

УДК 621.313.333

А.М. Галиновский, канд. техн. наук, Е.М. Дубчак

(Украина, Киев, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»)

Е.А. Ленская

(Украина, Киев, Национальное агентство Украины по вопросам эффективного использования энергетических ресурсов)

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Введение

В связи со значительным ростом цен на энергоносители особую актуальность приобретает проблема энергосбережения. Одно из направлений решения этой проблемы – широкое внедрение асинхронизированных машин (АСМ), которые могут применяться как генераторы крупных и автономных электроэнергетических систем, регулируемый электропривод, устройства связи энергосистем и др.

В 1985 г. на Бурштынской ГРЭС впервые в мире установлен асинхронизированный турбогенератор мощностью 200 МВт (АСТГ200), изготовленный на заводе "Электротяжмаш". Асинхронизированные генераторы широко применяются в ветроэнергетических установках мощностью более 5 МВт.

Несмотря на большую потребность, в Украине крайне низкими темпами внедряется регулируемый электропривод. Это связано с тем, что в основном разработка регулируемого электропривода ведется в направлении сочетания преобразователя частоты (ПЧ) в питающей сети и асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым (к.з.) ротором. Однако подобное направление имеет существенный недостаток: ПЧ должны иметь по меньшей мере такую же мощность, как и сама электрическая машина.

Диапазон регулирования частоты вращения электроприводов насосных и вентиляционных установок составляет $\approx 15 - 20$ % от номинальной скорости [1]. Существенно снижается мощность ПЧ, и соответственно стоимость агрегата в целом. Поэтому перспективно внедрение в качестве регулируемого электропривода мощных насосных и вентиляционных установок высоковольтных АСМ с преобразователями в роторной цепи [2 – 4]. Широкое внедрение АСМ в качестве регулируемого электропривода реально только при условии разработки простых устройств пуска с ограничением пусковых токов и сравнительно малой стоимостью устройства [3, 4].

Одно из требований, которое электроэнергетика предъявляет к ЭМ, – высокая надежность, ограничивающая или исключаящая применение контактно –

щеточных узлов. Поэтому большое внимание уделяется проблеме создания бесконтактных АСМ (БАСМ).

В НТУУ «КПИ» разработана концепция реализации инновационного пилотного проекта «Электрические машины двойного питания». Цель проекта – широкое внедрение в промышленность Украины генераторов постоянной частоты при переменной частоте вращения и высоковольтного регулируемого электропривода на базе электрических машин двойного питания (МДП). Составная часть проекта – оценка экономической эффективности от внедрения энергосберегающих машин. Внимание исследователей уделяется также совершенствованию автономных систем генерирования переменного тока стабильной частоты [6], вентильных генераторов бесконтактных синхронных машин и ветроэнергетических установок.

Цель работы – анализ основных принципов построения вращающихся преобразователей машин двойного питания, технико-экономических показателей и перспектив внедрения энергосберегающих машин.

Вращающиеся преобразователи БАСМ

В БАСМ могут применяться каскадные или одномашинные возбудители [7 – 10]. Увеличенные габариты каскадных возбудителей ограничивают их применение в БАСМ малой и средней мощности. В этих случаях целесообразно применять одномашинный (синхронный) возбудитель.

На рис. 1, а изображена принципиальная электрическая схема каскадного возбудителя БАСМ с трехфазно-трехфазным непосредственным ПЧ при модулированном напряжении (НПЧЕМ): 1, 2 – асинхронные возбудители; 3 – тиристорный преобразователь (ТП); 4 – асинхронная машина (АМ); 5 – вращающаяся часть. Асинхронные возбудители выполняются с разным ($p_1 \neq p_2$) или одинаковым ($p_1 = p_2 = p_B$) числом пар полюсов. На роторе каждого возбудителя имеется три трехфазные обмотки, одноименные фазы которых расположены в одних и тех же пазах. При $p_1 = p_2 = p_B$ на статорные обмотки возбудителей подается напряжение возбуждения с частотой, равной частоте скольжения асинхронной машины (АМ) f_s . Направления вращения полей статоров двух возбудителей взаимно противоположны.

