Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1987, т.110

УДК 622.647.2

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ПРИВОДАМИ МНОГОПРИВОДНОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

И.И.МАРГОЛИН, К.А.ВАСИЛЬЕВ

Распределение нагрузок между приводами многоприводного ленточного конвейера оказывает существенное влияние на величину натяжения грузонесущей ленты, особенно в случае неравномерной загрузки конвейера по длине. Методика расчета распределения нагрузок между приводами конвейера приведена в ряде работ [1, 3]. Анализ работы приводов выполнен в них при допущении линейности механической характеристики двигателей приводов в ее рабочей части, что приемлемо только в малом диапазоне изменения нагрузки.

В настоящей работе анализируется распределение нагрузки между приводами многоприводного ленточного конвейера для установившегося режима их работы при широком диапазоне изменения нагрузки между приводами с учетом нелинейности механической характеристики электродвигателей и при условии наличия между приводами упругих связей.

Многоприводные ленточные конвейеры оборудуются несколькими приводами, работающими на общий тяговый орган, имеющий некоторые, обычно известные, упругие характеристики. Это исключает независимую работу приводов и обуславливает некоторое распределение нагрузки между приводами, зависящее от механических характеристик приводов, упругих свойств тягового органа и характера распределения сопротивлений движению по длине конвейера.

Рассмотрим многоприводной конвейер, оборудованный n приводами (рис.1), связанными между собой упругим тяговым органом с модулем продольной упругости всего сечения E.

Уравнение электромеханической характеристики любого из его приводов

$$M_i = 2 M_{Ki} \, s_{Ki} \frac{s_i}{s_i^2 + s_{Ki}^2} ;$$

или

$$F_i = 2 F_{Ki} \, s_{Ki} \frac{s_i}{s_i^2 + s_{Ki}^2} , \qquad (1)$$

где i – номер привода, $i = 1, 2, \ldots$; M_i, M_{Ki} – соответственно крутящий и критический момент i-го привода; F_i, F_{Ki} – усилия, развиваемые i-м приводом, соответствующие M_i и M_{Ki}; s_{Ki}, s_i – соответственно критическое и текущее скольжение электродвигателя i-го привода.

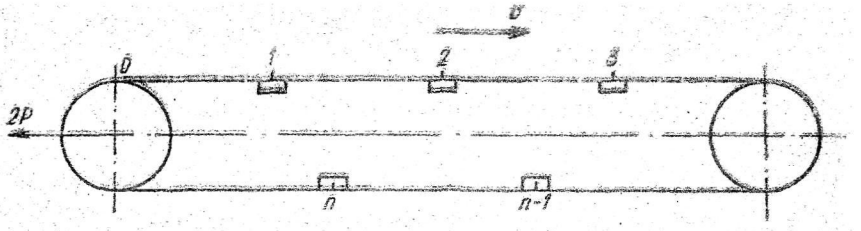


Рис.1. Расчетная схема многоприводного ленточного конвейера

При любых типах промежуточных ленточных приводов с плоским протяжным фрикционным контактом, в том числе магнитофрикционным, вакуум-приводо с кордолентами, а также при использовании в качестве приводов линейных электродвигателей на участке взаимодействия грузонесущей ленты с исполнительным органом привода при установившемся режиме работы конвейера существует участок покоя и участок упругого проскальзывания, расположенные последовательно со стороны набегания грузонесущей ленты на исполнительны орган привода. При условии равенства синхронных частот вращения электродвигателей (синхронных скоростей движения для линейных электродвигателей и передаточных отношений всех приводов имеют место соотношения [I, 3]

$$\frac{1-s_1}{1+\varepsilon_1} = \frac{1-s_2}{1+\varepsilon_2} = \ldots = \frac{1-s_i}{1+\varepsilon_i} = \ldots = \frac{1-s_n}{1+\varepsilon_n}, \qquad (2$$

где ε_i - относительная деформация тягового органа на i-м приводе (здес имеется n - I независимых уравнений).

При нумерации приводов по ходу ленты от некоторой нулевой точки с известным значением натяжения относительная деформация на участке покоя исполнительного органа k-го привода:

$$\varepsilon_K = \frac{P}{E} + \frac{\sum_{i=1}^{n} W_{i-1,i}}{E} - \frac{\sum_{i=1}^{k-1} F_i}{E}, \qquad (3$$

где P - натяжение грузонесущей ленты конвейера в нулевой точке; E - мо дуль упругости всего сечения ленты; $W_{i-1,i}$ - сопротивление движению участка $i-1$, i грузонесущей ленты конвейера; F_i - тяговое усилие развиваемое i-м приводом (любым приводом, предшествующим k-му и расположенному за нулевой точкой по ходу ленты).

