

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА ШУМЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИВОДА ЛИФТОВ

В.И. Афонин, Д.П. Андрианов, Н.П. Бадалян

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

Проведено исследование влияния конструктивных факторов на шумы электродвигателей для привода лифтов. Излучение шума электрической машиной определяется ее конструкцией и электромеханическими параметрами. Технология изготовления и режим работы также влияют на создаваемый шум. Поэтому несовершенство (нерациональность) конструкции является важнейшим показателем динамического поведения машины. Методы уменьшения шума электрических машин основаны на изучении причин, вызывающих этот шум, а методы анализа – на основных акустических понятиях. При проектировании электродвигателей для привода лифтов уменьшение шума основывается на поиске компромисса между акустическими требованиями и техническими возможностями.

Предлагаются мероприятия по уменьшению магнитных вибраций лифтовых электродвигателей. Разработан алгоритм поиска способов улучшения вибрационных и шумовых характеристик лифтовых электродвигателей, включающий последовательность следующих шагов: выявление факторов, существенно влияющих на вибрационные и шумовые характеристики; установление повышенных уровней вибрации и шума двигателей; определение факторов, обеспечивающих минимальное значение вибраций и шумов в переходных режимах.

Показано, что в зависимости от характера причин, определяющих уровни вибрации и шумов двигателей, различают конструктивные, технологические и режимные факторы, оказывающие влияние на уровни шума и вибрации.

Учитывая результаты предыдущих исследований авторов, в работе рассматривается влияние только конструктивных факторов. Это обусловлено тем, что конструктивные факторы позволяют реализовывать на стадии проектирования большинство известных методов улучшения вибрационных и шумовых характеристик. Кроме того, обладая универсальностью действия на вибрационные и шумовые характеристики, они выделяются относительной экономичностью в отличие от технологических и режимных факторов.

Ключевые слова: электродвигатель, шумовые характеристики, приводы лифтов, уровень вибрации, переходные режимы.

Введение. Для разработки мероприятий по уменьшению магнитных вибраций лифтовых электродвигателей (далее двигателей) в процессе их проектирова-

ния выдвигались следующие задачи: выявление факторов, существенно влияющих на вибрационные и шумовые характеристики; установление причин повышения уровней вибрации и шума двигателей; определение факторов (их значений), обеспечивающих минимальное значение вибраций и шумов в переходных режимах.

Все эти мероприятия, выполняемые в определённой последовательности, представляют собой одновременно и алгоритм поиска способов улучшения вибрационных и шумовых характеристик лифтовых двигателей.

Факторы, оказывающие влияние на уровни шума и вибрации, принято делить на три типа в зависимости от характера причин, определяющих уровни вибрации и шума двигателей, а именно - конструктивные, технологические и режимные.

Применяя различные конструктивные приёмы, можно существенно влиять на значения электромагнитных и механических колебаний элементов конструкции двигателей, порядок, фазы и частоты - как собственные, так и вынужденные.

Конструктивные факторы позволяют реализовать на стадии проектирования большинство известных методов улучшения вибрационных и шумовых характеристик. Это и подавление вибрации в источнике, и отстройка частот собственных и вынужденных колебаний, и применение гасящих вибрацию устройств. Кроме универсальности действия конструктивных факторов на вибрационные и шумовые характеристики, следует отметить также их относительную экономичность в отличие от технологических факторов, улучшение которых ограничено уровнем производства, и режимных факторов, которые для лифтовых двигателей обычно заданы.

В этой связи в данной работе ограничимся рассмотрением влияния только конструктивных факторов, выбор которых опирается на результаты предшествующих исследований [1-7].

Постановка задачи. Элементы оболочки (станина, щиты подшипниковые) электродвигателей привода лифтов выполняют ряд функций, а именно: обеспечивают жёсткость конструкции и прохождение охлаждающего воздуха в нужных направлениях и необходимого количества; рёбра на внутренней поверхности станины служат для посадки сердечника статорного в корпус, а также образуют с ним каналы для прохождения охлаждающего воздуха.

Расположение рёбер и окон в корпусе определяет направление и распределение воздушных потоков. Количество рёбер и их взаимное расположение на внутренней поверхности станины определяют порядок собственных частот магнитных вибраций и влияют на уровни шума. Щиты подшипниковые и направляющие воронки также влияют на вибрационные и шумовые характеристики.

