

Эскалаторы:

принципиальные схемы устройства, характерные особенности, достоинства и недостатки

В. К. Христич,
генеральный директор — главный конструктор, ООО «Конструктор» (г. Санкт-Петербург)

Ю. В. Киреев,
канд. техн. наук, главный специалист

С момента первого удачного применения эскалатора в начале минувшего века патентные ведомства разных стран подверглись атаке изобретателей, прозванных в России «чайниками» за кипучий склад ума. Одни предлагали вдвое повысить производительность эскалаторов, разместив пассажиров еще и на холостой ветви, другие — заменить тяговые цепи шнеком, чтобы исключить образование проема между ступенями при аварии.

Еще лучше если ступени вообще не будут ехать: достаточно их поднимать и ставить в горизонтальную плоскость, по которой будет шагать человек, не затрачивая сил на подъем, — предлагали третьи. Все редукторы нужно упразднить и заменить гидроприводом без всяких тормозов с исключительной плавностью изменения скорости — утверждали гидравлики. А еще можно орга-

низовать бегущую волну, тогда каждая ступень может бесшумно скользить по ней подобно сёрфу...

Как бы то ни было, сегодня наибольшее распространение получили эскалаторы, в которых ступени, соединенные тяговыми цепями, образуют бесконечное полотно, сформированное в лестницу на наклонной части рабочей ветви с горизонтальными участками на выходе.

Главный вал эскалатора с приводными звездочками может устанавливаться:

- на верхнем поворотном участке трассы движения лестничного полотна (традиционная схема);
- в нижней части наклонного участка;
- в верхней части наклонного участка;

■ Ретроспективный обзор отечественных и зарубежных конструкций эскалаторов.

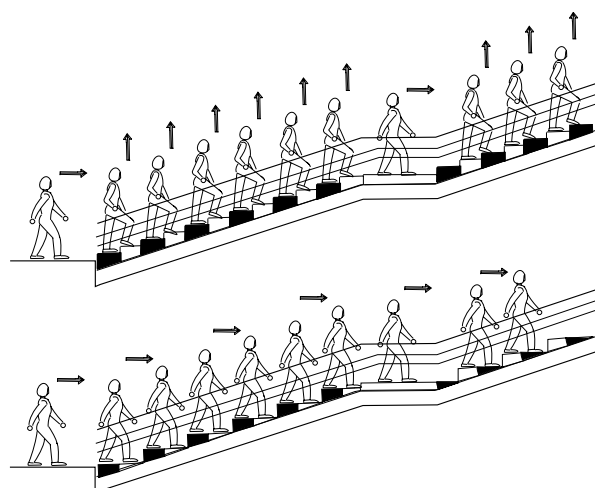


Рис. 3. В «шагающем» эскалаторе ступени совершают только вертикальное перемещение

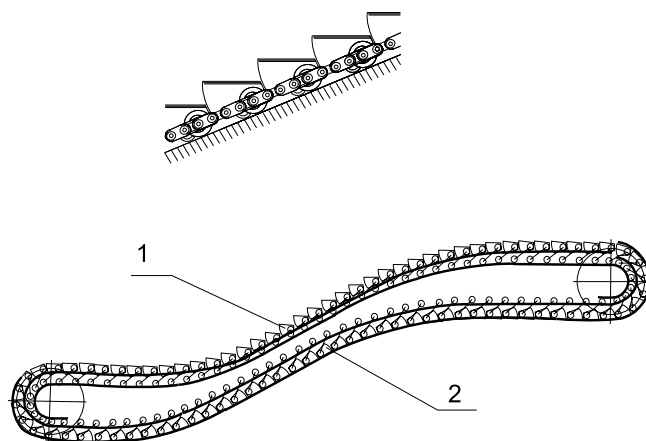


Рис. 4. Схема лестничного полотна эскалатора: 1 — рабочая ветвь; 2 — холостая ветвь

