

УДК 621.313.04

Н.Н. КОНОХОВ (канд. техн. наук, доц.)

Донецкий институт железнодорожного транспорта, г. Донецк, Украина

## МЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ КАК ПОДСИСТЕМА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Рассмотрены этапы статических и динамических расчетов и исследований механической части электрических машин (ЭМ) и современные проблемы снижения виброшумоактивности ЭМ с позиции системного анализа и теории симметрии.

**электрическая машина, системный анализ, колебательная система электропривода, механическая подсистема, подшипниковые узлы, виброшумоактивность**

### Введение

Электрическая машина (ЭМ) представляет собой электромеханическое устройство, предназначенное для взаимного преобразования электрической и механической энергии и характеризуется совокупностью трех основных физических процессов: электромагнитных, тепловых и механических. Поэтому на начальном этапе развития теории и практики проектирования ЭМ эти процессы хотя и рассматривались в контексте общей конструкции ЭМ, но изучались отдельно на основе соответствующих теорий и методов расчетов – электрического, теплового и механического. В отношении механического расчета ЭМ можно отметить работы [1-3], из которых [1] является первой систематизированной работой по механическому расчету ЭМ, а в работах [2, 3] механические расчеты ЭМ входят отдельными главами в учебники по проектированию ЭМ. Таким образом, этот этап механических расчетов ЭМ можно характеризовать как **этап статических расчетов на прочность основных узлов и деталей ЭМ** (корпуса, вала, подшипниковых щитов, подшипниковых опор, шихтованных сердечников магнитопровода, коллектора, полюсов, вентиляторов), которые, однако, учитывали не только чисто механические нагрузки, но, например, тепловое расширение узлов ЭМ, магнитное тяжение ротора в связи с наличием эксцентриситета.

Основным методом расчета прочности деталей ЭМ являлся наиболее распространенный в общем машиностроении метод сравнения максимальных напряжений в опасных сечениях с допустимыми напряжениями для соответствующих материалов [4]:

$$\sigma_{\max} < [\sigma] \text{ или } \tau_{\max} < [\tau]. \quad (1)$$

Следующим этапом в электромашиностроении, как и в общем машиностроении, стал **этап изучения и учета динамических нагрузок в механической системе ЭМ**, связанных как с кинематикой вращения ротора, так и с динамическими электромагнитными и тепловентиляционными процессами в электрических обмотках и магнитной системе. В этой связи в механике ЭМ отдельно выделяется и изучается проблема **вибрации и шума ЭМ** [5-10].

За последние 30-40 лет накоплен значительный опыт создания методов и средств снижения виброшумоактивности ЭМ. Однако практическая реализация в серийном электромашиностроительном производстве новых технических решений является незначительной. Это можно объяснить следующими причинами:

а) особенностью конструкции ЭМ, требующей постоянства воздушного зазора "δ" между статором и ротором, а также совпадения магнитных осей и радиальных вентиляционных каналов статора и ротора;

б) недостаточной компактностью и встраиваемостью в конструкцию ЭМ большинства виброизолирующих и демпфирующих устройств (ВИДУ);

в) низкой собственной надежностью или плохой технологичностью ВИДУ.

Вместе с тем, за последние 20-30 лет достигнут заметный **прогресс в области создания новых технологий и композиционных материалов** [11], однако их использование в механической части ЭМ также осуществляется фрагментарно и неэффективно. Это можно объяснить такими причинами:

а) отсутствием системного подхода при разработке новых типов и серий ЭМ;

б) недостатком средств и квалифицированных специалистов для исследования и адаптации новых технологий и материалов в конструкциях промышленных ЭМ;

в) отсутствием заинтересованности НИИ, КБ и заводов-изготовителей в модернизации на стадии капитального ремонта своих ЭМ, находящихся в эксплуатации.

### Цель исследования

В ряде работ для оценки виброактивности и расчета динамических нагрузок на подшипниковые опоры электродвигателя (ЭД) исследуемая механическая система ЭМ расширяется, выходя за пределы системы машины в надсистему электроприводного агрегата или транспортного средства [12-13].