С учётом вышеизложенного в область исследования включены: наружный диаметр сердечника статорного - D_a , высота спинки сердечника - h_a , число

посадочных рёбер - n_p , число пазов ротора - Z_p при фиксированном числе пазов статора - Z_c .

Теория. Двигатели для привода лифтов являются сложной электромеханической системой и имеют широкий и насыщенный спектр сил, возмущающих магнитные вибрации, и электромагнитных сил, возникающих вследствие нестационарных электромагнитных и электромеханических воздействий [2,6].

Знакопостоянные и знакопеременные динамические моменты вызывают поворотные вибрации статора и ротора вокруг оси, совпадающей с осью вала двигателя и ей параллельной. При этом возбуждаются вибрации и шум повышенного уровня в диапазоне частот от 0 до 100 Гц и выше [8]. Электромагнитные силы, которые являются следствием взаимодействия зубцовых гармоник магнитного поля в воздушном зазоре, приводят к повышению уровня шума в хорошо слышимом диапазоне частот. Практически только радиальные силы, вызывающие колебания ярма статора, являются источником шума [1,2].

Звук, распространяющийся в воздухе, излучается поверхностью сердечника статора, и уровень звука зависит от амплитуды колебания корпуса. Амплитуда колебания зависит от величины электромагнитных сил, которые действуют на пакет активной стали статора.

Ярмо статора представляется в виде цилиндрической оболочки, на которую воздействует система радиальных и тангенциальных сил с r числом волн ($r = 0, 1, 2, 3, 4$), периодически изменяющихся во времени и симметрично распределённых по окружности [9].

Вибрации статоров, возбуждаемые магнитными силами, образуют пространственные формы колебаний, приведенные на рис.1.

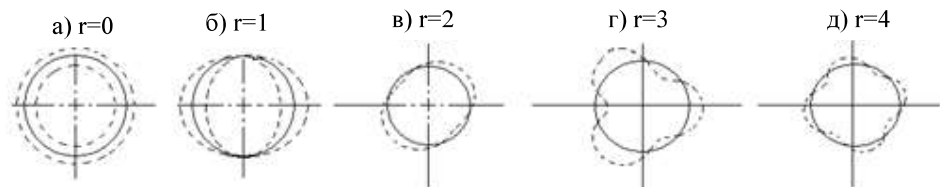


Рис.1. Формы колебаний статоров электродвигателей (r – порядок волны)

При $r = 0$ радиальные усилия не зависят от пространственной координаты, но периодически изменяются во времени.

При $r = 1$ имеет место одностороннее притяжение, действующее на ротор, которое при резонансе вызывает сильную вибрацию.

При $r = 2, 3, 4, \dots$ возникают радиальные усилия, приложенные равномерно по окружности статора в r точках, которые приводят к изгибу кольца статора.

Этот вид колебаний наиболее часто встречается на практике.

Частота собственных колебаний ярма статора лифтовых двигателей габаритов 160, 180, 200, 225 и 250 мм рассчитывалась по формуле (3-44), предложенной И.Г. Шубовым [2]. Результаты расчётов приведены в табл.1.

Таблица 1

Результаты расчетов частоты собственных колебаний ярма статора лифтовых двигателей габаритов 160, 180, 200, 225 и 250 мм

Высота оси вращения, мм	Средний радиус ярма, мм	Частота собственных колебаний статора, Гц, при r			
		0	2	3	4
160	125	5400	535	2400	3960
180	135	5200	500	2200	3500
200	155	4800	360	1850	2750
225	175	4450	250	1750	2450
250	195	4060	350	1800	2300

Расчёты показали, что с ростом радиуса ярма частота собственных колебаний снижается. Следовательно, уровень магнитного шума будет выше у двигателей, имеющих большие геометрические размеры, при условии равенства возбуждающих сил и частот.

Существуют различные виды колебаний элементов конструкций электродвигателей:

а) крутильные колебания статора и ротора как целого, вызываемые вибрационными моментами; такие колебания особенно заметны, т.к. они через посадочные рёбра передаются прямо на тело корпуса в виде корпусного звука;

б) радиальные колебания вызываются силами одностороннего магнитного притяжения (вибрационными силами), угловая скорость которых в общем случае отличается от скорости ротора;

в) радиальные силы могут деформировать статор во вращающийся эллипс;

г) радиальные силы могут деформировать статор во вращающийся многоугольник;

д) листы железа статора и ротора могут колебаться в аксиальном направлении.

