

*Н.Н. КОНОХОВ*¹, к.т.н., доц.
*В.Ф. СИВОКОБЫЛЕНКО*², 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 материалое-энергопотребление. 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 материалое-энергопотребления, 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 электрической энергии на промышленных предприятиях [8-13].

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

а) впервые 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.

Таблица 1

| Вид электрооборудования | Ущерб, USD/год. при $\beta=0,01$ USD/(кВт*ч), работе в течении Т, 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, $P_{ном} \approx 100$ кВт СД, $U_{ном}=6-10$ кВ. $P_{ном}=1000-5000$ кВт | $(600T^{(a.д.)}\Delta P_{м.ном}+103^{(a.д.)})K_{2U}$ $(970T^{(c.д.)}\Delta P_{м.ном}+163^{(c.д.)})K_{2U}$ | 40-120 200-150 |
| Цеховые трансформаторы $U_{ном} 6-10/0,4$ кВ а) $S_{ном}<630$ кВ*А б) $S_{ном}>630$ кВ*А | $(65T^{(u.т.)}\Delta P_{мном}+3^{(u.т.)})K_{2U}$ $(62T^{(u.т.)}\Delta P_{м.ном}+0,93^{(u.т.)})K_{2U}$ | 5-8 10- 50 |

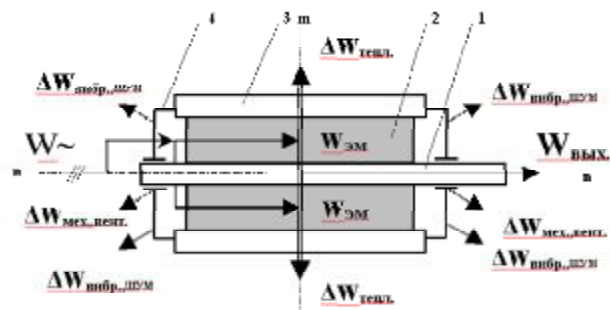


Рис. 1 Структурная энергетическая модель ЭМ переменного тока: 1 – вал, 2 – электромагнитная система, 3 – теплоотводящая система, 4 – конструктивная часть. W_{\sim} , $W_{эм}$, $W_{мех}$ – электрическая энергия на входе, энергия электромеханического преобразования и полезная энергия на выходе, $\Delta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

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 дисимметрирующих факторов: влияние асимметрии питающей сети на энергопотребление ЭМ и влияние асимметрии теплового поля и системы охлаждения (СО) на материалоемкость ЭМ.

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).

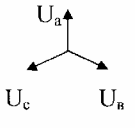
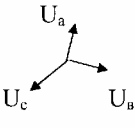
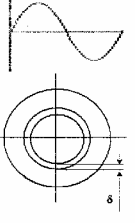
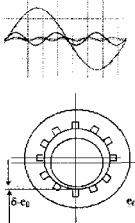
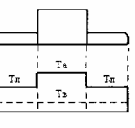
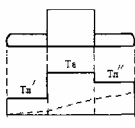
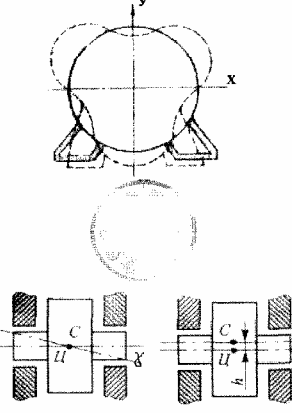
Если со стороны источника питания на вход ЭМ подаются, кроме напряжений и токов прямой последовательности, также напряжения и токи обратной или нулевой последовательностей, то это приводит к асимметричным режимам её работы. Последние вызывают её дополнительный нагрев. При

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.

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} | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 5px;">сеть (кабель)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 5px;">Вводное устройство</div> |  |  | $\delta U_y, K_{2U}, K_{0U}$ [8-13] |
| $W_{ЭМ}$ | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 5px;">Электрическая обмотка</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 5px;">Магнитопровод</div> |  |  | $v_i, B_z, k_{\delta}, e_0, \delta - e_0$ [3, 6, 14-16] |
| $\Delta W_{\text{вент}}$ $\Delta W_{\text{тепл}}$ | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 5px;">Система охлаждения</div> |  |  | $\Delta T_{\text{доп}}, K_{к.н} = T_{\text{ср}} / T_{\text{max}}$ [4, 9] |
| $\Delta W_{\text{виб.}}$ $\Delta W_{\text{мех.}}$ $\Delta W_{\text{виб}}$ | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 5px;">Корпус</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 5px;">Подшипники</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 5px;">Ротор</div> |  | | $f_n / F_m, \delta_n, \alpha$ [3, 17, 18, 20] h, γ [7, 19] |

Влияние асимметрии СО и теплового поля на материалоемкость ЭМ. 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 асинхрон-

ных 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** выражается в выравнивании тепловых перекосов, свойственных асимметричным СО, и использовании этого теплового резерва для повышения удельной мощности ЭМ. Этот резерв закладывается и в формуле расчета допустимого превышения температуры обмотки $T_{доп}$ над температурой окружающей среды $T_{о,с}$:

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

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

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

Как отмечалось в [1-3] симметричные СО имеют еще 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].

