

Н.Н. КОНОХОВ¹, к.т.н., доц.

В.Ф. СИВОКОБЫЛЕНКО², д.т.н., проф.

¹Донецкий институт железнодорожного транспорта Украинской национальной железнодорожной академии (г. Донецк)

²Донецкий национальный технический университет (г. Донецк)

ВЛИЯНИЕ АСИММЕТРИИ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАТЕРИАЛО-ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Розглядається вплив конструктивної (внутрішньої) та напруги живлення (зовнішньої) асиметрії електричних машин (ЕМ) на матеріало-енергоспоживання. Серед джерел конструктивної асиметрії виділяється асиметрія тепло-вентиляційної системи, як основної причини збільшення маса-габаритних показників ЕМ. Робиться висновок про необхідність комплексного підходу до проблеми зниження асиметрії ЕМ.

Рассматривается влияние конструктивной (внутренней) и питающего напряжения (внешней) асимметрии электрических машин (ЭМ) на материалоенергопотребление. Среди источников конструктивной асимметрии выделяется асимметрия тепло-вентиляционной системы, как основной причины увеличения масса-габаритных показателей ЭМ. Делается вывод о необходимости комплексного подхода к проблеме снижения асимметрии ЭМ.

Введение. Теория симметрии и ее применение в системном анализе конструкций ЭМ были рассмотрены (в том числе в последних работах авторов) в [1-7 и др.]. С другой стороны имеется ряд работ [8-12 и др.], в которых рассматриваются и анализируются вопросы отклонения от симметрии в системах 3х-фазного напряжения и негативное влияние асимметрии питающего напряжения на характеристики, и работу ЭМ переменного тока.

Важнейшими характеристиками ЭМ следует считать характеристики материалоенергопотребления, то есть те характеристики, которые определяют потребление электротехнических материалов при производстве ЭМ и электрической энергии при их эксплуатации. К первым относятся себестоимость и массо-габаритные показатели, ко вторым – потери и КПД. В качестве эксплуатационных издержек так же следует учесть затраты материалов и энергии на ремонт, которые зависят в основном от надежности ЭМ и условий эксплуатации. Причем, из условий эксплуатации в первую очередь следует обратить внимание на качество электриче-

ской энергии на промышленных предприятиях [8-13].

Цель работы и постановка задачи. На основании изложенного можно сформулировать цели данной работы:

а) рассмотреть совместно две близкие с точки зрения теории симметрии проблемы внутренней и внешней асимметрии ЭМ;

б) объединить с точки зрения системного анализа указанные проблемы в общую проблематику симметрии ЭМ.

Для достижения этих целей необходимо рассмотреть следующие научно-технические задачи:

– дать структурную модель ЭМ с внутренними и внешними десимметрирующими связями;

– показать основные конструктивные несовершенства ЭМ, обуславливающие ее внутреннюю асимметрию;

– показать основные несовершенства систем промышленного энергоснабжения ЭМ, обуславливающую ее внешнюю асимметрию (причем в зависимости от того, для какого режима двигателя или генератора предназначена ЭМ, факторы внутренней и внешней асимметрии могут меняться местами);

– проанализировать критерии оценки и методики расчета внутренней и внешней асимметрии ЭМ;

– проанализировать существующие и предложить новые способы и технические решения, обеспечивающие снижение внутренней и внешней асимметрии ЭМ и защиты от внешней асимметрии.

Безусловно все поставленные задачи значительно выходят за объем одной публикации и настоящие исследования должны быть продолжены.

Структурная модель ЭМ с десимметрирующими связями. Наиболее полная физическая модель асинхронной ЭМ (АЭМ) была представлена авторами в [3]. Здесь же целесообразно представить структурную энергетическую модель АЭМ (рис. 1).

Все из показанных на рис. 1 энергетических связей в той или иной мере могут быть десимметрирующими или асимметрирующими. Поэтому общую картину источников асимметрии и некоторых асимметрирующих конструктивных элементов можно представить в виде табл. 1.