В якорных обмотках двух возбудителей наводятся трехфазные системы ЭДС с частотами $f_{12} = f \cdot (1 - s) \cdot \frac{p_B}{p} + f_s$, $f_{22} = f \cdot (1 - s) \cdot \frac{p_B}{p} - f_s$, где: s – скольжение АГ; p – число пар полюсов АМ; f – частота сети. Якорные обмотки двух возбудителей соединены последовательно. На входы трехфазных ТП подаются три трехфазные системы биений напряжений. Частота заполнения $f_3 = \frac{(f_{12} + f_{22})}{2} = f \cdot (1 - s) \cdot \frac{p_B}{p} = p_B \cdot f_B$, где f_B – частота вращения вала. Частота биений f_6 равна частоте скольжения f_s генератора: $f_6 = \frac{(f_{22} - f_{12})}{2} = f \cdot s = f_s$.

В схеме преобразователя применено комбинированное потенциальное разделение фаз источника, при котором в общие звезды соединяются фазы источника с одинаковыми фазами ЭДС частоты заполнения [7 – 11].

Каждый фазный ТП состоит из прямого и обратного блоков тиристоров. Применен комбинированный закон управления тиристорами [12], при котором на встречно включенные тиристоры подаются сигналы управления по исходной переключающей функции частоты заполнения [13]. При этом совместное управление осуществляют при токах нагрузки, меньших тока уставки, а раздельное – в других случаях.

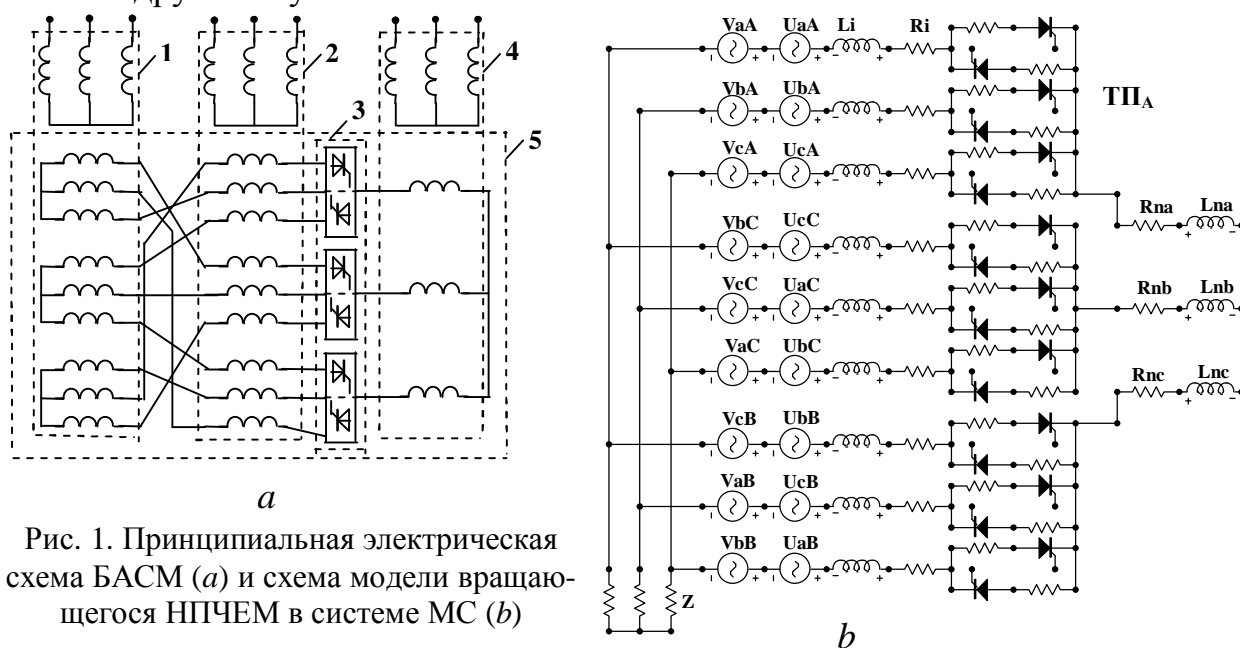


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема БАСМ (а) и схема модели вращающегося НПЧЕМ в системе МС (b)

Исследуем модель НПЧЕМ бесконтактного асинхронизированного генератора (БАСГ) в системе схемотехнического моделирования Micro-Cap (системе МС) [14]. Схема модели приведена на рис. 1, b.

