машин // Электротехника. -1995. - №10. - С. 24-27.
4. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. Для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1998. -704 с.
5. Бойко А.А. Синтез и анализ диаграмм движения лифтовых подъемных механизмов // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. Збірник наук. праць. - Вип. 4(5) - Одеса: АО Бахва, 2013. - С. 83-91
6. Андрущенко О.А., Липатов Г.С., Семячкин А.Н. Асинхронный электропривод скоростного пассажирского лифта // Электромашиностроение и электрооборудование. Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1986. - Вып. 40. - С. 34.
7. Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1988. - 224с.
8. Андрущенко О.А., Бойко А.О., Бабийчук О.Б. Анализ энергетической эффективности электроприводов пассажирских лифтов // Вісник НТУ «ХП». Випуск 28. “Проблеми АЕП. Теорія і практика”, 2010. – С. 503 - 504.