Точкой с известным значением натяжения может быть, например, точка сбегания O грузонесущей ленты с натяжного барабана. Очевидно, что число уравнений деформаций равно числу приводов, т.е. n.

При установившемся режиме работы конвейера сумма всех сопротивлений движению равна сумме тяговых усилий приводов:

$$W_0 = \sum_{i=1}^{n} W_{i-1,i} + W_{n,0} = \sum_{i=1}^{n} F_i . \qquad (4)$$

Зависимости (I)-(4) образуют систему, состоящую из $3n$ независимых уравнений. При известных параметрах конвейера и его приводов неизвестным

величинами, входящими в систему, являются: тяговые усилия приводов, деформации на участках покоя их исполнительных органов и скольжения электродвигателей приводов. Общее число неизвестных $3n$ равно числу уравнений в системе. Следовательно, при установке на приводах асинхронных электродвигателей работа конвейера в установившемся режиме описывается замкнутой системой уравнений, что позволяет определить все неизвестные величины.

Общее решение системы, состоящей из $3n$ уравнений, из которых n уравнений нелинейны, как известно, не может быть получено при $n \geqslant 3$. Поэтому проведем качественный анализ этой системы уравнений, описывающей работу конвейера.

Предположим, что на конвейер навешена лента с $E = \infty$ (например, резинотросовая лента с весьма большим модулем упругости всего сечения ленты). Тогда в соответствии с формулой (3) $\varepsilon_i = 0$ и из уравнений (2) следует равенство

$$S_1 = S_2 = \ldots = S_i = \ldots = S_n .$$

Из уравнения (I) следует, что тяговые усилия приводов при равенстве их критических скольжений и моментов равны между собой при любом распределении сопротивлений движению по длине грузонесущей ленты конвейера. При равенстве критических скольжений и не равных критических моментах тяговое усилие будет распределяться пропорционально критическим моментам приводов.

Если сопротивления движению между всеми участками конвейера, включая холостую ветвь, распределены равномерно, т.е.

$$W_{1,2} = W_{2,3} = \ldots = W_{n-1,n} = W_{n,1} ,$$

то при условии равенства тяговых усилий всех приводов, значение каждого из которых $F_i = (W_{1,2} + W_{2,3} + \ldots + W_{n-1,n} + W_{n,1})/n$, из уравнения (3) следует равенство деформаций на участках покоя исполнительных органов приводов, а из уравнений (2) - равенство скольжений всех двигателей и соответствующих им тяговых усилий.

Таким образом, полученные значения F_i (i = I, 2, 3, ..., n) являются решением рассматриваемой системы уравнений. Отсюда следует, что в этом случае при произвольном E нагрузка на всех приводах одинакова при условии установки на них электродвигателей с идентичными характеристиками ($s_{K\,i} = const$, при i = I, 2, ..., n ; $M_{K\,i} = const$ при i = = I, 2, ..., n).

При неравномерном распределении сопротивлений движению по участкам конвейера при допущении, что тяговое усилие распределено равномерно, относительные деформации исполнительных органов приводов при $E \neq \infty$ будут не равны. В соответствии с уравнениями (2) скольжения двигателей будут также не равны, это приведет к неравенству нагрузок, подсчитанных по формулам (I).

Таким образом, возникает противоречие между допущением и следствием (гипотеза $F_i = const$ при $i = 1, 2, \ldots, n$, следствие $F_1 \neq F_2 \neq \ldots \neq F_n$) которое приводит к выводу, что нагрузки между приводами при неравномерном распределении сопротивлений между участками конвейера распределяются неравномерно.

Покажем, что при любом E и одинаковых скоростях, соответствующих синхронным частотам вращения двигателей, все приводы конвейера работают в одном и том же режиме (двигательном или генераторном). Для этого предположим, что при положительных сопротивлениях движению на всех участках конвейера тяговое усилие какого-нибудь привода, например, первого, равно нулю ($F_1 = 0$). Тогда скольжение соответствующего двигателя также равно нулю ($s_1 = 0$). Деформация на участке покоя второго привода в соответствии с выражением (3) будет больше, чем на первом приводе, и поэтому в соответствии с уравнениями (2) скольжение второго привода

$$s_2 = 1 - \frac{1+\varepsilon_2}{1+\varepsilon_1} < 0.$$

Таким образом, второй привод работает в генераторном режиме. Рассматривая последовательно третий, четвертый и другие приводы, получим, что все они работают в генераторном режиме. Таким образом, общему положительному сопротивлению движению соответствует общий генераторный режим работы приводов, что невозможно. Следовательно, при положительном общем сопротивлении движению на конвейере все приводы должны работать в двигательном режиме, причем ни один из них не может работать в режиме холостого хода.