Параметры схемы. Амплитуды и частоты источников: $A_1 = 120$ В; $f_1 = 48$ Гц; $A_2 = 120$ В; $f_2 = 52$ Гц. Полное сопротивление источника $Z_i = 3,2$ Ом; отношение активного сопротивления источника к индуктивному сопротивлению равно 0,25. Применены тиристоры типа B25RIA120. Частота управления тиристорами $f_u = \frac{(f_1 - f_2)}{2} = 50$ Гц. Частота нагрузки $f_n = \frac{(f_2 - f_1)}{2} = 2$ Гц. Уставка по току нагрузки $i_u = 0,2$ А. Полное сопротивление нагрузки $z_n = 11,2$ Ом, $\cos\varphi = 0,819$.

На рис. 2 приведены диаграммы напряжений и токов модели БАСГ:

- а) e_i – ЭДС модулированного трехфазного источника питания, подключенного к входу тиристорного преобразователя фазы А (ТП_А);
- б, d) i_a, i_b, i_c – токи нагрузки; su – сигналы управления тиристорами ТП_А;
- с, е) i_i – токи трехфазного источника, подключенного к ТП_А.

Диаграммы «б» и «с» рассчитаны при соединении всех обмоток источника в одну нулевую точку, при этом на рис.1b сопротивление $z = 0$.

Диаграммы «d» и «е» рассчитаны комбинированном потенциальном соединении обмоток источника, при этом $z = \infty$.

Как видно из диаграмм, в НПЧЕМ с общей нулевой точкой наблюдаются режимы опрокидывания инвертора (рис. 2, *c*), что приводит к существенному искажению формы токов нагрузки.