Поэтому с позиции теории систем и системного анализа [14-16] представляет научный интерес дальнейшее изучение механической подсистемы ЭМ, а также применение теории симметрии для исследования механической части ЭМ. Общая постановка такой задачи для ЭМ была сделана автором в работе [16]. **Целью настоящей работы является продолжение начатого системного анализа ЭМ в отношении исследования её механической части.**

### Особенности системного подхода при исследовании ЭМ

Системный подход отличается от традиционной методологии исследования тем, что он предусматривает изучение объекта как единой системы, состоящей из подсистем, и одновременно как подсистемы, входящей в систему более высокого уровня.

Основные отличия и особенности системного подхода состоят в следующем:

1. При системном подходе акцентируется внимание на трудностях формулировок научно-технических задач.

2. К любой проблеме необходимо априори относиться как к «клубку» взаимосвязанных проблем, обозначаемых термином «проблематика».

3. Системные исследования проблемы необходимо связывать с расширением ее до проблематики.

4. Постоянный переход от неформальных задач к формальным.

5. При системном подходе обычно синтез предшествует анализу, а при традиционном наоборот.

6. При усложнении модели объекта и роста количества включаемых элементов и их связей между собой и с внешней средой усиливается значение эмерджентных явлений.

Для ЭМ, представляющей сложную техническую систему, очевидно, полностью применимы принципы системного анализа.



В первом приближении можно представить неформализованную модель ЭМ, как три взаимосвязанные подсистемы (рис. 1).

В значительной степени формализованная модель ЭД, описанная автором в работе [15], с некоторыми уточнениями представлена на рис. 2.

В этой же работе рассмотрены возможности применения теории симметрии для ЭМ. Поэтому целесообразно в ходе общего анализа рассматриваемой темы выделять проблемы и их возможные решения на основании применения двух новых для ЭМ теорий: теории систем и теории симметрии.

### Вибровозмущающие силы и динамические процессы в механической системе электрической машины

Источники колебаний, рассматриваемые при анализе виброшумоактивности ЭМ, и их классификация представлены на рис. 3. В соответствии с этой классификацией можно указать наиболее эффективные и достаточно разработанные конструктивно-технологические и системные решения снижения виброшумоактивности, которые приведены в таблице 1.

В качестве примера применения системного подхода рассмотрим динамику ротора, связанную с наличием радиального зазора  $\Delta$  в подшипниках качения. Будем различать начальный внутренний зазор подшипника  $\Delta_{нач}$  и рабочий зазор  $\Delta_{раб} < \Delta_{нач}$  (в связи с расширением подшипниковых колец при работе ЭМ из-за нагревания подшипника).

Проанализируем результаты исследования [17], проведенного методом математического моделирования. При принятой модели подшипника качения (ПК), представленной на рис. 4, уравнение движения роторной системы получено в виде:

$$M\ddot{X} + D\dot{X} + CX = Fu + Fb + G, \tag{2}$$

где  $M$  – матрица инерции ротора;  $D$  – матрица демпфирования;  $C$  – матрица жесткости;  $\ddot{X}$ ,  $\dot{X}$  и  $X$  – столбцы виброускорений, виброскоростей и виброперемещений;  $F_u$ ,  $F_b$  – столбцы неуравновешенных сил и столбцы внутренних сил в подшипнике;  $G$  – сила веса.