Из уравнений (2) следует, что наименьшее скольжение двигателя будет у того привода, у которого наибольшая относительная деформация ленты на участке покоя, и, следовательно, чем больше относительная деформация лент на участке покоя, тем меньше нагрузка на приводе.

Рассмотрим гипотетический случай, при котором на некотором участке конвейера имеется некоторое положительное сопротивление движению, а на всех остальных участках сопротивление движению равно нулю. Все приводы будут работать в двигательном режиме, и в соответствии с формулой (3) на участке покоя исполнительного органа каждого последующего привода деформация будет меньше, чем на предыдущем, т.е. нагрузка на каждом последующем приводе будет больше, чем на предыдущем. Наибольшая нагрузка будет на приводе, предшествующем загруженному участку конвейера. Можно показать что такое же явление будет наблюдаться при одинаковом (но меньшем по величине) сопротивлении движению на участках, на которых ранее сопротивление движению было принято равным нулю.

При произвольном распределении сопротивлений движению между участками конвейера нагрузка на приводах может быть определена путем решения приведенной системы уравнений (1)-(4), которая уже при двух приводах сводится к уравнению четвертой степени, при трех приводах – к уравнению шестой степени и т.д. Для случая, когда $n \geq 3$, целесообразно разработать общий алгоритм решения поставленной задачи для конвейера, оснащенного любым числом приводов.

Деформация тягового органа на участке покоя первого привода в соответствии с формулой (3)

$$\varepsilon_1 = \frac{P}{E} + \frac{W_{0,1}}{E} .$$

Предположим, что истинное значение тягового усилия первого привода $F_{1ист}$. Зададимся некоторыми значениями F_{1min} и F_{1max}, обеспечивающими условие $F_{1max} > F_{1ист}$; $F_{min} < F_{ист}$. Тогда деформация на участке покоя исполнительного органа второго привода при F_{1min} и F_{1max} будут равны:

$$\varepsilon_{2min} = \frac{P}{E} + \frac{W_{0,1}}{E} - \frac{F_{1min}}{E} + \frac{W_{1,2}}{E} ;$$

$$\varepsilon_{2max} = \frac{P}{E} + \frac{W_{0,1}}{E} - \frac{F_{max}}{E} + \frac{W_{1,2}}{E} .$$

Уменьшение (увеличение) тягового усилия против $F_{1ист}$ на первом приводе приводит к увеличению (уменьшению) относительной деформации на втором приводе, что, в свою очередь, приводит к соответствующему уменьшению (увеличению) скольжения и уменьшению (увеличению) тягового усилия второго привода. По индукции получаем, что увеличение (уменьшение) тягового усилия на первом приводе приводит к увеличению (уменьшению) тягового усилия на всех остальных приводах и, следовательно, при F_{1min}

$$\sum_{i=1}^{n} F_{i\,min} < W_0 ;$$

при F_{1max}

$$\sum_{i=1}^{n} F_{i\,max} > W_0 .$$

Таким образом, может быть построен алгоритм решения поставленной задачи (рис.2).

При заданном значении тягового усилия на первом приводе может быть вычислено соответствующее скольжение электродвигателя

$$s_1 = s_{к1} \left(p_1 - \sqrt{p_1^2 - 1} \right),$$

где $p = M_{к1} / M_1 = F_{к1} / F_1$ - соотношение между критическим и заданным моментом электродвигателя или соответствующими им тяговыми усилиями привода.

Затем, по формулам (3) последовательно для каждого привода вычисляются ε_i ($i = 2, 3, \ldots, n$), с использованием формул (2) вычисляются скольжения двигателей

$$s_i = 1 - s_{i-1} \frac{1 + \varepsilon_i}{1 + \varepsilon_{i+1}} , \quad i = (1, 2, \ldots, n)$$

и по формулам (I) тяговые усилия каждого привода.