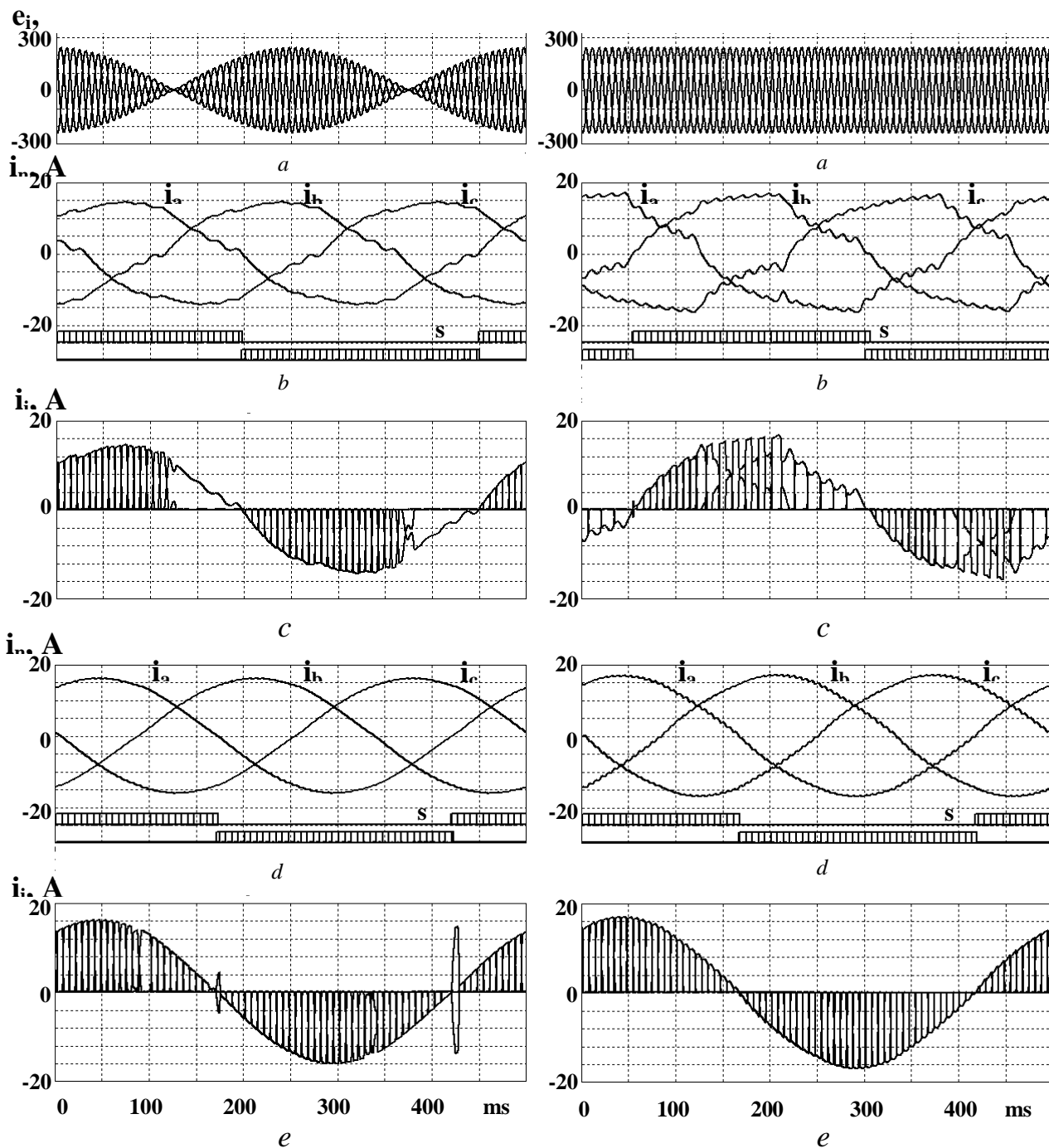


Рис.2. Диаграммы напряжений и токов модели НПЧЕМ

Рис.3. Диаграммы напряжений и токов модели НПЧЕ

НПЧЕМ при комбинированном потенциальном разделении обмоток источника отличаются высоким качеством формы тока нагрузки. При переходе тока нагрузки через ноль возможны кратковременные «всплески» уравнивающих токов источника, не превышающие амплитуду тока нагрузки.

НПЧЕМ обеспечивают высокое качество формы выходного напряжения только при $\cos\varphi_n \geq 0,5$, что является недостатком преобразователя.

Регулируемые электроприводы и стартер-генераторы

В работах [2–4] в качестве высоковольтных регулируемых электроприводов рассматриваются асинхронные вентильные каскады и асинхронизированные машины.

Наибольшее распространение среди асинхронных вентильных каскадов [2] получил каскад Шербиуса (рис. 4, *a*). Обмотка ротора асинхронного двигателя 1 подключена к входу выпрямителя 2, к выходу которого подключен инвертор 3 и реактор 4. Энергия постоянного тока преобразуется инвертором в энергию переменного тока, которая через согласующий трансформатор 5 передается в сеть. Общий недостаток асинхронных вентильных каскадов – большая мощность преобразователя, которая при ограниченном диапазоне регулирования скорости вращения обусловлена условиями пуска машины.

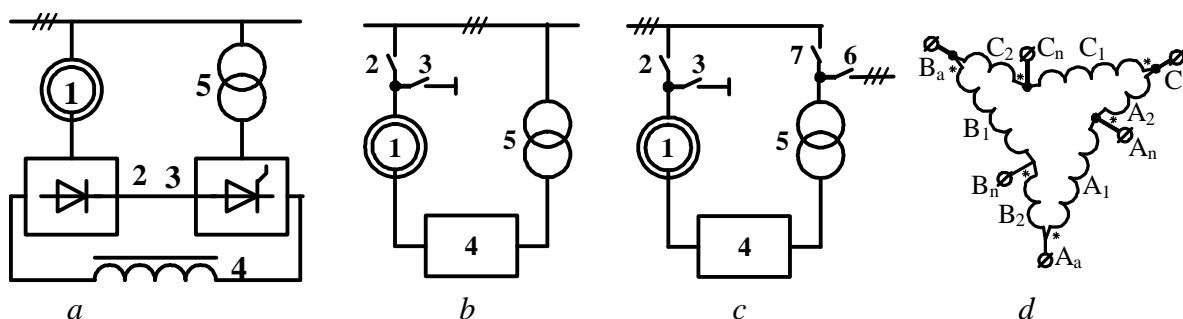


Рис. 4. АСМ с пусковыми устройствами: *a* – каскад Шербиуса; *b* – АСД; *c* – стартер-генератор; *d* – обмотка ротора АСМ с противовключением