Поля, возникающие в воздушном зазоре асинхронной машины, являются следствием распределения обмоток статора и ротора, зубчатости, возможного эксцентриситета и насыщения. Отсюда следует вывод: эксцентриситет воздушного зазора является одной из основных причин шума, так как он способствует образованию двух новых полей, число пар полюсов которых отличается от основного числа пар полюсов на 1. Допустимый эксцентриситет $[e_0] < 0,12$ мм.

Применение скоса пазов ротора является действенным средством борьбы с шумом, который обусловлен гармониками поля высших порядков. Предпочтителен скос на 1...2 паза ротора.

Очевидно, следует избегать обратного вращения с числом пар полюсов двигателя, эксцентриситета воздушного зазора и полей со значительными амплитудами, которые отличаются друг от друга на 2 (вибрационная сила) или 4 полюса (эллиптическая деформация); конструкция должна быть прочной, а листы точно спрессованы или склеены.

Остановившись на выборе числа пазов ротора при заданном числе пазов статора, следует отметить, что для многоскоростных машин следует принимать во внимание не только стационарные поля, но и временно образующиеся. Необходимо также учесть наличие двух скоростей с соотношением от 3:1 до 6:1. Практика показывает, что ни одно из сочетаний числа пазов (зубцов) статора Z_1 и ротора Z_2 , применявшихся в отечественных асинхронных двигателях, не обеспечивает положительных результатов по всем показателям одновременно.

В процессе работы лифтового двигателя происходит переключение питания с обмотки большой скорости на обмотку малой скорости. При этом магнитное поле статора, возбуждённое обмоткой большой скорости, затухает, и гармоники затухающего поля вместе с гармониками магнитного поля, возбуждённого обмоткой статора малой скорости, могут вызвать шум, напоминающий свист.

Предварительный выбор Z_2 для заданных значений Z_1 осуществляется по участкам: верхним для $Z_2 > Z_1$ с ограничением сверху линией $Z_2 = 1,25Z_1$ и снизу линией $Z_2 = Z_1 + (p_6 + p_m)$; нижним – для $Z_2 < Z_1$ с ограничением снизу линией $Z_2 = 0,75Z_1$ и сверху линией $Z_2 = Z_1 - (p_6 + p_m)$. Точками на диаграмме рис.2 отмечены числа пазов ротора, с которыми проводились испытания двигателей. Затем проводился анализ взаимодействия гармонических полей статора и ротора, создаваемых ими добавочных синхронных моментов и радиальных вибрационных сил, которые ограничиваются введением скоса и укорочением шага обмотки. При выборе числа пазов ротора следует исключить значения, при которых возможны сильные синхронные моменты. Синхронные моменты при вращающемся роторе и колебания четвёртого порядка существенно ослабляются введением скоса и увеличением воздушного зазора.

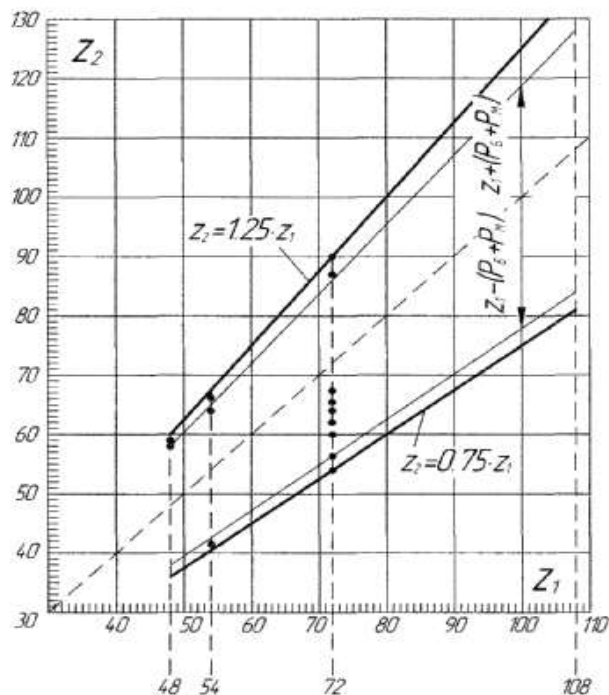


Рис.2. Диаграмма выбора числа пазов ротора

Конструкторские решения, принятые при выборе числа пазов ротора для двухскоростных лифтовых двигателей, а также для двигателей с частотным приводом, приведены в работах [10,11].