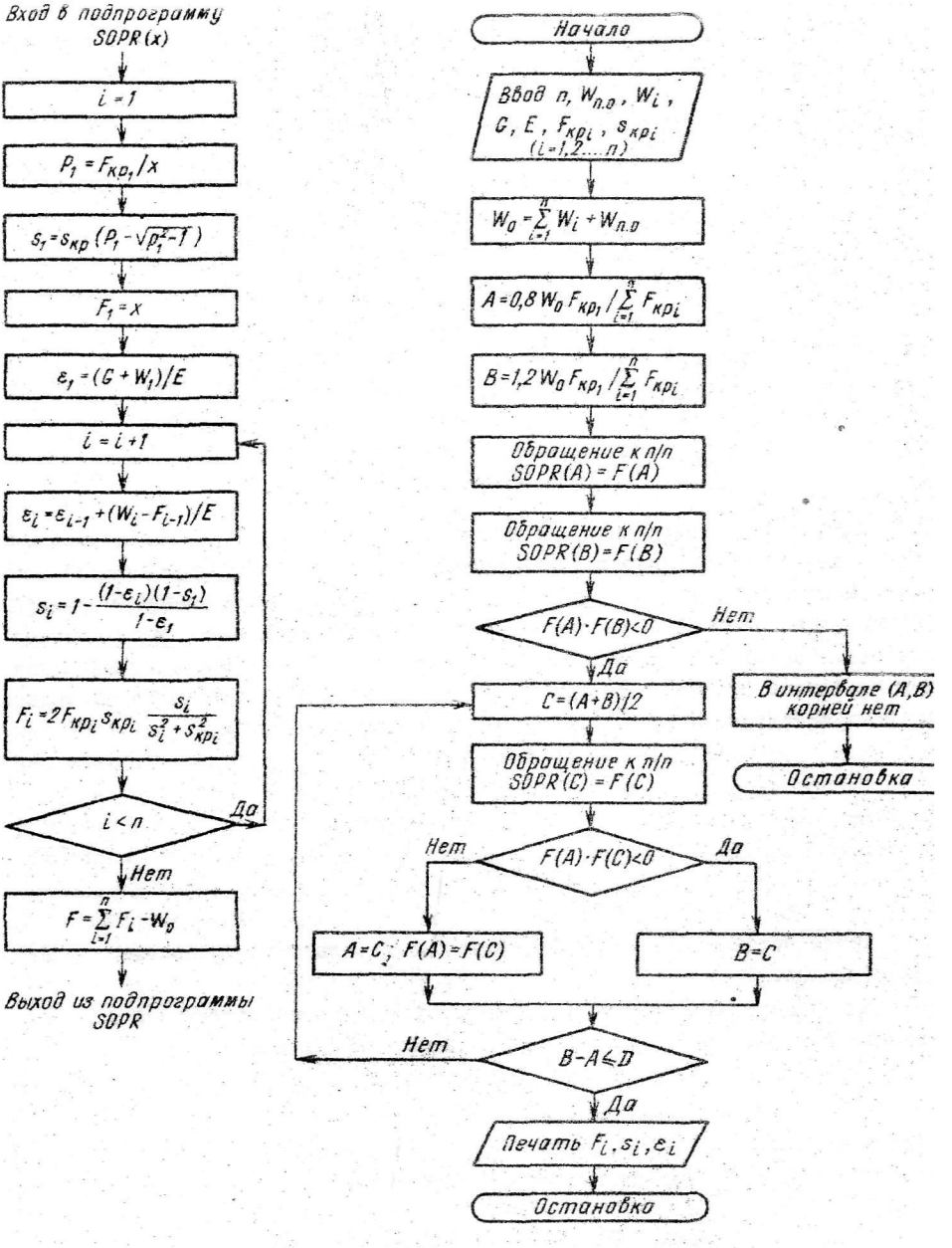


Рис.2. Блок-схема алгоритма для расчета нагрузок двигателей приводов конвейера

При условии, что истинное значение нагрузки на первом приводе находится в интервале (F_{1min}, F_{1max}), способом половинного деления может быть найдено тяговое усилие первого привода и все остальные неизвестные, входящие в систему, описывающую работу многоприводного конвейера.

В соответствии с приведенным алгоритмом составлена программа на языке фортран и произведены соответствующие расчеты, подтвердившие результаты качественного анализа работы многоприводного конвейера. Так, для трехприводного конвейера в случае расположения приводов в точках, при которых при полной загрузке конвейера сопротивление движению на всех участках одинаково, нагрузка на приводах получилась одинаковой. При уменьшении линейной массы груза на конвейере наибольшая нагрузка пришлась на привод № 2, как предшествующий наиболее загруженному участку (холостой ветви). При наличии груза только на участке О–I наиболее загруженным оказался привод № 3, при этом увеличение $s_к$ или модуля упругости ленты E привело к более равномерному распределению нагрузки между приводами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марголин И.И., Васильев К.А. Распределение нагрузок между асинхронными электродвигателями двухбарабанного привода ленточного конвейера. – Известия вузов, Горный журнал, 1984, № 8.

2. Шахмейстер П.Г., Дмитриев В.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. М., Машиностроение, 1978.

3. Шахмейстер П.Г., Солод Г.И. Подземные конвейерные установки. М., Недра, 1976.