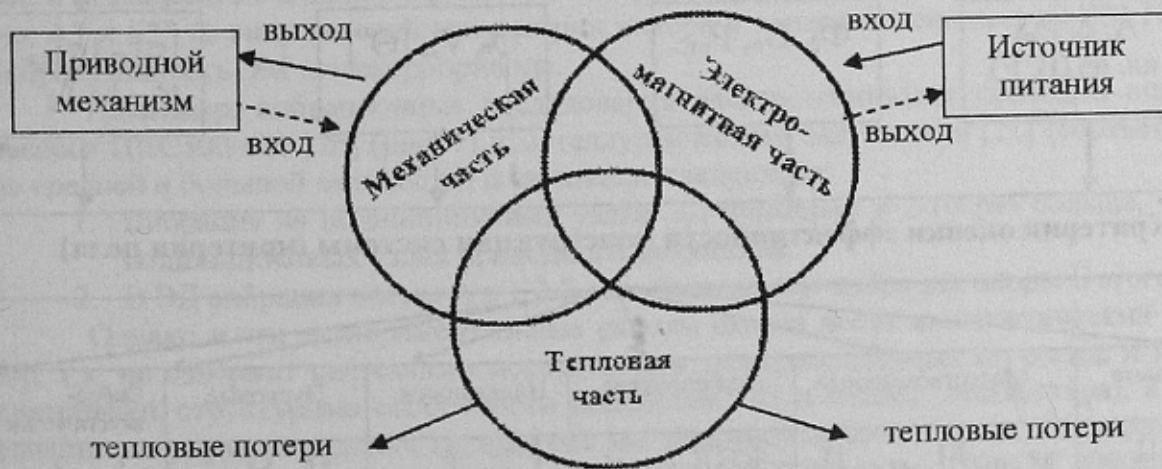


Рис. 1. Неформализованная модель ЭМ:  
 ← для ЭД; ←---- для электрогенератора (ЭГ)