Влияние числа внутренних рёбер на уровень шума защищённых машин мало изучено. По этой причине при выборе конструкции станины проведена серия экспериментов с различным числом внутренних посадочных рёбер: 4, 6, 8. Испытаниям подвергались двигатели габаритов 160, 180, 200, 225 и 250 мм с соотношением числа пар полюсов: 2/8, 2/12, 3/9 и 3/12.

Результаты экспериментов. Испытания выполнялись в заглушенной камере. Измерения проводились в условиях свободного звукового поля в активной зоне частот. Октавный спектр 63...2000 Гц.

Проверка влияния толщины спинки сердечника статорного на уровень шума выполнялась экспериментально на двигателе габарита 225 мм (9 кВт) в диапазоне частот от 63 до 4000 Гц со статорами, имеющими различный средний радиус ярма (табл. 2).

Таблица 2

Влияние толщины стинки статорного сердечника на уровень шума

Средний радиус яра, мм	Уровень шума (дБА) при спектре частот $\Gamma\zeta$					
	63	125	250	500	1000	2000
184	34	45	56,5	50	48	30
166	36,5	38,5	50	54	46	30

Исследование влияния эксцентриситета (неравномерности воздушного зазора) на уровень шума проводилось на двигателях габаритов 160, 180 и 200 мм. Результаты приведены в табл.3.

Таблица 3

Влияние эксцентриситета воздушного зазора на уровень шума

e, мм	Уровень шума дБА при частотном спектре $\Gamma\zeta$					
	63	125	250	500	1000	2000
0,04...0,33	50	49	73	62	55	47
0,23	57	52	67	59	49	44
0,34	44		65	48	44	

Сравнительные испытания на определение уровня шума двигателей габарита 200 мм проводились с разным числом посадочных рёбер: 6 и 8 (рис.3). Результаты испытаний в пяти точках приведены в табл.4.

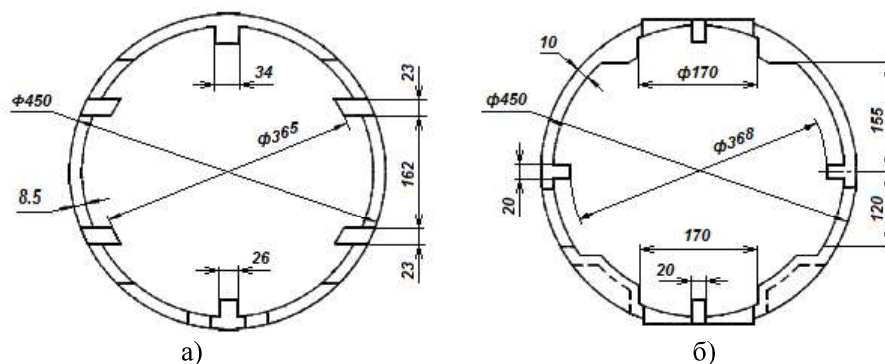


Рис.3. Станины двигателей для привода лифтов габарита 200 мм:
а - 6 рёбер, б - 8 рёбер

Таблица 4

Результаты сравнительных испытаний на определение уровня шума двигателей габарита 200 мм с числом посадочных ребер 6 и 8

Число ребер станины	Режим работы	Число пар полюсов	Средний уровень звука, дБА					средний
			со стороны рабочего конца вала	сбоку справа	напротив рабочего конца вала	сбоку слева	сверху	
6	Установившийся	2	67	63	65	64	64	64,6
		12	51	54	51	54	54	52,8
8	Установившийся	2	61	61	61	59	58	60,0
		12	51	47	47	48	49	48,4
6	Переходный	2	74	78	72	76	78	75,6
		12	73	71	71	74	75	72,8
8	Переходный	2	63	63	62	62	61	62,2
		12	71	73	76	72	74	73,2

Обсуждение результатов. Из табл.1 видно, что эллиптическая форма деформации наиболее опасна, так как при таких колебаниях частоты собственных колебаний самые низкие, а следовательно, вибрация и шум выше, чем при $r=0$ или $r> 2$. Подобные выводы подтверждаются данными табл.2. Для двигателей, у которых средний радиус ярма 184 мм, наибольший уровень шума выше при частоте колебаний 250 Гц, в отличие от двигателя со средним радиусом ярма 166 мм, у которого наибольший уровень шума имеет место при частоте колебаний 500 Гц.

Гармоники силы, имеющие равные порядки и частоты, вращаются или пульсируют при условии равенства их угловых частот по величине и по знаку. Наибольшая деформация возникает при резонансе, т.е. при совпадении или достаточном приближении частоты силы, возмущающей вибрации, к частоте собственных колебаний статора.