В работах [3, 4] рассматривается способ частотного пуска асинхронизированного двигателя (АСД), основанный на идее комбинации схемы асинхронного вентильного каскада и пуска от непосредственного ПЧ с естественной коммутацией (НПЧЕ). Схема АСД изображена на рис. 5, *b*: 1 – АД с фазным ротором; 2, 3 – выключатели; 4 – ПЧ; 5 – согласующий трансформатор. Применен частотный пуск двигателя со стороны ротора при накоротко замкнутых обмотках статора. Диаграмма пуска и диапазон регулирования скорости вращения АСД показаны на рис. 5, *a*. Двигатель запускается до половины синхронной частоты вращения ($n = \frac{n_c}{2}$), при которой обмотка статора переключается на сеть, а поле ротора при неизменной частоте реверсируется. Двигатель втягивается в асинхронизированный режим. Увеличение частоты вращения от $n_c/2$ до n_c осуществляется изменением частоты на выходе НПЧЕ. Принципиально возможно регулирование скорости вращения выше синхронной. Недостатки способа пуска и регулирования частоты вращения: большая мощность ПЧ, примерно равная половине мощности двигателя; низкое качество формы выходного напря-

жения НППЧЕ при частотах, близких к $n_c/2$; сложность процесса реверсирования поля и втягивания в асинхронизированный режим. Поэтому такие АСД не получили широкого распространения.

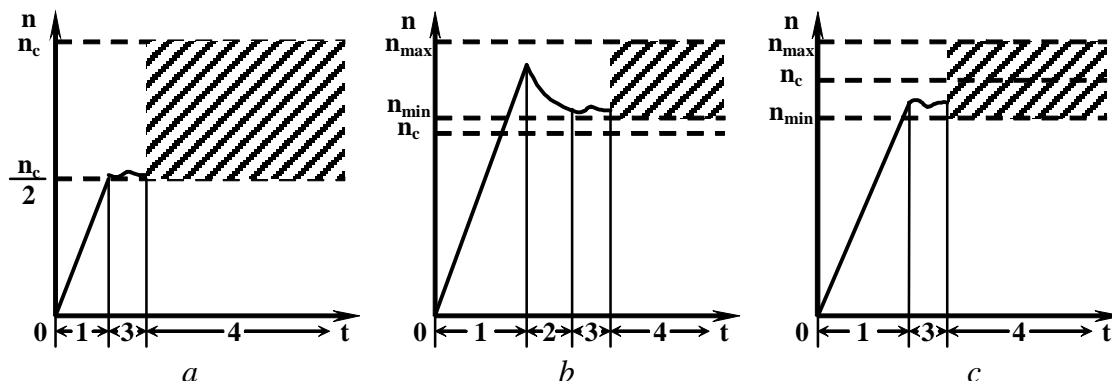


Рис. 5. Диаграммы пуска и диапазон регулирования частоты вращения АСД

В АСД могут быть применены ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока (ПЧИ), отличающиеся высоким качеством формы выходного напряжения. Однако ПЧИ должны передавать активную мощность в двух направлениях – в ротор двигателя и наоборот. Стоимость таких ПЧИ в два раза выше от ПЧИ с однонаправленной передачей активной мощности.

В работах [15, 16] рассмотрен комбинированный способ пуска и регулирования частоты вращения электропривода на базе АСД и ПЧ по схеме рис. 4, *b*.

Ненагруженный двигатель запускается до частоты выше синхронной. Обмотка ротора размыкается, а обмотка статора на выбеге двигателя подключается к сети. Затем проводится синхронизация по цепи ротора при скольжении $s \leq 0$. Частота вращения двигателя в рабочем режиме выше синхронной.

Диаграмма пуска и диапазон регулирования скорости вращения АСД показаны на рис. 5, *b*. Преимущества указанного способа пуска и регулирования частоты вращения агрегата с вентиляторной характеристикой нагрузки: применение ПЧ с одним направлением передачи активной мощности; сравнительно малая мощность низковольтного ПЧ.