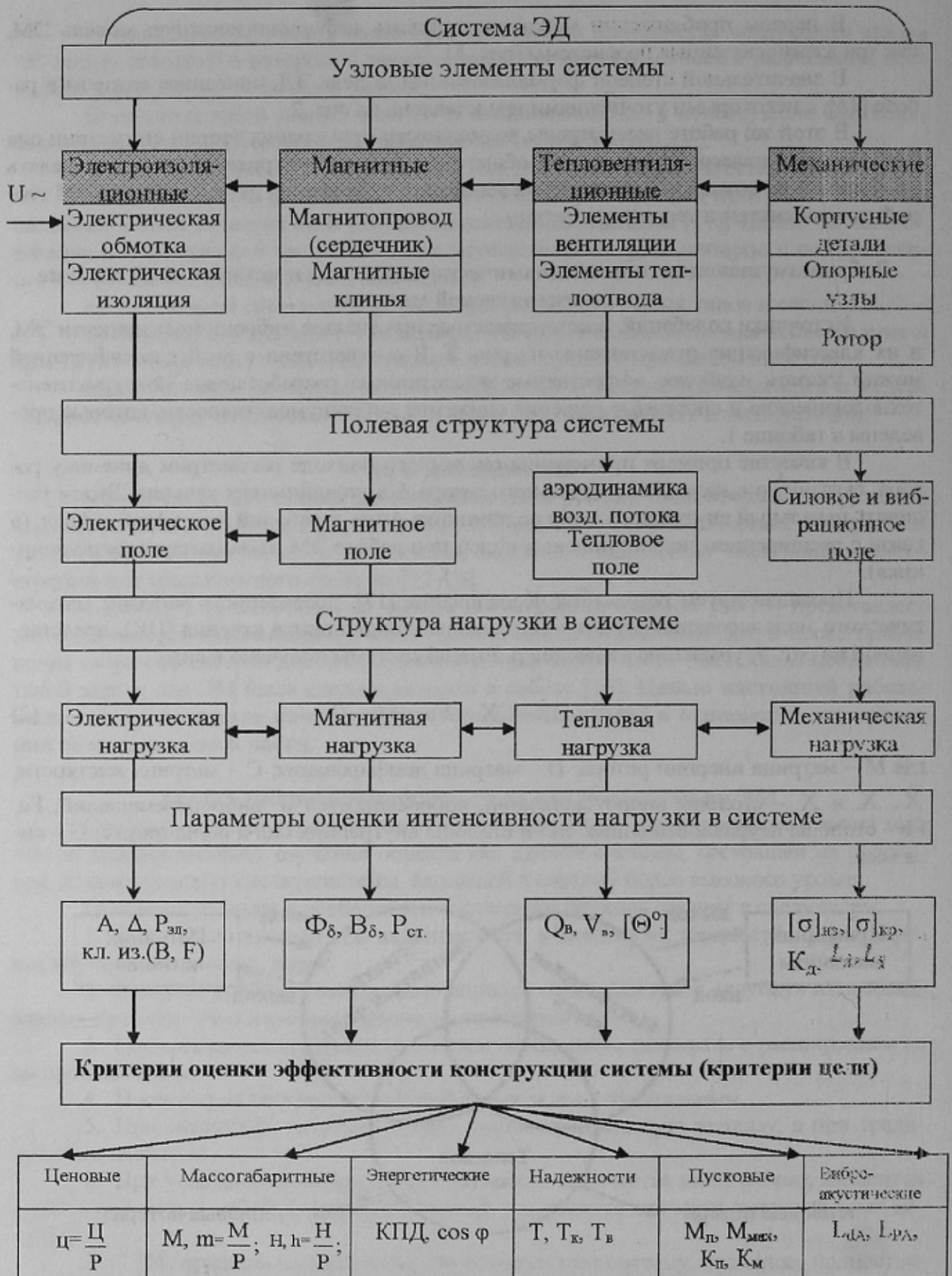


Рис.2. Формализованная модель системы асинхронного двигателя



Таблица 1. Средства и методы снижения виброшумоактивности ЭМ

№	Конструктивно-технологические и системные решения		Литературные источники
1	Традиционные	Снижение дисбаланса и эксцентриситета ротора	[5-8]
2		Отстройка механической системы ЭМ от резонансных частот	[5-8]
3		Применение упругих соединительных муфт	[7,8,10,13]
4		Применение радиально-упругих и аксиально-упругих подшипниковых узлов	[6,10,11,13]
5	Нетрадиционные, новые	Применение магнитных клиньев в пазах статора	[11,16,17]
6		Снижение асимметрии питающей сети с помощью симметрирующих устройств.	[17]
7		Выявление дефектности (асимметрии) КЗ клетки ротора асинхронных ЭМ	[11,17]
8		Сужение частотного спектра в результате симметричности конструкции	[16,23,24]

По результатам моделирования и расчетов (с помощью программной системы «Dynamics R4.2», и процедур пакета «CVODE»), выполненной для роторной модели на подшипниках качения (ПК) при скорости вращения  $n = 180$  об/мин, массе статора и ротора  $m_c = 10$  кг, и  $m_p = 3$  кг, среднем диаметре ПК  $D_{ср.ПК} = 52$  мм, дисбалансе ротора  $= 0$  построена зависимость максимальных виброускорений  $\ddot{Y}_{max} = f(\Delta)$ , которая имеет линейный характер (рис. 5). Исходя из принципа подобия можно предположить, что для средне- и крупногабаритных ЭМ будет иметь место подобная линейная зависимость:  $V \sim \Delta$ . Это обобщение согласуется также с данными фирмы SKF [18] о линейной зависимости срока службы подшипника от рабочего зазора  $\Delta$  (рис. 6). Однако для более серьезных исследований принятую в [17] расчетную модель следует усовершенствовать, переходя от двухмерной к трехмерной модели. В этом случае можно будет провести исследование влияния асимметрии нагрузок и асимметрии зазоров  $\Delta_A$  и  $\Delta_B$  в опорах А\* и Б\*\* (в силу весовой асимметрии ротора и тепловой асимметрии ЭМ [19]) на виброактивность ЭМ и электропривода.

Например, вибрационные исследования электромашинных приводов шахтных насосов ЦНС300-600 [20] (рис. 7) и металлургического эксгаустера [21] (соответственно средней и большой мощности) показывают следующее:

1. Вибрация на подшипниковых узлах ЭД примерно в 2-10 раз больше, чем на подшипниковых узлах приводного механизма.
2. В ЭД вибрация опоры А в 1,2-2 раза больше чем вибрация опоры Б этого ЭД.

Однако и эти экспериментальные работы скорее носят диагностический характер, т.к. не содержат системного исследования электромашинных агрегатов и не рассматривают структурные особенности подсистем ЭД и насоса (эксгаустера), а также влияние их упруго-массовых параметров на динамику колебательных процессов и на причины превышения норм вибрации ЭМ в насосной установке [ГОСТ 208015-93] и неудовлетворительной работы ЭМ в эксгаустерной установке.

