

ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ И ГЕОМЕТРИИ АКТИВНЫХ ЧАСТЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ РАЗНЫХ КОНЦЕПЦИЯХ РАЗВИТИЯ ИХ КОНСТРУКЦИИ

Виконано порівняльний історичний аналіз та розглянуті особливості вибору головних розмірів електричних машин для двох сучасних концепцій їх розвитку – "КЛАС-КОНЦЕПЦІЇ" та "ЗАП-КОНЦЕПЦІЇ".

Выполнен сравнительный исторический анализ и рассмотрены особенности выбора главных размеров электрических машин для двух современных концепций их развития – "КЛАС-КОНЦЕПЦИИ" и "ЗАП-КОНЦЕПЦИИ".

ВВЕДЕНИЕ

В авторских работах [1, 2] анализировались две концепции развития конструкции промышленных электрических машин (ЭМ), которые, по сути, явля-

ются конкурентными на современном этапе развития электромашиностроения. Сущность этих концепций представлена в табл. 1.

Таблица 1

Условное обозначение концепции*	Характеристика концепции	Сущность концепции	Примеры характерных ЭМ
КЛАС-КОНЦЕПЦИЯ	Классическая (отечественная) концепция "пропорциональных машин"	Снижение массового (M) и габаритного (H) показателей ЭМ происходит пропорционально (рис. 1)	Отечественные высоковольтные (в/в) АЭД серии ВАО2 (разработчик институт ВНИИВЭ), 1985 [7]
ЗАП-КОНЦЕПЦИЯ	Западно-европейская концепция "длинных машин"	Снижение габаритного показателя H значительно опережает, а точнее преобладает над снижением массового показателя M (рис. 2)	Швейцарские в/в АЭД серии HXR концерна ASEA-Brown Boveri, 1990 [8]; Германские в/в АЭД серии H-compact фирмы Siemens, 1996 [9].

* – условное обозначение концепций введено автором.

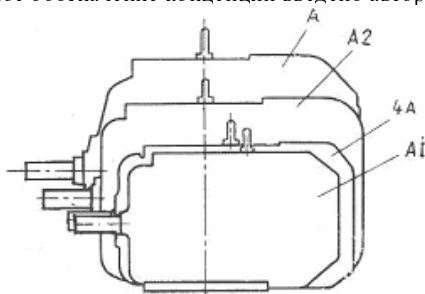


Рис. 1. Сравнительные габариты и масса (объем) асинхронных двигателей отечественных серий: А, А2, 4А, Аі

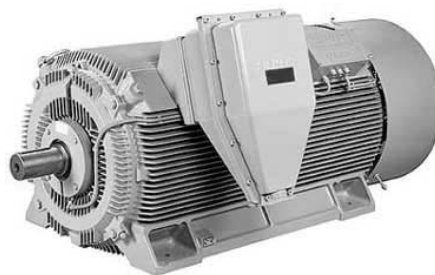


Рис. 2. Внешний вид электродвигателя серии H-compact мощностью 1200 кВт, 6 кВ, 1500 об/мин

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализу и обоснованию предпочтительности КЛАС-КОНЦЕПЦИИ автором были посвящены работы [1, 2], применению теории симметрии для ЭМ были посвящены работы [3-5], разработке принципов проектирования симметричных систем охлаждения ЭМ работа [6]. При исследовании рассматриваемых концепций автором ставились следующие научно-технические задачи:

а) разработка дополнительных новых критериев сравнительной оценки технико-экономической эффективности ЭМ "КЛАС-КОНЦЕПЦИИ" и "ЗАП-КОНЦЕПЦИИ";

б) научное обоснование предпочтительности развития "КЛАС-КОНЦЕПЦИИ" на основании теории симметрии и пропорциональности конструкций;

в) разработка принципов проектирования усовершенствованных ЭМ на основании авторской "КЛАС-КОНЦЕПЦИИ" пропорционально-симметричных ЭМ".

Поэтому целью настоящей работы является ана-

литическое исследование первой задачи (а) и продолжение исследования второй (б) и третьей (в) задачи.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

А. Разработка дополнительных новых критериев оценки технико-экономической эффективности ЭМ.