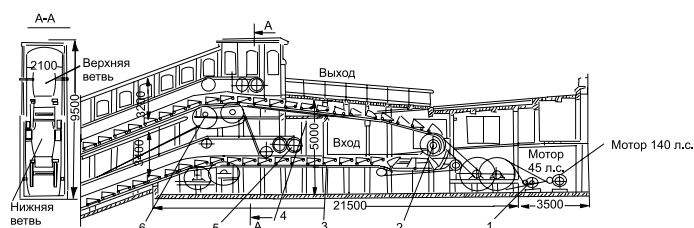


Рис. 1. Характерная особенность эскалатора системы Оккара — обе ветви лестничного полотна используются для транспортирования пассажиров (на поперечном и продольном разрезах приводной станции: 1 — привод; 2 — главный вал; 3 — нижняя ветвь полотна; 4 — верхняя ветвь полотна; 5 — поручневые устройства; 6 — дополнительные звездочки)

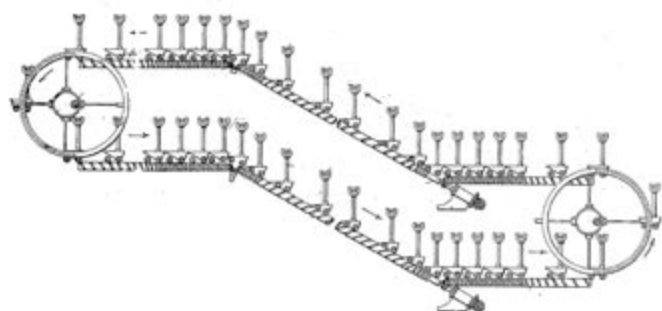


Рис. 2. Схема эскалатора со шнековым приводом ступеней к патенту США 1909 года №935931 (изобретатели Б. Адкинс и У. Льюис).

— в любом месте трассы, если схема эскалатора — многоприводная.

Схемы расположения приводов и диаграммы натяжения тягового органа для перечисленных конструктивных схем приведены на рис. 5.

Долгие годы традиционная схема устройства эскалатора не имела альтернативы. Однако многолетняя практика эксплуатации этих машин выявила ряд существенных недостатков, которые особенно ощутимы на механизмах, рабо-

тающих в метрополитенах, при транспортировании пассажиров на большую высоту.

На диаграмме (см. рис. 5, а) видно, что по мере приближения к приводной звездочке натяжение тяговой цепи возрастает как на рабочей, так и на холостой ветвях лестничного полотна. Зона наибольшего натяжения охватывает верхние криволинейные участки (ВКУ) и приводную звездочку (как раз те участки, где тяговая цепь из прямой линии преобразуется в ломаную). То есть