На рис. 5, *c* изображена диаграмма пуска и диапазон регулирования частоты вращения АСД с двухзонным (выше и ниже синхронной) регулированием частоты вращения, в котором мощность ПЧ снижается примерно вдвое.

На рис. 4, *c* показана схема асинхронизированного стартер-генератора (АССГ): 1 – асинхронная машина (АМ) с фазным ротором; 2, 3, 6, 7 – выключатели; 4 – ПЧ; 5 – согласующий трансформатор.

АССГ мощностью 250 кВт разработан НТУУ «КПИ» совместно с ВНИ-ИВЭ (г. Донецк) и Первомайским электромашиностроительным заводом для газотурбинных установок. В АССГ применяется частотный пуск асинхронной машины со стороны ротора при накоротко замкнутых обмотках статора. Запуск осуществляется от резервного источника питания при замкнутых выключателях 3 и 6 (выключатели 2 и 7 разомкнуты). Раскрутка турбины осуществляется при частоте $n \approx 0,25n_c$. В режиме генератора обмотка статора подключена к автоно-

мною энергосети (замкнуты выключатели 2 и 7, разомкнуты 3 и 6). Мощность ПЧ составляет $\approx 40\%$ от мощности генератора.

На рис. 4, *d* показана одна из схем бесконтактного пускового устройства (БПУ) АСМ [17, 18]. Обмотка ротора собрана по новой схеме противовключения. Пуск АСМ осуществляется при замкнутых клеммах A_n, B_n, C_n . При достижении определенной скорости частоты вала обмотка ротора двигателя отключается от БПУ и подключается к ПЧ.

Выбор электропривода насосных установок промышленных предприятий

Исследованию режимов работы насосных установок и выбору электропривода уделяется много внимания [1 – 4]. Вместе с тем недостаточно освещен вопрос параллельной работы регулируемых и нерегулируемых электроприводов в сравнительно простых схемах насосных станций отдельных предприятий. Существует мнение, что замена одного (или нескольких) нерегулируемого электропривода регулируемым позволит применить систему автоматического управления (САУ) насосной станции и существенно повлиять на весь технологический процесс.

В работе [19] проводится анализ работы автономной насосной станции с пятью параллельно работающими регулируемыми и нерегулируемыми насосами, а также рекомендации по применению высоковольтных машин двойного питания в качестве регулируемого электропривода. Номинальная мощность одного электропривода $P_N = 630$ кВт, число регулируемых агрегатов $k = 1 - 3$. Диапазон изменения суммарной подачи насосной станции составляет всего 18 – 30 % от суммарной предельной подачи регулируемых насосов. Диапазон изменения суммарной подачи насосной станции может быть увеличен до 100% от суммарной предельной подачи регулируемых насосов при работе регулируемых и нерегулируемых насосов на отдельные трубопроводы.

В каждом конкретном случае требуется тщательный анализ работы насосной станции с параллельно работающими регулируемыми и нерегулируемыми электроприводами. Упрощенный подход к решению проблемы может привести к необоснованным заказам на новое технологическое оборудование и, в конечном счете, замедлить внедрение регулируемого электропривода.

Технико-экономические показатели

В табл. 1 приведено сравнение стоимости регулируемых электроприводов водоснабжения мощностью 630 кВт при $n_N = 750$ об/мин, а в табл. 2 – расчет срока окупаемости инвестиций во внедрение высоковольтного регулируемого электропривода (РЭП) мощностью 800 кВт. Расчеты выполнены сотрудниками фирмы «Transresh» (Германия).

Стоимость известных вариантов РЭП (без ПДВ) взята по технико-коммерческим предложениям иностранных компаний, работающих в России и Украине.