Влияние асимметрии на материалопотребление и энергопотребление ЭМ. На основе табл. 1 следует рассмотреть более подробно влияние асимметрии структурных элементов ЭМ на их материалопотребление и энергопотребление. В настоящей работе рассмотрим влияние лишь наиболее существенных десимметрирующих факторов: влияние асимметрии питающей сети на энергопотребление ЭМ и влияние асимметрии теплового поля и системы охлаждения (СО) на материалоемкость ЭМ.

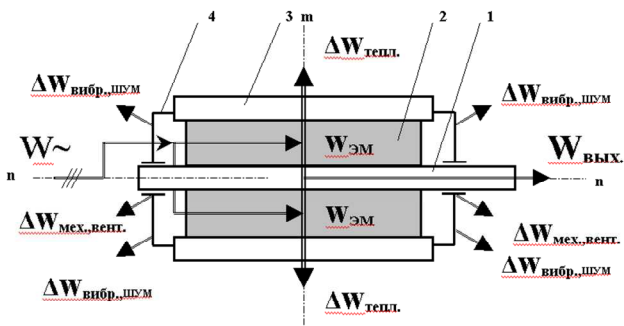


Рис. 1 Структурная энергетическая модель ЭМ переменного тока: 1 – вал, 2 – электромагнитная система, 3 – теплоотводящая система, 4 – конструктивная часть. W_{\sim} , $W_{ЭМ}$, $W_{мех}$ – электрическая энергия на входе, энергия электромеханического преобразования и полезная энергия на выходе, $\Delta W_{тепл.}$, $\Delta W_{вибр.,шум.}$, $\Delta W_{мех.,вент.}$ – потери энергии тепловые, вибрационные и шумовые, механические и вентиляционные

Таблица 1 – Источники асимметрий электрооборудования и их ущерб

Вид электрооборудования	Ущерб, USD/год. при $\beta=0,01$ USD/(кВт*ч), работе в течении T, тыс. ч/год, и кап. затрат З, тыс. USD	Ежегодный ущерб, USD/год, при $K_{2U}=2\%$ $\beta=0,01$ USD/(кВт*ч)
АД, $U_{НОМ}=6-10$ кВ $P_{НОМ} \geq 100$ кВт	$(600T^{(а.д.)} \Delta P_{м.НОМ} + 103^{(а.д.)})K_{2U}$	40-120
СД, $U_{НОМ}=6-10$ кВ $P_{НОМ}=1000-5000$ кВт	$(970T^{(с.д.)} \Delta P_{м.НОМ} + 163^{(с.д.)})K_{2U}$	200-150
Цеховые трансформаторы $U_{НОМ}$ 6-10/0,4 кВ		
а) $S_{НОМ} < 630$ кВ*А	$(65T^{(ц.т.)} \Delta P_{мНОМ} + 3^{(ц.т.)})K_{2U}$	5-8
б) $S_{НОМ} > 630$ кВ*А	$(62T^{(ц.т.)} \Delta P_{м.НОМ} + 0,93^{(ц.т.)})K_{2U}$	10- 50

Влияние асимметрии питающей сети на энергопотребление ЭМ.

По определению акад. А.В. Шубникова симметрия, рассматриваемая как закон строения структурных объектов, сродни гармонии [3].

Поэтому проблему асимметрии питающей сети с позиции теории симметрии можно рассматривать как задачу гармонизации трехфазной сети (как источника электропитания) и ЭМ (как электропотребителя).

Если со стороны источника питания на вход ЭМ подаются, кроме напряжений и токов прямой последовательности, также напряжения и токи обратной или нулевой последовательностей, то это приводит к асимметричным режимам её работы. Последние вызывают её дополнительный нагрев. При этом если температура нагрева изоляции превышает

номинальную на 8°C , то для изоляции, например класса А, срок ее службы уменьшается в 2 раза. При возникновении асимметрии питающего ЭМ напряжения, в зависимости от соотношения его составляющих прямой U_1 , и обратной U_2 последовательностей, дополнительно возникает тормозной момент, увеличивается скольжение и потери, что приводит к дополнительному нагреву и ухудшению КПД. При этом следует иметь в виду, что отношение токов I_1/I_2 в 5-7 раз больше, чем отношение напряжений U_1/U_2 , так как индуктивное сопротивление короткого замыкания ЭМ составляет обычно 15-20 %.