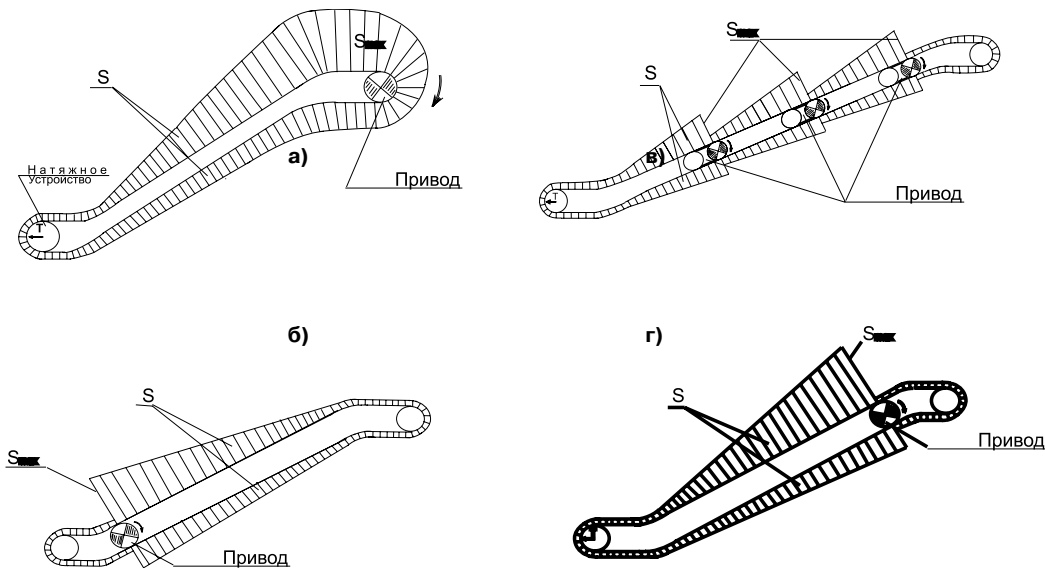


Рис. 5. Диаграммы усилий в тяговом органе при различных схемах размещения привода эскалатора: а — традиционная схема, характерная для подавляющего большинства конструкций эскалаторов «Otis», «Kone», «Schindler» и «ЭЛЭС»; б — «толкающая» схема, характерная для эскалаторов компаний «Pohling-Heckel-Bleichert» (PHB), ФРГ; в — многоприводная схема, характерная для эскалаторов компаний «Westinghouse» (США) и «Mitsubishi» (Япония); г — схема эскалатора ЭТХ, характерная для конструкций ООО «Конструктор» (Россия)

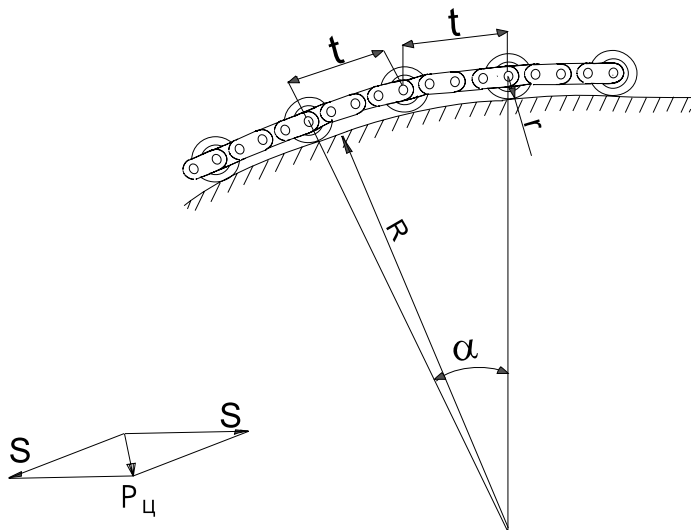


Рис. 6. Схема создания паразитного усилия $P_{ц}$ от перегиба тяговой цепи на ВКУ (в эскалаторах с высотой подъема 65 м натяжение цепи S достигает 170 кН)

в зоне максимальных натяжений происходит взаимный поворот звеньев цепи, а ее перегиб создает паразитные силы, воздействующие на ступень.

При ширине лестничного полотна 1 м ступень эскалатора предназначена для транспортирования двух пассажиров. Бегунки воспринимают нагрузку от собственного веса ступени и тяговых цепей, а на рабочей ветви лестничного полотна — также и нагрузку от веса пассажиров. При этом, если рядом окажутся два стокилограм-

мовых пассажира, каждый из четырех бегунков воспримет около 50 кг полезной нагрузки. Так происходит по всей трассе движения лестничного полотна, за исключением ВКУ. Здесь основные бегунки и каркас ступени дополнительно нагружаются паразитными силами $P_{ц}$ (рис. 6) деформирующими ступень, причем на рабочей ветви трассы в одну сторону, а на холостой — в другую.

$$P_{ц} = \frac{ST}{(R+r)}, \quad (1)$$

где S — натяжение цепи;
 T — шаг ступеней;
 R — радиус ВКУ;
 r — радиус бегунка.

Девиация¹ основных бегунков (рис. 7), возникающая вследствие деформации ступени, способствует отслоению и сползанию обода.

Как видно из (1), величина силы $P_{ц}$ обратно пропорциональна радиусу R , который для уменьшения $P_{ц}$ приходится делать намного большим, чем этого требует геометрия лестничного полотна. При высоте подъема 65 м R достигает 12 м, что неизбежно приводит к увеличению габаритов эскалатора и эскалаторных помещений. Но даже в этом случае сила $P_{ц}$ превышает 6000 Н (в 12 раз больше полезной нагрузки от двух пассажиров). В итоге получаем увеличенные габариты основного бегунка (диаметр 180 мм) и массу ступени с усиленным каркасом (около 50 кг).