Основные технико-экономические показатели ЭМ – это массо-габаритные показатели, которые в значительной степени влияют на себестоимость и цену машины. Принятыми массо-габаритными показателями ЭМ являются: масса M [кг] и высота оси вращения (ВОВ) H [мм]. Кроме этого широко применяется удельная масса $m = M / P$ [кг/кВт] и обратная ей величина, представляющая удельную мощность $p = P / M$ [кВт/кг]. Удельная масса и удельная мощность в значительной степени отражают уровень технического совершенства ЭМ при их сравнении.

ВОВ является гостированной величиной и поэтому при сравнении ЭМ этот показатель раньше не

применяли. Однако в свете ЗАП-КОНЦЕПЦИИ "длинных машин", при которой за счет изменения конфигурации ("растягивания" машины в длину), западные фирмы стали создавать, используя специальные технологии, новые серии с прогрессивно-пониженной шкалой ВОВ, рассматривая это как основное достижение новой конструкции. Поэтому оценка преимуществ ЗАП-КОНЦЕПЦИИ в связи с уменьшением ВОВ "H", без связи с показателями массы, приводит к необходимости пересмотра и дополнения массо-габаритных показателей. Такие дополнения к массо-габаритным показателям, особенно при условии введения их в национальные ГОСТы и ДСТУ, должны стимулировать отечественных разработчиков и производителей ЭМ учитывать не только традиционные показатели технического уровня ЭМ, но и современные западно-европейские тенденции снижения ВОВ "H" – пусть даже за счет искусственного перераспределения массы вдоль продольной оси вращения машины.

В этой связи предлагается дополнить общепринятые массо-габаритные показатели (M, H, m, p) несколькими новыми показателями:

- удельная ВОВ: $h = H / P$ [мм/кВт];

- удельная масса на единицу ВОВ:

$$m_h = M / H = m / h \text{ [кг/мм];}$$

- удельная массо-габаритная мощность:

$$p_{m,h} = P / (M \cdot H) \text{ [кВт/кг·мм].}$$

При этом показатель "удельная ВОВ" h фактически будет отражать ту или иную национальную или международную шкалу ВОВ, по которой спроектирована данная серия ЭМ (как показано в [1, 2] на сегодняшний день западноевропейские стандарты шкалы ВОВ и стандарты МЭК, являются более прогрессивными, чем национальные стандарты СССР и постсоветских стран) – рис. 3.

Поэтому новые показатели "удельная масса на единицу ВОВ" m_h и "удельная массо-габаритная мощность" $p_{m,h}$ будут более комплексно отражать преимущества по обоим массо-габаритным показателям – массе M и ВОВ H .

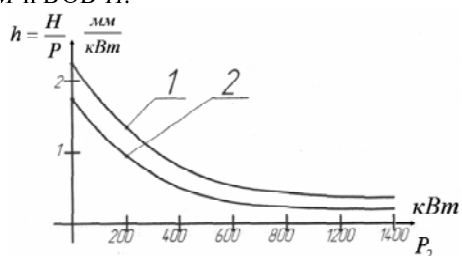


Рис. 3. Зависимость $h = f(P_2)$ для отечественных (1) и западноевропейских (2) в/в закрытых ЭД по данным [1, 8]

В. Главные размеры ЭМ и их соотношение.

Массо-габаритные показатели, влияющие на технико-экономические показатели ЭМ, в свою очередь, определяются главными размерами D и l_δ (рис. 4) и оптимальной геометрией активных частей.

Расчетная мощность P' , главные размеры D и l_δ , электромагнитные нагрузки B_δ и A в ЭМ связаны между собой машинной постоянной Арнольда [10]:

$$C_A = \frac{D^2 \cdot l_\delta \cdot n}{P'} = \frac{2}{k \cdot A \cdot B_\delta}, \quad (1)$$

где n – частота вращения, об/мин, k – коэффициент, учитывающий полюсное перекрытие λ_δ , обмоточный коэффициент $K_{об}$ и коэффициент формы поля K_B ($k = \pi \cdot \lambda_\delta \cdot K_{об} \cdot K_B$).