Первоочередные задачи по внедрению энергосберегающих машин

В настоящее время основное внимание следует уделить разработке и изготовлению:

Таблица 1

Сравнение стоимости разных типов РЭП мощностью 630 кВт, $n_N = 750$ об/мин

Технические решения		Стоимость, (EUR)
1	Бесконтактный АСД	80.000
2	АСД с контактными кольцами	100.000
3	РЭП на базе ПЧ на 0,4 кВ, имеющегося АД с короткозамкнутым ротором ($U_1 = 6$ кВ) и двух трансформаторов на входе и выходе ПЧ	114.000
4	РЭП на базе ПЧ ($U_2=0,4$ кВ), сетевого трансформатора и нового АД с короткозамкнутым ротором	117.000
5	РЭП на базе подсинхронного преобразовательного каскада и нового АД с фазным ротором на 6 кВ	120.000
6	РЭП на базе ПЧ с $U_2= 3,3$ кВ и нового АД с короткозамкнутым ротором	160.000
7	РЭП на базе ПЧ с $U_2= 6$ кВ с имеющимся двигателем	220.000

Таблица 2

Расчет срока окупаемости инвестиций

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Значение
1.	Установленная мощность	кВА	800
2.	Средняя мощность	%	60
3.	Цена за кватт-час электроэнергии	EUR /кВт*час	0,025
4.	Продолжительность работы в год	час	7 000
5.	Потребление электроэнергии РЭП по сравнению с нерегулируемыми РЭП (НРЭП)	%	60
6.	Стоимость электроэнергии РЭП	EUR	50 400
7.	Стоимость электроэнергии НРЭП	EUR	84 000
8.	Экономия электроэнергии	EUR	33 600
9.	Стоимость инвестиций в общей сложности	EUR	60 000
	Расходы на инвестиции по РЭП	EUR	70 000
	Возмещение от продажи старого двигателя	EUR	10 000
10.	Срок окупаемости	год	1,79

- высоковольтного регулируемого электропривода (в контактном и бесконтактном исполнении) для насосных и вентиляционных установок с улучшенными пусковыми характеристиками;
- стартер-генераторов взрывозащищенного исполнения для газотурбинных агрегатов газоперекачивающих станций;
- бесконтактных стартер-генераторов автономных источников питания;
- вентильных генераторов ветросиловых установок.

Значительная часть вентиляционных установок Донбасса работает с выходной мощностью около 40 – 60 %. Часть мощности теряется на «задвигках». При замене высоковольтных синхронных двигателей (СД) на бесконтактные асинхронизированные двигатели (БАСД) достигается экономический эффект за счет: уменьшения потребления электроэнергии; улучшения технологического режима; увеличения срока службы агрегатов (уменьшение пусковых токов двигателей). При серийном производстве стоимость нового высоковольтного БАСД меньше общей стоимости высоковольтного статического преобразователя частоты и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором примерно в два раза. Срок окупаемости капиталовложений меньше года.

По данным ГХК «Донуголь», «Макеевуголь», «Красноармейскуголь», «Селидовуголь», «Добропольеуголь», «Ордженикидзеуголь», «Шахтерскантрацит», «Терезантрацит», «Луганскуголь», «Первомайскуголь», «Краснодонуголь» замена 54 электроприводов вентиляторов главного проветривания приведет к снижению электропотребления на 280 тис. кВт·час/сутки, или 102,2 млн. кВт·час/год.

Диапазон регулирования частоты вращения электроприводов насосных и вентиляторных установок в рабочем диапазоне составляет $\approx 15 - 20$ % от номинальной частоты. Особенно перспективно внедрение АСД. Простые бесконтактные устройства пуска обуславливают их широкое внедрение.

Внедрение АСД целесообразно в системах водоснабжения городов, крупных предприятий, нагнетателей ТЭЦ и других системах.

Стартер-генераторы газотурбинных агрегатов газоперекачивающих станций целесообразно разрабатывать на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с переключением обмотки статора. Технические решения по стартер-генераторным установкам одобрены на технических совещаниях ГП «Заря-Машпроект», ОАО «Мотор-Сич», ЗМКБ «ПРОГРЕСС», ОАО «ВНИПИ-ТРАНСГАЗ»,

Одной из задач автономной энергетики является переход с жидкого топлива на газ, так как стоимость газа в два-три раза дешевле солярки. Решение задачи затруднено сложностью стабилизации частоты вращения газогенератора. Одно из решений указанной задачи – внедрение БАСМ.

В ветроэнергетических установках целесообразно применение новых схем преобразования с применением многофазных вентильных генераторов с комбинированными схемами преобразования.