Взаимный поворот звеньев цепи на ВКУ и приводной звездочке создает силы трения в шарнирах цепи (10–15% от натяжения даже при наличии смазки), способствует интенсивному износу валиков и втулок, вытяжке цепи и увеличению зазора между ступенями, величина ко-

торого строго регламентируется Правилами устройства и безопасной эксплуатации эскалаторов. В случае превышения нормативного показателя на 10 мм требуется замена тяговых цепей.

Снижению степени износа способствует уменьшение удельного давления в парах трения (валик-втулка, втулка-ролик), что достигается увеличением габаритов шарниров и наличием смазки, для доставки которой к поверхностям трения в деталях цепи приходится делать технологически сложные масляные каналы, применять специальные устройства — автоматы смазки, которые на практике оказываются малоэффективными.

Работоспособность втулочно-роликовой пластинчатой цепи сохраняется до тех пор, пока круглые детали (валики и втулки) остаются неподвижными относительно соединительных пластин. В противном случае неизбежен износ сопрягаемых поверхностей и «саморазборка» цепи, чему способствует момент трения, создаваемый в шарнире цепи при взаимном повороте звеньев. Неподвижность соединений и удержание паразитного крутящего момента обеспечиваются применением высокоточных дорожкоподводящих пресовых посадок² с использованием пластин заданной толщины — что, опять же, приводит к увеличению габаритов и веса цепи.

А ведь все перечисленные явления вызываются не пассажирской нагрузкой. После «защиты» от паразитных сил вес усиленного лестничного полотна становится сопоставимым с весом пассажиров. И даже при отсутствии последних эскалатор бездарно пожирает свой ресурс: беспощадно ломает ступени, изнашивает дорожки качения, шарниры цепи и основные бегунки.

Цепное зацепление, используемое в традиционной схеме привода лестничного полотна, даже теоретически имеет существенный недостаток: тяговые звездочки главного вала есть не что иное, как многогранник (рис. 8, а).

При заходе каждого звена цепи на звездочку (и сходе с нее) в цепи генерируются колебания, распространяющие-

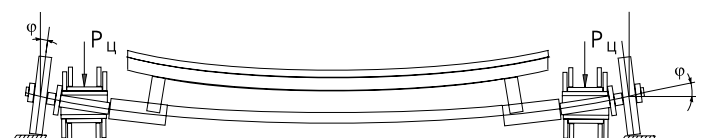


Рис. 7. Схема деформации ступени на ВКУ под действием сил $P_{ц}$ (для сравнения: величина каждой силы $P_{ц}$ достигает 6000 Н, в то время как усилие на бегунок ступени от двух стокилограммовых пассажиров, не превышает 500 Н)

¹ Здесь: отклонение (движущегося тела) от заданного направления под влиянием каких-либо случайных причин. (Прим. авт.).

² Неподвижные соединения круглых деталей, обеспечиваемые напряженным состоянием благодаря разнице их геометрических размеров (диаметр вала больше диаметра отверстия). (Прим. авт.).