В результате комплекса расчётно-экспериментальных исследований для двухскоростных лифтовых двигателей рекомендованы следующие числа пазов ротора: 42 ($p=3/9$), 58 ($p=2/8$), 54 ($p=3/12$ и $p=2/12$).

Выводы. Исходя из анализа влияния некоторых конструктивных и электромагнитных параметров двигателей для привода лифтов на его вибрационную и шумовую активность, можно сформулировать некоторые рекомендации, которые необходимо выполнять при проектировании и производстве двигателей.

1. Проектирование двигателей для привода лифтов начинается с основных размеров и геометрических соотношений активного ядра и электромагнитных нагрузок. Уровень электромагнитных нагрузок и основные размерные соотношения выбираются из условия получения пониженных уровней вибрации и шума. При этом двигатель должен надёжно работать в условиях лифтового привода.

2. При создании малощумного двигателя необходимо принять все возможные меры для уменьшения значения вынуждающих сил во всех источниках вибрационного возбуждения. Уменьшение магнитных возбуждающих сил достигается выбором рационального соотношения числа пазов статора и ротора, увеличением воздушного зазора между статором и ротором, введением скоса пазов на роторе (статоре) и т.д. Воздушный зазор необходимо выбрать максимально возможным из условий допустимых значений электромеханических показателей двигателя и минимально возможных сил одностороннего магнитного притяжения. При этом неравномерность должна быть минимальной.

3. Целесообразно увеличить жёсткость статорного пакета, в том числе и за счёт увеличения высоты спинки (ярма) сердечника статора. При этом уровни вибрации на представительных частотах снижаются.

Литература

1. **Лазарюу Д.Ф., Бикир Н.** Шум электрических машин и трансформаторов/ Пер. с рум.- М.: Энергия, 1973.- 271 с.
2. **Шубов И.Г.** Шум и вибрация электрических машин.- Л.: Энергия, 1974.- 200 с.
3. АКУСТИКА. Определение уровней звуковой мощности источников шума. Точные методы для заглушенных и полузаглушенных камер. ИСО 3745.- М.: Изд-во стандартов, 1982.- 36 с.
4. **Астахов Н.В., Мальшев В.С., Медведев В.Т., Полухин В.Ф.** Вибрации и шум машин постоянного тока и асинхронных машин.- М.: Моск. энерг. ин-т, 1984.- 72 с.
5. **Астахов Н.В., Мальшев В.С., Медведев В.Т., Полухин В.Ф.** Расчёт магнитных вибраций асинхронных двигателей.- М.: Моск. энерг. ин-т, 1985.- 96 с.
6. **Исаков В.М., Федорович М.А.** Виброшумозащита в электромашиностроении.- Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1986. – 208 с.
7. **Янг С., Эллисон А.** Измерение шума машин / Пер. с англ.- М.: Энергоатомиздат, 1988.-144 с. ISBN 5-283-02442-3.
8. **Афонин В.И.** Шумы электродвигателей привода лифтов.- Владимир: ВООО ВОИ, 2007.- 94 с. ISBN 978-5-93907-029-4.
9. **Афонин В.И.** Виброшумоактивность двигателей привода лифтов// Электротехника.- М., 2005.- №5.- С.28-32.
10. **Афонин В.И.** Выбор числа пазов двигателей привода лифтов // Электротехника.- М., 2005.- №5.- С.24-28.
11. **Афонин В.И., Западня М.Ф.** Шумовые характеристики электродвигателей частотно–регулируемого редукторного привода лифтов // Электротехника.- М., 2010.- №12.- С.20-24.

*Поступила в редакцию 15.05.2018.
Принята к опубликованию 14.12.2018.*

**ՎԵՐԵԼԱԿՆԵՐԻ ՀԱՂՈՐԴԱԿՆԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱՇԱՐԺԻՉՆԵՐԻ ԱՂՄՈՒԿՆԵՐԻ ՎՐԱ
ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԱՅԻՆ ԳՈՐԾՈՆՆԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ**