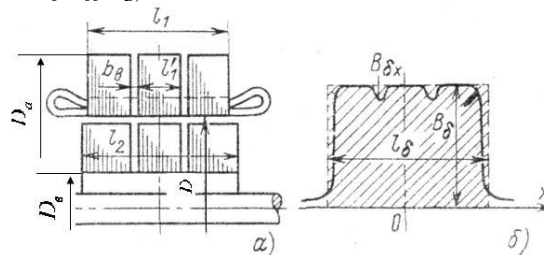


Рис. 4. Основные размеры ЭМ: а – продольный разрез; б) – кривая индукции в воздушном зазоре

При заданных P' и n электромагнитные нагрузки B_δ и A определяются исходя из возможностей современных электротехнических материалов, а объем активных частей $D^2 \cdot l_\delta$ – на основании существующих методик электромагнитного расчета и геометрии активных частей.

Предположим примерно одинаковый уровень совершенства применяемых электротехнических материалов и методик электромагнитного расчета для ЭМ двух рассматриваемых концепций (хотя на повышение уровня электромагнитных нагрузок B_δ и A может еще оказывать влияние более эффективная организация системы охлаждения, что будет рассмотрено в дальнейшем).

Таким образом, при прочих равных условиях и равных объемах активных частей $D^2 \cdot l_\delta$ конструктивное отличие ЭМ по КЛАС-КОНЦЕПЦИИ и ЗАП-КОНЦЕПЦИИ будет состоять в выборе отношения L / D и геометрии активного объема $D^2 \cdot l_\delta$.

Соотношение между D и l_δ определяют через полюсное деление $\tau = \pi \cdot D / 2 \cdot p$ по формуле:

$$\lambda = l_\delta / \tau. \quad (2)$$

Как отмечал известный советский ученый по расчету ЭМ А.Я. Бергер "спор о том, что выгоднее, длинные ЭМ или короткие ЭМ, ведется давно" [11].

Так еще в первом послевоенном фундаментальном труде В.П. Шуйского по расчету ЭМ [12] приводятся следующие суждения: "Машины с большим значением λ являются длинными. Они, обычно, дешевле в изготовлении, но охлаждение их представляет известные трудности. Последнее, вообще говоря, ограничивает возможное увеличение длины машины. Вызывавшие раньше опасения ухудшение КПД и коэффициента мощности практически не наблюдается или проявляется лишь в незначительной степени. Европейские фирмы изготавливают, как правило, более длинные машины, чем американские, без какого-либо ухудшения упомянутых характеристик. В настоящее время можно констатировать тенденцию к дальнейшему увеличению длины машин".

Причину, которая сначала привела к простому удлинению западноевропейских машин, недавно в отечественной литературе указал В.А. Севостьянов [13], как связанную с тенденцией к повышению энергетики ЭД в связи с мировым кризисом 1973 года. Со ссылками на западные публикации, он показывает, что сначала удлинители на 20-30 % и за счет этого увеличили КПД на 2-7 % и cosφ на 10-15 % у ЭД мощностью до 100 кВт, а

затем с 1984 года, по мере роста цен на электроэнергию, эту тенденцию распространили и на более крупные в/в двигатели мощностью 400 кВт и выше.

Таким образом, к 1980-85 гг. оказалось, что западные фирмы имеют более экономичные, но при этом и более материалоемкие (а значит и более дорогие) ЭД, чем восточноевропейские страны СЭВ, которые придерживались классических соотношений L/D . В этот период заметно возрос импорт советских ЭД, преимущественно в страны третьего мира. Поэтому для удержания крупнейшего рынка электротехнической продукции западноевропейские фирмы разрабатывают новую концепцию "длинных машин" для АД средней и большой мощности. Более раннее название таких ЭД – "евродвигатели" [8]. В дальнейшем Siemens для подобных ЭД применил название "H-compact". Подробности конструкции в/в ЭД серии "H-compact" рассмотрены автором в [1, 2] и Севостьяновым В.А. в [13]. Здесь отметим лишь главную техническую идею концепции "H-compact" – это применение длинного, литого, хорошо оребренного, высокопроводящего корпуса для средних и крупных ЭД мощностью до 1400-1600 кВт.