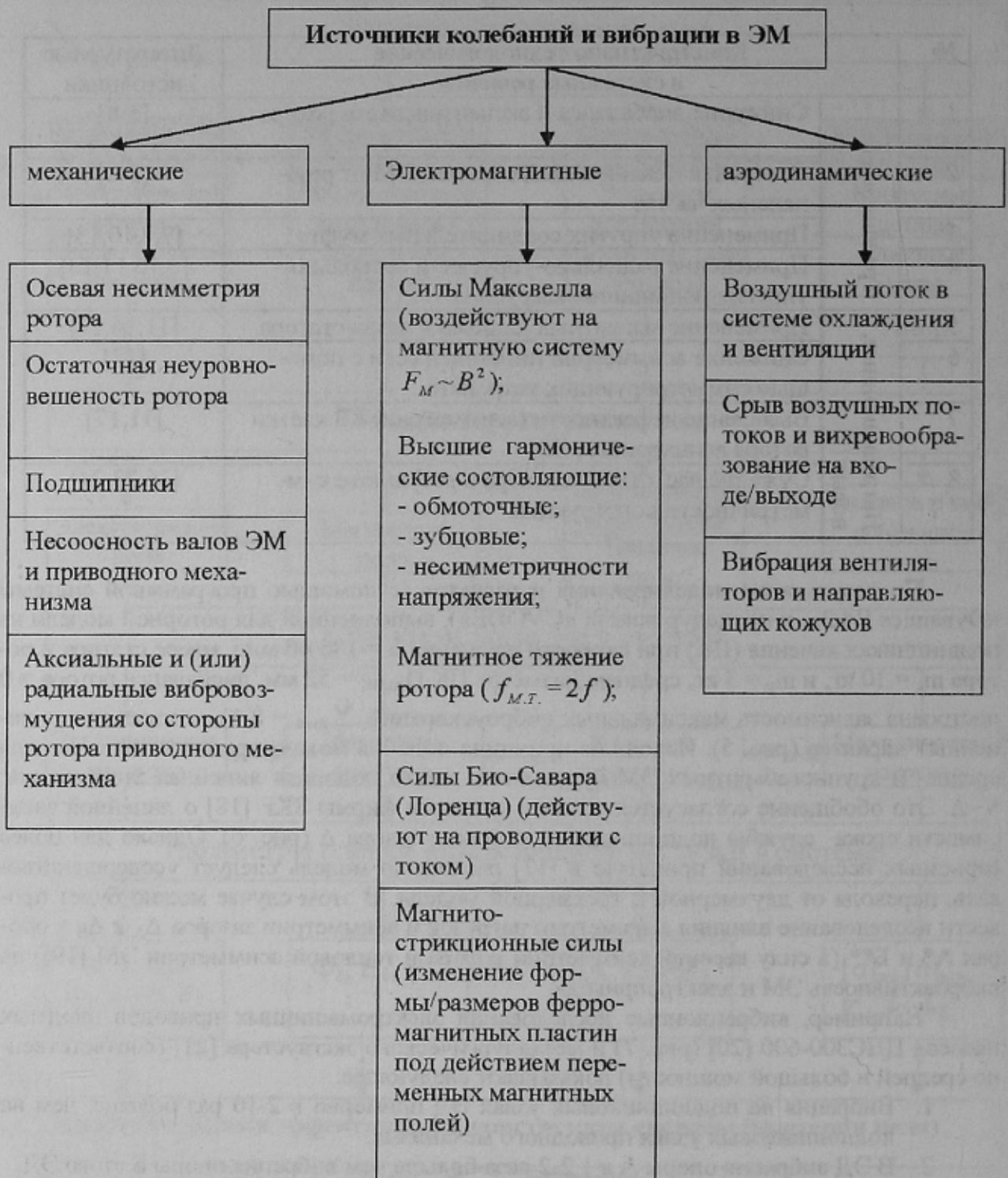


Рис. 3. Классификация источников виброшумоактивности ЭМ

Более того, системный подход очевидно должен предполагать изучение взаимосвязи продольных, поперечных и осевых колебаний ротора [6] (валопровода электропривода) в подшипниковых опорах всей электромеханической системы. Например, подобный системный анализ был предпринят автором при анализе осевой виброактивности в шахтных насосных установках типа «ЭД ВА02 – насос ЦНС»[13].



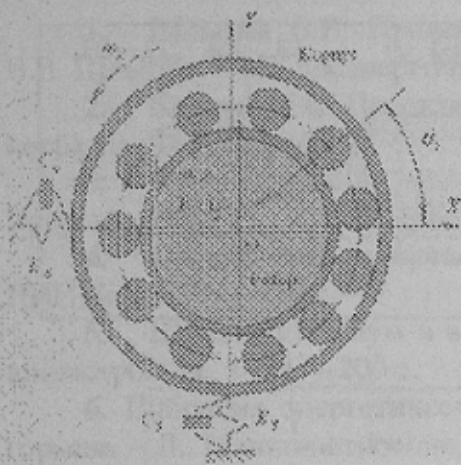


Рис. 4 Динамическая модель подшипника качения [17]