Заключение

1. Разработаны новые типы вращающихся преобразователей БАСМ. Показана возможность создания БАСМ на базе электромашинно-вентильных непосредственных преобразователей частоты с естественной коммутацией (НПЧЕ), которые намного проще и дешевле статических преобразователей. Разработаны бесконтактные пусковые устройства АСМ противовключением обмоток ротора, которые отличаются простотой конструкции и малой стоимостью, что обуславливает возможность широкого внедрения АСМ и БАСМ. Широкое внедрение

АСМ позволит обеспечить оптимальные энергосберегающие технологические режимы, а также исключить искажения в линиях, обычно вызываемые полупроводниковыми преобразователями.

2. Энергосберегающие машины отличаются новизной, уникальностью разработок, конкурентоспособностью. При патентной защите разработок и быстром освоении серийного выпуска новые машины двойного питания способны лидировать на мировом рынке.

3. Учитывая важность проблемы создания бесконтактных асинхронизированных машин (регулируемых электроприводов, автономных генераторных установок, стартер-генераторов), целесообразно ускорить изготовление опытных образцов асинхронизированных машин с бесконтактными пусковыми устройствами.

Список литературы

1. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. М.: «Энергия», 1979. – 200 с.
2. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: «Энергоатомиздат», 1984. – 192 с.
3. Шенфер К.И. Асинхронные машины. М.-Л. Госиздат., 1929 г., 457с.
4. Брускин Д.Э. Генераторы, возбуждаемые переменным током. М., «Высшая школа», 1974, 128 с.
5. Галиновский А. М. Электромашинновентильные модулированные преобразователи в бесконтактных генераторах стабильной частоты. Технічна електродінаміка, Спец. вип. 2, т.2, Силовая электроника и энергоэффективность, Киев, Ин-т электродинамики НАН Украины, 1998, с.61-65.
6. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Цюрила М.А., Ленская Е.А., Исследование моделей трехфазно-однофазных и трехфазно-трехфазных возбудителей бесконтактных машин двойного питания. Гидроэнергетика Украины, 2006, №4, с. 36-43.
7. Галиновский А.М., Дубчак Е.М. Преобразователь частоты. А.с. СССР №1206922. Оpubл. в БИ, №3, 1986.
8. Галиновский А.М., Дубчак Е.М. Способ комбинированного управления тиристорным преобразователем частоты. А.с. СССР №1339821. Оpubл. в БИ, №35, 1987.
9. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Працюк В.В. Способ управления тиристорным преобразователем частоты. А.с. СССР №1104639. Оpubл. в БИ, №27, 1984.
10. Патент України: 75192 С2, Н02Р 27/04. Комбінований спосіб пуску електричної машини змінного струму / О.М.Галіновський, О.О.Ленська. № 2004031885; Заявл. 15.03.2004; Оpubл. 15.03.2006. Бюл. № 3. – 8 с.
11. Галиновский А.М., Коваленко И.Е., Ленская Е.А. Стартерные режимы машин двойного питания. Проблеми автоматизованого електроприводу (теорія і практика). Тематичний випуск науково-технічного журналу «Електроінформ», Львів, 2009, с. 331-333.
12. Патент України: 80882, Н02К 3/28, Н02К 17/14, Н02Р 27/04. Обмотка з перемиканням ефективного числа витків фаз електричної машини змінного струму / О.М.Галіновський, О.О.Ленська. № а 2005 11174; Заявл. 25.11.2005; Оpubл. 12,11,2007. Бюл. № 18.
13. Галиновский А.М., Анпилогов Н.Г., Ленская Е.А. Пуск бесконтактного асинхронизированного двигателя по методу противовключения обмоток ротора. Сб. научных трудов ДонГТУ, Алчевск, 2006, с. 260-270 .
14. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Е.А. Ленская Электромашинно-вентильные преобразователи машин двойного питания (часть 1)/ Наук-техн. збірник «Гірнична електромеханіка та автоматика»./ – Д.: 2010, – Вип. 84. – С.218-227.

15. Галиновский А.М., Дубчак Е.М.,Е.А. Ленская Электромашинно-вентильные преобразователи машин двойного питания (часть 2), /Наук-техн. збірник «Гірничя електромеханіка та автоматика»// – Д.: 2011, – Вип. 85. – С. 159-169.

Рекомендовано до друку: доцентом Ципленковим Д.В.