При этом по нашему мнению, благодаря новой концепции западноевропейские фирмы достигли следующих преимуществ (по сравнению с простым механическим удлинением машин):

- снижение себестоимости ЭД за счет освоения технологии длинного литого корпуса;
- снижение ВОВ H по сравнению с предыдущими классическими конструкциями ЭМ;
- удержание прежнего своего уровня удельной мощности;
- создание нового имиджа (образа) компактных двигателей средней и большой мощности.

У Бергера А.Я. в разделе "За длинные или короткие машины" [11] следует выделить следующие его соображения и ссылки на других авторов:

1. Обычно, чем ЭМ меньше по габаритам и легче по весу, тем она дешевле.

2. Форсирование охлаждения ЭМ позволяет отводить большие потери при допустимых превышениях температуры, уменьшать вес и габариты машины, снижать ее себестоимость и цену. Однако при этом возрастают потери, и снижается КПД.

3. У длинных машин (при неизменных электромагнитных нагрузках): хуже вентиляция, больше прогиб вала, больше общая масса, но выше пусковой момент (у АД) и КПД.

4. Обычно отношение L/D близко к 1-1,5 и только в крупных турбогенераторах приходится принимать $L/D = 6-7$.

5. Рекомендации разных авторов:

- Арнольд рекомендует для АД до 4 кВт $\lambda = 0,6-1$; для больших мощностей $\lambda = 0,9-1,5$, причем оптимальный $\cos\phi$ и перегрузочная способность получается при $\lambda = 1-1,2$, а минимум массы меди – при $\lambda = 1,5-3$;

- Рихтер предлагает $\lambda = 0,6-1$ (для $2p = 2$), а для $2p > 2 - \lambda = \sqrt{p}$;

- Шуйский рекомендует для МПТ $\lambda = 0,5-1$; для СМ $\lambda = 0,5 \cdot \sqrt{p}$; для АМ $\lambda = 0,5 \cdot \sqrt[3]{p}$, т.е. для АМ: $\lambda = 0,6-1$ (для $2p = 2$); 1,26 ($2p = 4$); 1,44 ($2p = 6$); 1,58 ($2p = 8$).

- По Сергееву λ выбирается по кривым в зависимости от p ;

- По Петрову для АМ $\lambda = (0,8-1,2) \cdot \sqrt[3]{p}$.

Б. Ограничения и оптимизация длины ЭМ.

Выше уже было указано, что еще Шуйский выделял проблему охлаждения длинных машин как основной фактор ограничения увеличения отношения L/D .

Более подробное рассмотрение этого вопроса в [14] показывает, что для обозначения этой проблемы разработчиками первых отечественных серий АД было введено понятие "критическая длина" для непакетированных сердечников. **Физической причиной эффекта "критической длины" является продольный тепловой проток, распространяющийся от средней пазовой части обмотки к обеим ее лобовым частям, создающий дополнительный температурный перепад.**

Что касается оптимизации λ , то, например, Сергеев [15] дает такие зависимости:

- оптимальный M_{\max} и $\cos\phi$ – при $\lambda = 1-1,3$;

- оптимальный расход меди (G_{cu}) и потери (ΔP) – при $\lambda = 1,5-3$.

В [16] оптимум λ пытаются вывести из условия минимизации потерь и определяют как условие отношения потерь в любой части обмотки и всех потерь в якоре как 1/3, что впрочем возможно выполнить для отдельной ЭМ, но не для серии.

В результате можно подытожить, что для КЛАС-КОНЦЕПЦИИ тепловые ограничения и фактор "критической длины" не являются таким препятствием, как для ЗАП-КОНЦЕПЦИИ, а разные рекомендации по оптимизации λ должны быть применены для обеих концепций с учетом их особенностей.

В. Принципы совершенствования активных частей ЭМ на основании КЛАС-КОНЦЕПЦИИ.