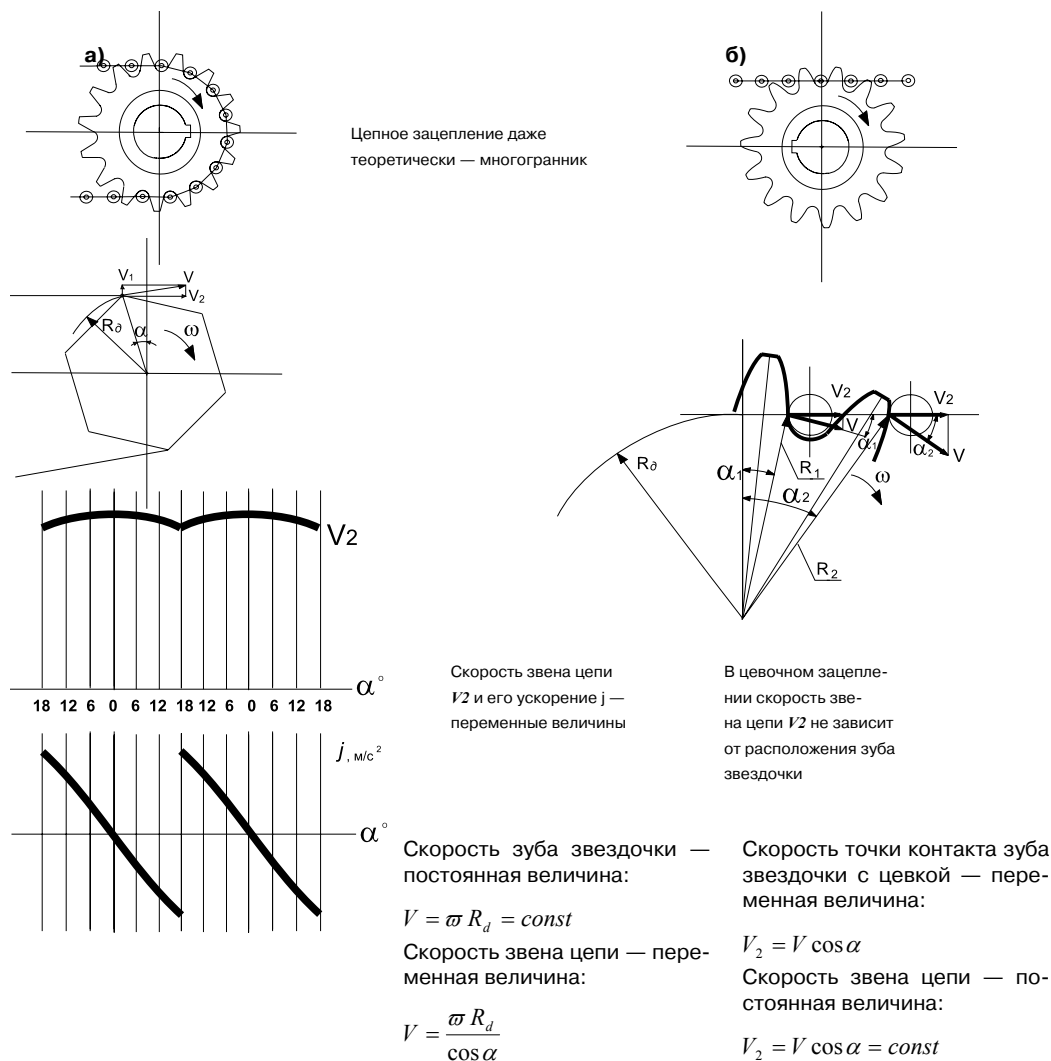


Рис. 8. Цепное (а) и цевочное (б) зацепление

ся по ней со скоростью упругой волны. Падающие волны заставляют колебаться натяжные устройства и отражаются от натяжных звездочек, что усиливает общий колебательный процесс лестничного полотна. Эти колебания передаются всему эскалатору, создают шум, вибрации, порождают нерасчетные циклические усилия и повышенный износ элементов конструкции.

Характерным проявлением колебательного процесса является «шимми» — волнообразование на дорожках качения бегунков ступеней. «Шимми» наблюдается как на рабочей, так и на холостой ветвях траектории движения лестничного полотна. «Шимми» возникает под основными бегунками, непосредственно связанными с тяговой цепью, и под вспомогательными бегунками, не имеющими прямой связи с ней.

Если направление движения рабочего профиля зуба звездочки не совпадает с направлением движения ролика тяговой цепи, то заход цепи на звездочку вызывает удар и поперечное отклонение шарнира цепи вместе с основным бегунком ступени. Возврат лестничного по-

лотна к заданной траектории движения сопровождается еще одним ударом — основных бегунков ступеней о направляющую. На практике это — стук у входных площадок. Снизить ущерб от указанных явлений можно, уменьшив угол захода ролика цепи на звездочку. Это возможно за счет либо уменьшения шага цепи, либо увеличения делительного диаметра звездочек.