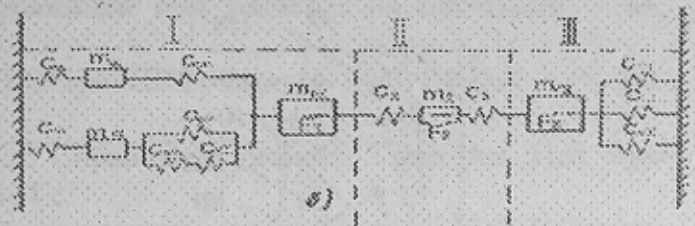
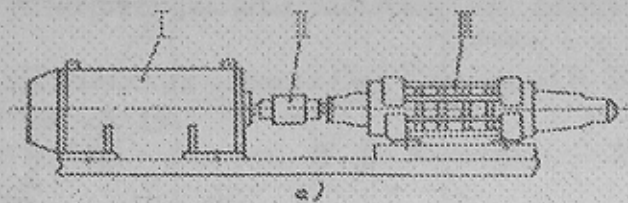


Рис. 8 Общий вид (а) и модель осевых колебаний (б) в системе «ЭД ВАО (I) – соединительная муфта (II) – насос ЦНС (III)» [13]

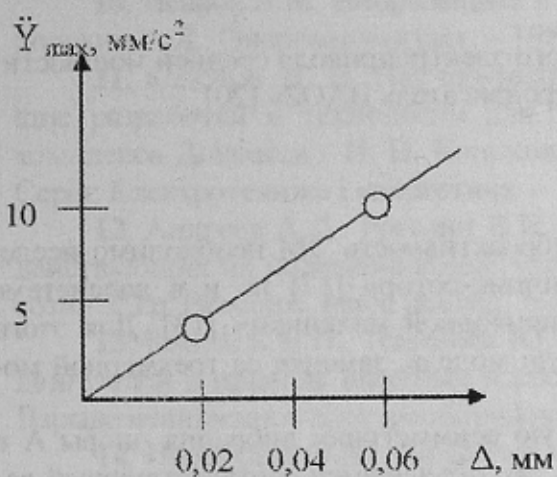


Рис. 5. Зависимость вибрации (вибро ускорения  $\ddot{Y}_{\max}$ ) ЭМ от рабочего зазора  $\Delta_{\text{раб}}$  в подшипнике качения

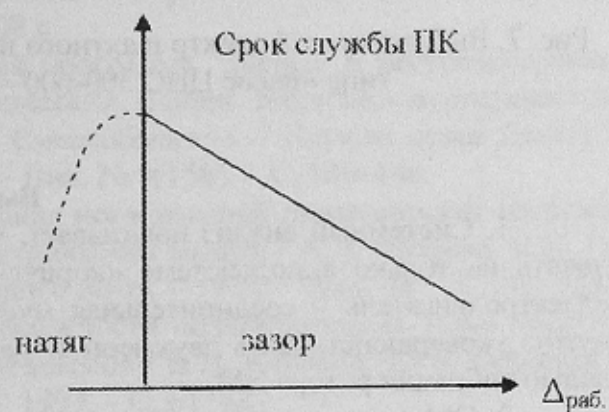


Рис. 6. Зависимость срока службы подшипника качения от рабочего зазора  $\Delta_{\text{раб}}$

\* опора А – со стороны рабочего конца вала,  
 \*\* опора Б – со стороны нерабочего конца вала