Главной особенностью КЛАС-КОНЦЕПЦИИ должно оставаться пропорциональное уменьшение массо-габаритных показателей ЭМ и высокая удельная мощность. Для теоретического обоснования принципов совершенствования геометрии активных частей на основании КЛАС-КОНЦЕПЦИИ обратимся к трудам известных ученых МЭИ Копылова И.П. [10] и Бута Д.А. [17]. В разделе "Синтез электрических машин" Копылов показывает, что в индуктивных ЭМ энергия электромагнитного поля преимущественно концентрируется в воздушном зазоре и зубцовой зоне. Поэтому выбор объема воздушного зазора (V_δ) и расчет зубцовой зоны при проектировании ЭМ имеет основное значение. Объем V_δ определяется через средний диаметр воздушного зазора D_{cp} по формуле:

$$V_\delta = \pi \cdot D_{cp} \cdot l_\delta \cdot \delta. \quad (3)$$

При этом удельная плотность энергии в воздушном зазоре $p_{уд} = P/V_\delta$ составляет, например, в АД серии 4А мощность 250 кВт порядка $0,52 \cdot 10^6$ Вт/м³.

Бут выводит формулу для расчета удельной массы (величина, обратная удельной мощности) АД:

$$m = \frac{30 \cdot K_D^2 \cdot K_k \cdot \gamma_{cp}}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot n_1 \cdot A_2 \cdot B_\delta}, \quad (4)$$

где γ_{cp} – средняя плотность объема активных мате-

риалов; K_d – отношение D_a / D_s ; K_k – конструктивный коэффициент, равный отношению (уточнение автора): $(m_k + m_a) / m_a$.

Исходя из (3) – (4) и предыдущих работ и изобретений автора **при выборе геометрии активных частей для АМ взрывающихся по КЛАС-КОНЦЕПЦИИ можно рекомендовать:**

1. Повышение A_2 за счет более эффективного охлаждения ЭМ КЛАС-КОНЦЕПЦИИ в соответствии с [6].

2. Снижение K_d и K_k за счет новых технических решений для ЭМ КЛАС-КОНЦЕПЦИИ [18, 19] и за счет специальной геометрии крайних частей пакетов статора [20].

3. Увеличение D (D_{cp}) и D_b за счет оптимизации зубцовой зоны статора и уменьшения спинки статора и ротора (при КЛАС-КОНСТРУКЦИИ) и увеличения межреберных аксиальных вентиляционных каналов оребренного вала.

4. Снижение конструктивной массы ротора за счет совершенствования оребренной конструкции вала ротора [19].

ВЫВОДЫ

1. Применение предлагаемых новых дополнительных массо-габаритных показателей удельной ВОВ h , удельной массы на единицу ВОВ m_h и удельной массо-габаритной мощности $p_{m,h}$ должно позволить более комплексно оценивать техническое совершенство отечественных ЭМ, отражая позитивный вклад обеих массо-габаритных составляющих (M и H).

2. Дискуссия о предпочтительности коротких или длинных машин ведется давно, при этом рекомендации разных авторов о выборе λ имеют значительные расхождения. ЭМ КЛАС-КОНЦЕПЦИИ должны занять "золотую середину" между короткими и длинными машинами. При этом они должны выгодно отличаться по массо-габаритным показателям и себестоимости от ЭМ ЗАП-КОНЦЕПЦИИ, что для ЭМ средней и большой мощности при дефиците электротехнических материалов приобретает решающее значение.

3. В отношении энергетики (КПД, $\cos\phi$) ЭМ КЛАС-КОНЦЕПЦИИ должны быть на уровне или очень незначительно уступать ЭМ ЗАП-КОНЦЕПЦИИ (при условии использования равноценных современных электротехнических материалов). Превзойти уровень западноевропейских ЭМ по КПД возможно лишь при умелом использовании преимуществ КЛАС-КОНЦЕПЦИИ в отношении меньших вентиляционных и механических потерь и более равномерного охлаждения по длине машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конохов Н.Н. Об отечественной концепции развития конструкции крупных взрывозащищенных электродвигателей типа ВАО2 // Труды симпозиума "Элмаш-2004", МА "Интерэлектромаш", Москва. – Т. 2. – С. 21-26.
2. Конохов Н.Н. Анализ концепций развития конструкции крупных взрывозащищенных электродвигателей // Электротехника і електромеханіка. – 2005. – №1. – С. 47-50.
3. Конохов Н.Н. Принцип симметрии – как концепция развития конструкции электрических машин // Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования. Труды международного симпозиума "ЭЛМАШ-2006". – Москва. – Т. 2. – С.128-134.
4. Конохов Н.Н. Структурный анализ и принцип симметрии при совершенствовании конструкции электрических машин // Электротехника і електромеханіка. – 2007. – № 3. –