Асимметрия напряжений питания вызывает также повышенные значения знакопеременного динамического момента на валу ЭМ, что может привести к её повреждению при пуске. Кроме того, питание ЭМ асимметричным напряжением приводит также к сокращению её срока службы. При наличии напряжения обратной последовательности 2 % от номинального, срок службы сокращается на 20 %, а при 4 % соответственно на 50 %.

Асимметрия сопротивлений обмоток статора и ротора приводит к появлению биений в токах статора, частота которых пропорциональна разности частот токов прямой последовательности статора и ротора. При этом происходит искажение механической характеристики АД, зависящее от степени асимметрии сопротивлений. При обрыве же фазы статора и скольжении $S = 1$ пусковой момент равен нулю, а при обрыве фазы ротора может наблюдаться провал в механической характеристике при $S = 0.5$ из-за так называемого одноосного эффекта включения.

Влияние асимметрии системы охлаждения и теплового поля на материалоемкость электрической машины. Данный вопрос подробно рассматривался в работах авторов [1-4]. В статье [1] на рис. 2 была представлена зависимость $m = f(P_2)$ удельной массы m от полезной мощности P_2 для ЭД серии ВАО2-ВАО5, а в работе [3] на рис.3 была представлена шкала высоты оси вращения $h = f(P)$ для закрытых асинхронных ЭД в диапазоне мощности 200-1000 кВт. Из приведенных сравнений видно, что удельная масса ЭД серии ВАО2 и ВАО2М (модернизированные опытные образцы), значительно ниже чем ЭД серии ВАО4, потому что ВАО2 и особенно ВАО2М имеют более совершенные в отношении симметрии СО.

Также и в отношении высот оси вращения сравниваемых ЭД (рис. 3 [3]) отечественные серии закрытых асинхронных ЭД уступают зарубежным аналогам, выполненным по рекомендациям МЭК.

Физически эффективность симметричных СО определяется выравниванием тепловых перекосов, свойственных асимметричным СО, и использовании этого теплового резерва для повышения удельной мощности ЭМ.

Таблица 2 – Зависимость электромагнитных потерь в электрооборудовании от K_{2U} по данным [8].

Внутренние и внешние энергетические связи	Соответствующие связи в конструктивных элементах ЭМ	Соответствующие дисимметрирующие параметры ЭМ		Критерий несимметрии и источники информации
		При симметрии	При несимметрии	
W_{\sim}	<p>сеть (кабель)</p> <p>↓</p> <p>Вводное устройство</p>			$\delta U_y, K_{2U}, K_{0U}$ [8-13]
$W_{ЭМ}$	<p>Электрическая обмотка</p> <p>↓</p> <p>Магнитопровод</p>			$V_i, B_z, [3-6, 14]$ $k_{\delta}, e_0, \delta-e_0$ [3,7,14-16]
$\Delta W_{\text{вент}}$ $\Delta W_{\text{тепл}}$	<p>Система охлаждения</p>			$\Delta T_{\text{доп}}, K_{к.н} = T_{\text{сп}}/T_{\text{max}}$ [4,9]
$\Delta W_{\text{виб.}}$	<p>Корпус</p>			$f_n / F_m, [3,17,18]$
$\Delta W_{\text{мех.}}$	<p>Подшипники</p>			δ_n, α [20]
$\Delta W_{\text{виб}}$	<p>Ротор</p>			h, γ [7, 19]

Этот резерв закладывается и в формуле расчета допустимого превышения температуры обмотки $T_{\text{доп}}$ над температурой окружающей среды $T_{\text{о.с}}$

$$\Delta T_{\text{доп}} = T_{\text{пред}} - T_{\text{о.с}} - \Delta T_{\text{зап}}, \quad (1)$$

где $\Delta T_{\text{зап}}$ – запас на неравномерность нагрева активных частей ЭМ.