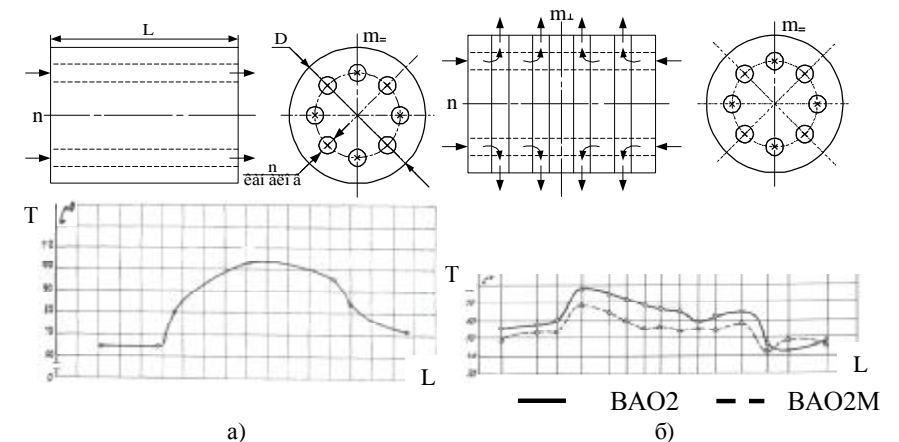


Рис. 2 а) аксиальная (асимметричная) СО; б) радиальная (симметричная) СО и распределения температуры вдоль обмотки в ЭД ВАОП-560М4 (с аксиальной СО) и ЭД ВАО2 и ВАО2М (с радиальной СО)

Заклучение.

1. Необходим комплексный системный подход к общей проблеме асимметрии ЭМ (табл. 1).

2. Источник внешней асимметрии (питающее напряжение) влияет на увеличение энергопотребления (табл. 2), а также на снижение эксплуатационной надежности ЭМ [7, 11,12 и др.].

3. Источники внутренней асимметрии (СО и др.) в первую очередь влияют на увеличение масса-габаритных показателей [1-4 и др.], а также на снижение энергетического показателя – КПД.

4. При проектировании ЭМ необходимо разрабатывать комплексные конструктивные и организационно-технические меры для снижения дисимметрии внутренних источников [4-6 и др.] и для контроля и регулирования асимметрии внешнего источника асимметрии [8, 22, 23 и др.].

Список литературы: 1. Конохов Н.Н. Анализ концепций развития конструкции крупных взрывозащищенных электродвигателей // Электротехніка 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", октябрь 2006, Москва, 2006г. – 140 в 2-х т.т., Т. 2 С. 128-134. 3. Конохов Н.Н. Структурный анализ и принцип симметрии при совершенствовании конструкции электрических машин // Электротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 3 – С. 36-38. 4. Конохов Н.Н. Эффективность и принципы проектирования симметричных систем охлаждения электрических машин // Электротехніка і електромеханіка. Науково-практичний журнал ЕІЕ, – 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. Націк О.В. Дослідження методами теорії поля характеристик асинхронних двигунів при несиметрії параметрів ротора // Электротехніка 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., Гортинович А.В. Влияние качества электроэнергии на надежность асинхронных двигателей // Промислова енергетика та електротехніка, 2004 – № 1 – С. 15-21. 10. Попова І.О. Контроль режимів роботи асинхронних двигунів при несиметрії напруги мережі, Авт. реф. дис... к.т.н. Таврійська державна агротехнічна академія. Мілітопаль, 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" Зб. наук.праць, Донецьк, 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, 2005 – С. 97-98. 13. Межгосударственный стандарт. ГОСТ

13109-97 "Нормы качества электрической энергии в системах энергоснабжения общего назначения". Киев, Госстандарт Украины; 1999 – 31 с. **14.** Копылов И.П. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1986 – 360 с. **15.** Гашимов М.А. Вопросы исследования несимметрии 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.І., 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., Карасёв 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