Վ.Ի. Աֆոնին, Դ.Պ. Անդրիանով, Ն.Պ. Բաղայան

Ուսումնասիրվել է վերելակի հաղորդակի էլեկտրաշարժիչի աղմուկների վրա կառուցվածքային գործոնների ազդեցությունը: Պատրաստման տեխնոլոգիան և աշխատանքի ռեժիմը նույնպես պայմանավորում են աղմուկի առաջացումը: Ուստի կառուցվածքի անկատարությունը (ոչ ռացիոնալությունը) մեքենայի դինամիկական «վարքի» կարևորագույն ցուցանիշ է: Էլեկտրական մեքենաների աղմուկի նվազեցման մեթոդները հիմնված են պատճառների ուսումնասիրությունների վրա, որոնք առաջացնում են աղմուկը, իսկ վերլուծության մեթոդները՝ հիմնական ձայնագիտական հասկացությունների վրա: Վերելակների աղմուկի նվազեցման համար էլեկտրաշարժիչների հաղորդակների նախագծման ժամանակ հիմնվում են մի կողմից՝ ձայնագիտական պահանջների, մյուս կողմից՝ տեխնիկական հնարավորությունների միջև փոխզիջումների որոնումների վրա:

Առաջարկվում են միջոցառումներ վերելակների էլեկտրաշարժիչների մագնիսական թրթռոցների փոքրացման համար: Մշակված է ալգորիթմ վերելակների էլեկտրաշարժիչների թրթռոցային և աղմկային բնութագրերի լավացման եղանակների որոնման համար, ներառյալ հետևյալ քայլերը. բացահայտվում են այն գործոնները, որոնք էապես ազդում են թրթռոցային և աղմկային բնութագրերի վրա, որոշվում են շարժիչի թրթռոցի և աղմուկի առավելագույն մակարդակները, գործոնների որոշումն ապահովող անցումային ռեժիմներում թրթռոցների և աղմուկի նվազագույն արժեքը:

Ցույց է տրված, որ կախված բնույթից և դրա հետևանքներից, ըստ շարժիչի թրթռոցների և աղմուկի մակարդակների՝ տարբերակվում են կառուցվածքային, տեխնոլոգիական և ռեժիմային գործոնները, որոնք ազդում են աղմուկի և թրթռոցի մակարդակի վրա:

Ելնելով հեղինակների նախկին հետազոտություններից՝ աշխատանքում դիտարկվում է կառուցվածքային գործոնի ազդեցությունը: Դա պայմանավորված է նրանով, որ կառուցվածքային գործոնը թույլ է տալիս իրականացնել նախագծման փուլում թրթռոցային և աղմկային բնութագրերի լավացման հայտնի մեթոդները: Բացի դրանից, ունենալով համապիտանի ազդեցություն թրթռոցային և աղմկային բնութագրերի վրա, դրանք տարանջատվում են հարաբերական տնտեսականությամբ՝ ի տարբերություն տեխնոլոգիական և ռեժիմային գործոնների:

Առանցքային բառեր. էլեկտրաշարժիչ, աղմկային բնութագրեր, վերելակների հաղորդակներ, տատանումների մակարդակ, անցողիկ ռեժիմներ:

INVESTIGATING THE IMPACT OF CONSTRUCTIVE FACTORS ON THE NOISE OF ELECTRIC MOTORS FOR THE ELEVATOR DRIVES

V.I. Afonin, D.P. Andrianov, N.P. Badalyan

Investigation of the noise of an electrical machine is determined by its structure and electromechanical parameters. The manufacturing technology and the operation mode also affect the generated noise. That is why, the imperfection (irrationality) of the design is the most important indicator of the dynamic behavior of the machine. The methods for reducing the noise of electrical machines are based on the study of the causes that bring about this noise, and the methods of analysis - on the basic acoustic concepts. When designing motors for elevator drives, noise reduction is based on finding a compromise between the acoustic requirements and technical capabilities.

Measures to decrease the magnetic vibrations of the elevator electric motors are proposed. An algorithm to find methods for improving the vibration and noise characteristics of elevator electric motors, including the succession of the following steps is developed: revealing the factors, essentially affecting the vibration and noise characteristics; establishing high levels of vibration and noise of the motors, determining the factors, ensuring the minimum value of vibrations and noises in the transient modes.

It is shown that depending on the nature of the causes, determining the levels of the motor vibrations and noises, structural, technological and mode factors, affecting the levels of noise and vibration are distinguished.

Considering the results of the previous investigations of different authors, in this work, the impact of only structural factors are considered. This is conditioned by the fact that the structural factors allow to implement most of the known methods for improving the vibration and noise characteristics at the stage of design. Apart from this, having a universal effect on the vibration and noise characteristics, they are distinguished by being economical in contrast to the technological and mode factors.

Keywords: electric motor, noise characteristics, elevator drives, vibration level, transient modes.