Однако из-за ограничений по прочности деталей шаг цепи на «высоких» машинах невозможно сделать менее 200 мм. Остается второй путь — увеличение диаметра звездочек. При 35 зубьях приводная звездочка эскалаторов ЛТ-1, ЛТ-2, ЛТ-3 имеет делительный диаметр 2,2 м. Попытка уменьшить этот диаметр до 1,532 м (24 зуба) на эскалаторах ЭТ-2 и ЭТ-3 привела к усилению динамических процессов, повышению шума и вибрации. По данным обследований, эскалаторы ЭТ после 20 лет эксплуатации находятся в том же состоянии, что и эскалаторы ЛТ, отработавшие 40 лет.

При увеличении диаметра приводных звездочек неизбежно растет крутящий момент

на главном валу, справиться с которым можно только с помощью приводов-мастодонтов (их габариты см. в статье «Эскалаторостроение России в цифрах», «ПТО» №6/2002). Продольная динамика лестничного полотна уменьшается, но не устраняется. Поэтому полностью ликвидировать волнообразный износ на дорожках качения бегунков практически невозможно, а для его уменьшения необходимо увеличить жесткость и массу направляющих, что вновь приводит к утяжелению конструкции эскалатора.

Все перечисленные явления, присущие традиционной схеме и особенно ощутимые на тонкельных эскалаторах российских метрополитенов глубокого залегания (с высотой подъема

до 65 м), проявляются и в зарубежных конструкциях (см. журнал «Elevator World», №7/1995). В начале 1970-х годов несколько фирм попытались устранить недостатки традиционной схемы. Например, фирмы «РНВ» и «Westinghouse» разработали эскалаторы с зубчатой рейкой вместо тяговой цепи и переместили привод в наклонную часть лестничного полотна, что коренным образом изменило натяжение тягового органа (см. диаграммы на рис. 5, б и в). В результате такого конструктивного решения действие максимальных усилий ограничивается прямолинейными участками, а ВКУ и верхняя огибающая оказались разгруженными.

Приводные зубчатые колеса эскалаторов «РНВ» с малым шагом зубьев (рис. 9) позволили более плавно передвигать ступени, а размещение привода в нижней части трассы лестничного полотна превратило рейки в толкающий элемент, по мере износа шарниров которого зазор между ступенями не увеличивается, а уменьшается, позволяя точно определить момент, необходимый для замены реек. Чтобы обойтись без смазки, рейки изготавливали из пластмассы. Однако такое техническое решение ограничило несущую

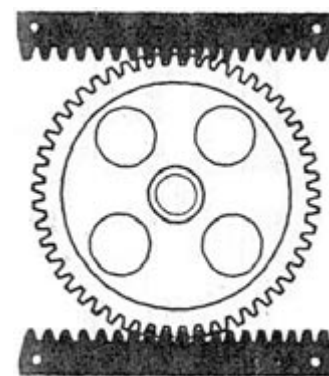


Рис. 9. Схема реечного привода эскалатора фирмы «РНВ»

способность привода и высоту подъема эскалатора. Еще одним существенным недостатком шестеренчатого привода является возникновение в зацеплении значительной поперечной силы (более 30% от продольной).



Рис. 10. Привод модульного эскалатора фирмы «Mitsubishi»