С. 36-38.

5. Конохов Н.Н., Сивокобыленко В.Ф. Влияние асимметрии конструкции электрических машин и питающего напряжения на эффективность энерго-материалопотребления // Вестник НТУ "ХПИ" Сб. науч. тр. Темат. вып. "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов". – 2008. – № 45. – С. 81-88.
6. Конохов Н.Н. Эффективность и принципы проектирования симметричных систем охлаждения электрических машин // Электротехніка і електромеханіка. – 2008 – № 3. – С. 22-26.
7. Збарский Л.А., Ширнин И.Г., Горягин В.Ф. и др. Характеристики асинхронных взрывонепроницаемых двигателей серии ВАО2 мощностью 200-2000 кВт // Электротехника. – 1986. – № 10. – С.43-46.
8. Paloniemi P., Waltzer I., Varis S., Baureihe MXP-der neue Euro-Motor im heistungsbereich von 200 bis 1400 kw // ABB Technik. – 1990. – № 5. – S. 17-24.
9. Output range of rib-cooled induction motors extended up to 3000 kW/ Krans Waldemar // Eng. and Autom. [Siemens Energ. and Automat]. – 1996. – № 3, 4. – p. 12-13.
10. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
11. Бергер А.Я. Выбор главных размеров электрических машин. – Л.: Энергия, 1972. – 89 с.
12. Шуйский В.П. Расчет электрических машин. – Л.: Энергия, 1968. – 732 с.
13. Севостьянов В.А., Митько В.И. Особенности высоковольтных асинхронных двигателей типа Н-compact фирмы "Siemens" // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. научных трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: УкрНИИВЭ. – 2008. – С. 198-204.
14. Пантюхов Л.Л., Спасов В.К., Прошин Ю.Н. "Критическая длина" непакетированных сердечников защищенных асинхронных двигателей // Электротехника. – 1978. – № 9. – С. 36-39.
15. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1970. – 632 с.
16. Дикарев Е.А. Оптимальное отношение длины к диаметру якоря в электрических машинах // Автоматика и электромеханика. Воронеж: Воронежский ПИ. – 1977. – С.15-16.
17. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высшая школа, 1990. – 416 с.
18. Патент 1473018 РФ, МКИ Н02К 9/04. Электрическая машина / Конохов Н.Н., Збарский Л.А., Ковалев Е.Б., Сороко П.А. 30.06.93.
19. Патент 1725322 РФ, МКИ Н02К 9/04. Электрическая машина / Конохов Н.Н., Збарский Л.А., Ширнин И.Г., Бурковский А.Н. 30.06.93.
20. Патент 7670 України, МКИ Н02К 1/20, Електрична машина з повітряним охолодженням / Конохов Н.Н., Збарський Л.О., Куцин М.А., Поршневі Ю.В., Волох В.Я. – Бюл. № 4, 1995.

Поступила 06.10.2009

Конохов Николай Николаевич, к.т.н. доц.
Донецкий институт железнодорожного транспорта
Украинской национальной железнодорожной академии
кафедра ЭСЭ
Украина, 38018, Донецк, ул. Горная, 6
тел. (062) 319-01-46

N.N. Konokhov

Choice of the main dimensions and geometry of active parts of electric machines under different conceptions of their design development

Comparative historical analysis is performed and peculiarities of the main dimensions selection for electric machines are considered for two current conceptions of their development.

Key words – electric machines, main dimensions selection, design development conceptions, comparative historical analysis