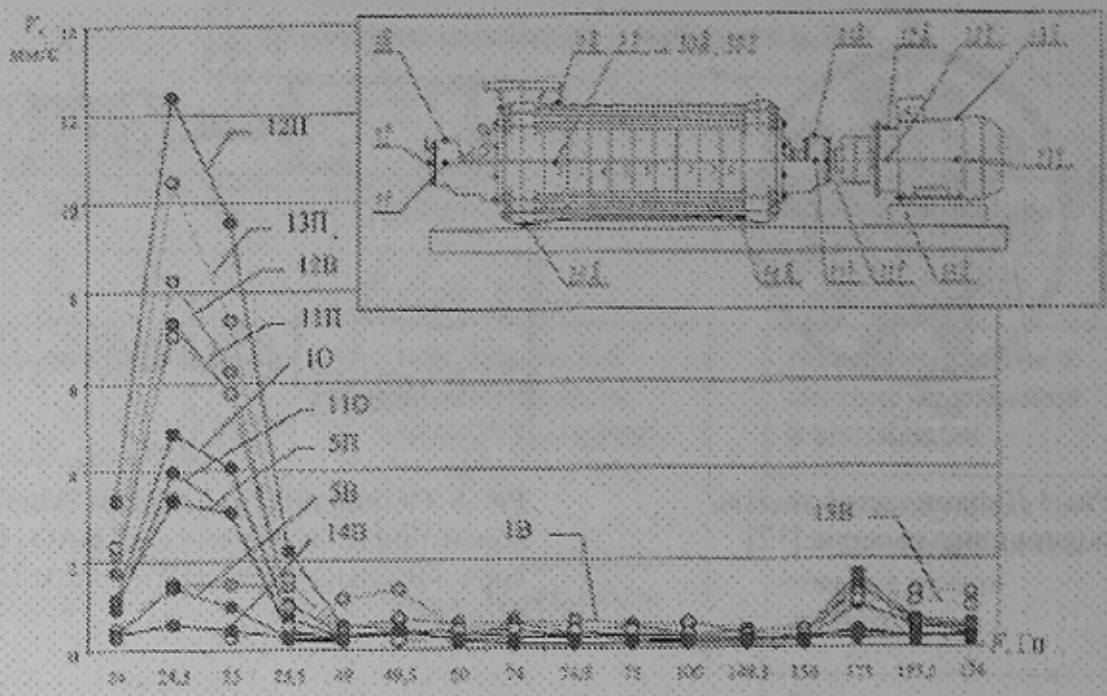


Рис. 7. Вибрационный спектр шахтного насосного электропривода средней мощности типа «насос ЦНС 300-600 – электродвигатель ВАО2» [20]

### Выводы

1. Системный анализ показывает, что виброактивность ЭМ необходимо исследовать не только в подсистеме «корпус-подшипник-ротор» [17] но и в надсистеме «электродвигатель – соединительная муфта – приводной механизм» [13]. Для этого нужно усовершенствовать двухмерную расчетную модель, заменяя ее трехмерной моделью вибрации ротора ЭМ.

2. ЭМ имеют определенную вибрационную асимметрию: вибрация опоры А в 1,2-2 раза больше вибрации опоры В. Очевидно, это объясняется соответствующей весовой и тепловой асимметрией ЭМ, в первую очередь ротора и подшипниковых узлов. Поэтому снижение весовой и тепловой асимметрии при проектировании и реконструкции ЭМ имеет важное значение.

3. Необходимо совершенствовать, как традиционные методы и средства снижения виброшумоактивности: динамическую балансировку ротора, точность сборки узлов ЭМ, применение качественных и специальных подшипников. (например, SKF[18]), так и новые методы и средства: симметричные обмотки и композиционные магнитные клинья, обеспечивающие снижение высших гармонических составляющих в магнитном поле [11], повышение порядка продольной и поперечной зеркальной симметрии корпуса (статора), что приводит к сужению частотного спектра машин [22, 23], применение виброизолирующих и демпфирующих устройств (ВИДУ), упругих подшипниковых опор, адаптированных в конструкцию ЭМ [10, 13, 24].