Для оценки степени асимметрии теплового поля обмотки ЭМ вводится коэффициент неравномерности нагрева $K_{\text{к.н.}} = T_{\text{ср}}/T_{\text{max}}$, где $T_{\text{ср}}$ и T_{max} – средняя и максимальная температура обмотки. В связи с неопределенностью отношения $T_{\text{ср}}/T_{\text{max}}$ многие зарубежные фирмы регламентируют определенный диапазон этого отношения [9]. Например, нормами VDE устанавливается следующий диапазон отношений $T_{\text{ср}}/T_{\text{max}}$ (при температуре охлаждающей среды $+40^\circ\text{C}$): $1,07 < T_{\text{ср}}/T_{\text{max}} < 1,15$. Нормы NEMA предписывают для закрытых ЭД условие $1,18 < T_{\text{ср}}/T_{\text{max}} < 1,22$ и для продуваемых – $1,27 < T_{\text{ср}}/T_{\text{max}} < 1,3$. Чем меньше отношение $T_{\text{ср}}/T_{\text{max}}$, тем совершеннее конструкция и лучше использование электротехнических и конструкционных материалов.

Как отмечалось в [1-3], симметричные СО имеют дополнительные преимущества в повышении эффективности охлаждения, связанные с многовариантностью конструктивных решений и развитием поверхности охлаждения. В качестве примера на рис. 2 приведены две внутренние СО из публикации [4].

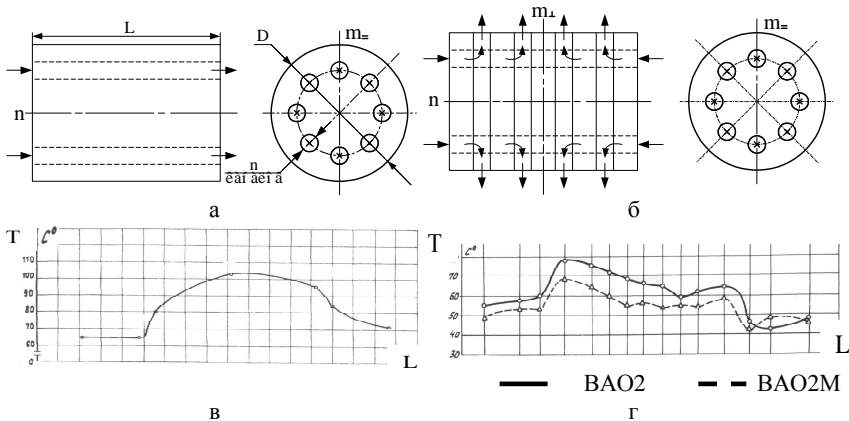


Рис. 2. Аксиальная (асимметричная) СО – а; радиальная (симметричная) СО (б) и распределения температуры вдоль обмотки в ЭД ВАОП-560М4 с аксиальной СО – в и ЭД ВАО2 и ВАО2М с радиальной СО – г.

Выводы.

1. Необходим комплексный системный подход к общей проблеме асимметрии ЭМ.

2. Питающее напряжение как источник внешней асимметрии влияет на увеличение энергопотребления, а также на снижение эксплуатационной надежности ЭМ.

3. Система охлаждения как источник внутренней асимметрии в первую очередь влияет на увеличение масса-габаритных показателей, а также на снижение КПД.

4. При проектировании ЭМ необходимо разрабатывать комплексные конструктивные и организационно-технические меры для снижения дисимметрии внутренних источников и для контроля и регулирования асимметрии внешнего источника асимметрии.