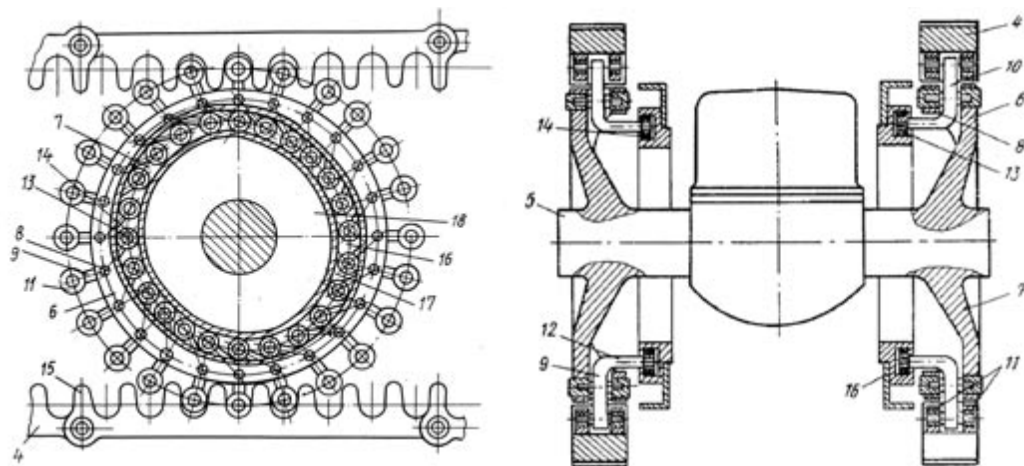


Рис. 11. Схема привода модульного эскалатора ЭМ-86 высотой подъема до 100 м согласно авторскому свидетельству СССР № 1440838 от 06.11.1986 (авторы Христин В. К., Киреев Ю. В. и др.)

Джозеф К. Крафт, автор концепции многоприводной системы, заменил приводную шестерню гусеничным механизмом, имеющим собственную тяговую цепь с полиуретановыми роликами для привода рейки. Идея создать легкую универсальную конструкцию получила воплощение в виде модульных эскалаторов фирмы «Westinghouse» («EW», № 1/1973). Эскалаторы разных высот подъема (рекордная высота — 62,5 м) собирались из одинаковых модулей, каждый из которых был оборудован собственным приводом. Идея казалась настолько привлекательной, что в 1983 году из 1713 эскалаторов, выпущенных в США, 1114 были модульными («EW» № 1/1985).

Впоследствии лицензию на производство модульных эскалаторов приобрела фирма «Mitsubishi», которая усовершенствовала их конструкцию (в частности, была найдена оптимальная форма зуба рейки). По модульному принципу были созданы 440 пассажирских конвейеров и около 6,5 тысяч эскалаторов, из которых около 30 имеют высоту подъема от 15 до 42 м («EW», № 12/1993).

Однако при использовании на больших высотах, для которых, собственно, и разрабатывались модульные эскалаторы, система оказалась нежизнеспособной. Тяговая функция привода «Westinghouse» ограничивалась высотой подъема 6,1 м, а «Mitsubishi» и того меньше — 4,2 м. Поэтому рекордные высоты эскалаторов каждой фирмы достигались при помощи 10 приводов, а это, с точки зрения служб эксплуатации, — нонсенс. Каждый привод вместо простой звездочки превращался в сложный механизм (рис. 10), требующий осмотра, обслуживания и ремонта. Кроме того, работа таких эскалаторов сопровождалась повышен-

ным шумом, вибрацией и возросшим числом ремонтов.

Российскому модульному эскалатору ЭМ-86 с оригинальным приводным механизмом (рис. 11), разработанному СКБ эскалаторостроения (г. Санкт-Петербург), так и не суждено было увидеть свет. Долгие годы в российских метрополитенах эксплуатировались эскалаторы с огромными неуклюжими приводами, имеющими такие неоспоримые преимущества, как расположение на уровне земли, доступность и простота в обслуживании. Несмотря на все достоинства модульной схемы и предполагавшийся существенный экономический эффект от ее внедрения, не нашлось аргументов, способных убедить службы эксплуатации метрополитенов в том, что несколько легких высококачественных приводов, расположенных по всей длине глубокого тоннеля, лучше одного привода, имеющего приводную зону массой в десятки тонн.

Учитывая этот опыт, специалисты фирмы «Конструктор» разработали эскалатор, сочетающий в себе преимущества традиционной и модульной конструкций. Модель ЭТХ имеет один привод, простые приводные звездочки, цепь в качестве тягового органа и разгруженные ВКУ (см. рис. 5, в). Применение модифицированного цевочного зацепления позволило приводить в движение лестничное полотно на прямолинейном участке трассы при помощи звездочки диаметром чуть больше 0,5 м и устанавливать, при необходимости, несколько главных валов.