## Список литературы

1. Шлыгин В.В. Прочностные и размерные расчеты электрических машин / В.В. Шлыгин. – М.: Госэнергоиздат, 1963.
2. Сергеев П.С. Проектирование электрических машин / П.С. Сергеев, Н.В. Виноградов, Ф.А. Горяинов. – М.: Энергия, 1970. – 632 с.
3. Проектирование электрических машин / под ред. И. П. Копылова. – М.: Энергия, 1980.
4. Определение допустимых напряжений при расчётах на прочность. – М.: НИИМаш, 1974. – 78 с.
5. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин / И.Г. Шубов. – Л.: Машиностроение, 1974. – 200 с.
6. Вибрация энергетических машин. Справочное пособие / под ред. Н.В. Григорьева. – Л.: Машиностроение, 1974. – 464 с.
7. Исанович М.М. Устранение вибрации электрических машин / М.М. Исанович, Л.И. Клейман, Б.Х. Перчанок. – Л.: Энергия, 1979. – 200 с.
8. Фридман В.М. Колебания электрических машин. Вибрации в технике: справочник / под ред. В.М. Челомей. – М.: Машиностроение, 1980. – Т. 3. – С. 519-539.
9. Шумилов Ю.А. Магнитные вибрации асинхронных двигателей: автореферат дисс.... д.т.н. / Ю.А. Шумилов. – Х., 1980. – 47 с.
10. Исаков В.М. Виброзащита в электромашиностроении / В.М. Исаков, М.А. Федорович. – Л.: Энергоатомиздат. – 1986. – 208 с.
11. Конохов Н. Н. Научно-техническая программа. Энерго- и ресурсосберегающие разработки и технологии для электрических машин топливно-энергетического комплекса Донбасса / Н. Н. Конохов, В.Ф. Сивокобыленко // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Електротехніка і енергетика. – 2009. – Вип. № 9(158). – С. 140–146.
12. Андреев А.Д., Рогозин В.Н. Методика исследований динамических нагрузок, действующих на подшипниковые узлы электрических машин / А.Д. Андреев, В.Н. Рогозин // Тр. Всесоюз. науч. исслед. тепловозного ин-та. – 1978. – Вып. 48. – С.148–153.
13. Конохов Н.Н., Поршнев Ю.В. О надежности подшипниковых узлов электродвигателей в приводе шахтных насосов и углесосов / Н.Н. Конохов, Ю.В. Поршнев // Взрывозащищенное электрооборудование. – 1997. – С. 61–72.
14. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – М.: Высшая школа. – 1989. – 360 с.
15. Конохов Н.Н. Принцип симметрии – как концепция развития конструкции электрических машин / Н.Н. Конохов // Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования: труды международного симпозиума [«ЭЛМАШ – 2006», МА «Интерэлектромаш»], октябрь 2006. – М., 2006 – Т. 2. – С. 128–134.
16. Конохов Н.Н. Структурный анализ и принцип симметрии при совершенствовании конструкции электрических машин / Н.Н. Конохов // Електротехніка і Електромеханіка. – 2007. – № 3. – С. 36-38.
17. Леонтьев М.К. Динамика ротора в подшипниках качения / М.К. Леонтьев, В.А. Карасев, О.Ю. Потапова // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2007. – № 1(8). – С. 45-50.
18. SKF. Общий каталог. Венгрия. – 1997. – 974 с.
19. Конохов Н.Н. Эффективность и принципы проектирования симметричных систем охлаждения электрических машин / Н.Н. Конохов // Електротехніка і Електромеханіка. – 2008. – № 3. – С. 22-26.

20. Алиев Н.А. Диагностика корпусно-секционных турбомашин по их вибрационно-техническому состоянию / Н.А. Алиев // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2005. – № 3 (10). – С. 4-10.

21. Борисенко В.Ф. Методы оценки состояния электромеханической системы – привода эксгаустера / В.Ф. Борисенко, В.А. Сидоров, В.В. Ницета // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2007. – № 1 (8). – С. 15-19.

22. Повилейко Р.П. Архитектура машины / Р.П. Повилейко. – Тюмень: Зап.-сиб. книжное издательство, 1974. – 95 с.

23. Повилейко Р.П. Симметрия в технике / Р.П. Повилейко. – Новосибирск, 1970. – 130 с.

24. Механическая система высокоскоростных электродвигателей / Л.Н. Шашанов. – М.: Энергия, 1971. – 135 с.

**М.М. КОНОХОВ**

Донецкий институт железнодорожного транспорта

**МЕХАНІЧНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ ЯК ПІДСИСТЕМА  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕНЕРГІЇ**

Розглянуті етапи статичних і динамічних розрахунків та дослідження механічної частини електричних машин (ЕМ) і сучасні проблеми зниження віброшумоактивності ЕМ з позиції системного аналізу і теорії симетрії.

**електрична машина, системний аналіз, коливальна система електроприводу, механічна підсистема, підшипникові вузли, віброшумоактивність**

**N.N. KONOHOV**

Donetsk Railway Institute

**MECHANICAL SYSTEM OF THE ELECTRIC MACHINE AS THE SUBSYSTEM  
OF ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTER**

Stages of static and dynamic calculations and researches of mechanical part of electric machine (EM) and modern problems of decrease of vibration and noise activity of EM from a position of the system analysis and the symmetry theory are considered.

**electric machine, system analysis, oscillatory system of electric drive, mechanical subsystem, bearing units, vibration and noise activity**

Рецензент: д.т.н., проф. Кондрахін В.П.

Надійшла до редколегії 25.01.2010