Список литературы: 1. Конохов Н.Н. Анализ концепций развития конструкции крупных взрывозащищенных электродвигателей // *Электротехника і електромеханіка*. – 2005. – № 1. – С. 47-50. 2. Конохов Н.Н. Принцип симметрии – как концепция развития конструкции электрических машин // *Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования. Труды международного симпозиума "ЭЛМАШ-2006"*, МА "Интерэлектромаш". – М., 2006. – Т. 2. – С. 128-134. 3. Конохов Н.Н. Структурный анализ и принцип симметрии при совершенствовании конструкции электрических машин // *Электротехника і електромеханіка*. – 2007. – № 3. – С. 36-38. 4. Конохов Н.Н. Эффективность и принципы проектирования симметричных систем охлаждения электрических машин // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2008. – № 3. – С. 22-26. 5. Дегтев В.Г. Синтез симметричных трехфазных обмоток с заданным уровнем избирательности // *Электричество*. – 1993. – № 4. – С. 40-44. 6. Дегтев В.Г. Симметрия и свойства многофазных обмоток // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2002. – № 1. – С. 23-27. 7. Васьковський Ю.М., Гайденко Ю.А., Нацик О.В. Дослідження методами теорії поля характеристик асинхронних двигунів при несиметрії параметрів ротора // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2007. – № 3. – С. 19-22. 8. Жежеленко И.В., Саенко Ю.А. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с. 9. Жежеленко И.В., Саенко Ю.А., Горпинович А.В. Влияние качества электроэнергии на надежность асинхронных двигателей // *Промислова енергетика та електротехніка*. – 2004. – № 1. – С. 15-21. 10. Попова Г.О. Контроль режимів роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруги мережі. – Авт. реф. дис... к.т.н. – Мелітополь: Таврійська державна агротехнічна академія, 2003. – 21 с. 11. Дмитриева О.М., Сидоренко О.О. Вплив несиметрії напруг на втрати активної електроенергії у асинхронному двигуні і електричній мережі // *Праці ДонНТУ. Сер. "Електротехніка і електроенергетика"*. – Донецьк: ДонНТУ. – 2006. – С. 91-96. 12. Федоров М.М., Пинчук О.Т. Влияние несимметрии питающего напряжения на характеристики теплового состояния асинхронных двигателей // *Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Матеріали наук.-техн. конф. Севастополь, 24-28 вересня 2007*. – Севастополь, 2007. – С. 97-98. 13. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах энергоснабжения общего назначения. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 31 с. 14. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с. 15. Гашимов М.А. Вопросы исследования несим-

метрии воздушного зазора электрической машины // Автореф...к.т.н. – Баку, 1972. **16.** Урусов И.Д. К вопросу о вибрациях в синхронных машинах под влиянием магнитной асимметрии // Вестник электропромышленности. – 1940. – № 7. **17.** Шумилов Ю.А. Магнитные вибрации асинхронных двигателей // Автореф...д.т.н. – Харьков, 1980. – 47 с. **18.** Исаков В.М., Федорович М.А. Виброшумозащита в электромашиностроении. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с. **19.** Чучман Ю.И., Хай М.В., Максимович Д.С. Експлуатація, ремонт та модернізація асинхронних машин // За ред. Ю.І. Чучмана. – Львів: “Інтелект-Захід”, 2005. – 272 с. **20.** Леонтьев М.К., Карасев В.А., Потапова О.Ю., Дегтярев С.А. Динамика ротора в подшипниках качения // Вибрация машин. – 2007. – № 1. – С. 45-50. **21.** Герасимов В.Г. и др. Электротехнический справочник: в 3-х т. – Т. 2. Электротехнические устройства. – М.: Энергоиздат, 1981. – 640 с. **22.** Вагин Г.Я., Севостьянов А.А. К вопросу о применении на предприятиях регулирующих и стабилизирующих устройств // Промышленная энергетика. – 1998. – № 1. **23.** Птицын О.В. Аппаратные средства контроля качества электрической энергии // Промышленная энергетика. – 1999. – № 5.

Поступила в редколлегию 22.10.2008