Главной особенностью цевочной реечной передачи является постоянство направления и величины вектора скорости в контакте зуба звездочки с цевкой (рис. 8, б). Благодаря этому уже при коэффициенте перекрытия 1,2–1,3 достигается высокая плавность работы передачи, отсутствуют удары

при заходе роликов цепи на зубья звездочки, а следовательно — устраняется «генератор» продольных колебаний лестничного полотна, характерных для цепного зацепления. Также исчезает стук при контакте цепей с тяговыми звездочками и звездочками натяжных устройств.

Шаг цепи-рейки равен шагу ступеней; при этом единственный шарнир между ступенями нагружен большим удельным давлением только в статике (на прямолинейном наклонном участке), а взаимный поворот звеньев происходит без нагрузки. Износ такого шарнира, оборудованного подшипниковым узлом, минимален. Цепь не вытягивается, не требует смазки, не имеет пресовых посадок. Тяговая способность привода сопоставима с таковой у обычной цепной передачи, в которой, несмотря на большой угол обхвата звездочки цепью, первый зуб воспринимает до 70% общей нагрузки. Конструкция эскалатора ЭТХ остается практически неизменной в диапазоне высот подъема от 3 до 75 м и до 80% унифицирована с поэтажным эскалатором ЭПХ высотой подъема

от 3 до 9 м и пластинчатым пассажирским конвейером. При необходимости эта конструкция также позволяет реализовать и многоприводный принцип.

Применение приводной звездочки диаметром 564 мм позволило уменьшить габариты привода (рис. 12), поместить его между рабочей и холостой ветвями лестничного полотна, поменять местами основные и вспомогательные бегунки, а также уместить тяговые цепи в габариты ступени. Такая конструкция существенно уменьшила габариты эскалатора: при ее установке на станциях метрополитена не нужны ни удлинненные машины, ни обширные машинные помещения, ни сложные фундаменты. Вместо трех эскалаторов прежних конструкций в том же тоннеле размещаются четыре эскалатора (см. «ПТО», № 6/2002), что особенно актуально в свете предстоящей замены старых эскалаторов в метрополитенах Москвы и Санкт-Петербурга.

Кроме того, эскалаторы ЭТХ имеют неперекашиваемое лестничное полотно, модульную легкосборную конструкцию наклонной части и новый поручень, описание которых выходит за пределы темы данной статьи.

Сегодня их производство начато на киевском заводе «Большевик». Первые машины монтируются на объектах украинской столицы. Для производства поэтажных эскалаторов и пассажирских конвейеров нового поколения в Санкт-Петербурге создано ООО «ЭСКО». Сборка первых эскалаторов ЭПХ-4,5 в северной столице уже начата, но частных инвестиций для освоения производства тоннельных эскалаторов недостаточно. Их основные потребители — метрополитены, являющиеся частью городской инфраструктуры. Поэтому решение, нужны ли России новые тоннельные эскалаторы, остается за государством. ■

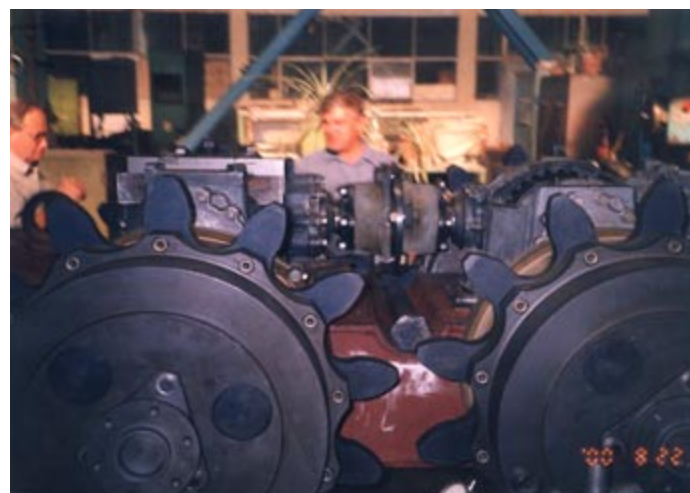


Рис. 12. Привод эскалатора ЭТХ