

Автономная станция электроснабжения на основе асинхронного генератора с КЗ ротором и преобразователя частоты пониженной мощности

Виноградов А.Б.

«НТЦ Электропривода «Вектор»

г. Иваново, Российская Федерация

Аннотация — Рассмотрено построение автономной станции электроснабжения на основе асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором и инвертора напряжения пониженной мощности, обеспечивающей высокое качество выходного напряжения при различных нагрузках, включая существенно несимметричные и нелинейные, при относительно невысокой цене и повышенной надежности.

Ключевые слова — автономная станция электроснабжения; асинхронный генератор; инвертор напряжения; синус-фильтр; ДВС.

I. ВВЕДЕНИЕ

При создании современных автономных источников трехфазного напряжения 380/220 В, 50 Гц средней мощности (от единиц до сотен кВт) с первичным приводом от двигателя внутреннего сгорания (ДВС), к которым предъявляются повышенные требования к стабильности выходного напряжения при различных видах нагрузки, обычно рассматриваются следующие возможные варианты построения системы [1-5]:

- синхронный генератор с обмоткой возбуждения (СГОВ), управляемый от полупроводниковой системы возбуждения (СВ);

- асинхронный генератор с фазным ротором (АГФР), управляемый со стороны роторной цепи от преобразователя частоты (ПЧ) пониженной мощности;

- синхронный генератор (СГ) – неуправляемый выпрямитель (НВ) звено постоянного напряжения (ЗПТ) – автономный – инвертор напряжения (АИН) – синус-фильтр (СФ);

- асинхронный либо синхронный генератор переменного тока (ГПТ) – активный выпрямитель (АВ) – ЗПТ – АИН – СФ;

- ГПТ – преобразователь частоты с непосредственной связью (НПЧ) – СФ.

II. ПРЕДЛАГАЕМОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ И ЕГО СРАВНЕНИЕ С ИЗВЕСТНЫМИ

Одним из перспективных технических исполнений АСЭ является система на основе асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором (АГКЗ), АИН пониженной мощности и синус-фильтра: «АГКЗ – АИН – СФ». Ее особенностями являются использование в качестве генератора

надежной, высокотехнологичной и недорогой электрической машины, а в качестве преобразователя – инвертора пониженной мощности, который обеспечивает высокие показатели точности выходного напряжения АСЭ, компенсацию влияния нейтральной составляющей токов нагрузки на показатели несинусоидальности и несимметрии.

Выбор системы автономного электропитания для каждого конкретного применения определяется набором показателей, среди которых отметим: стоимость, надежность, массо-габариты, показатели статической и динамической точности выходного напряжения при различных видах нагрузки, включая несимметричную и нелинейную, особенностями первичного двигателя, в частности, диапазоне регулирования скорости ДВС в режиме стабилизации выходного напряжения и частоты. В таблице 1 сведены отличительные особенности представленных выше вариантов реализации АСЭ, напрямую связанные с их массо-габаритами, стоимостью, качеством выходного напряжения при различных видах нагрузки и возможностью независимого изменения скорости ДВС.

При условиях предъявления к АСЭ повышенных требований к качеству выходного напряжения и ее работы в условиях существенно несимметричных и нелинейных нагрузок, следует выбирать системы, имеющие в своем арсенале функцию активной компенсации влияния несимметрии нагрузки. К повышенным показателям качества выходного напряжения будем относить такие, при которых отклонения напряжений, их колебания, коэффициенты несимметрии и искажения синусоидальности [6] не превышают 1..2% во всем диапазоне изменения нагрузки. Отклонение частоты не должно превышать 0.2 Гц. Наилучшие динамические характеристики АСЭ с отработкой динамических ошибок регулирования выходного напряжения, вызванных ступенчатым изменением нагрузки, в течение единиц миллисекунд можно получить только в системах с ПЧ полной мощности. Если в режиме стабилизации выходного напряжения АСЭ имеется необходимость в широких пределах изменять скорость ДВС, то следует выбирать структуры «ГПТ – АВ – ЗПТ – АИН – СФ» или «ГПТ – НПЧ – СФ», при этом преимущество по стоимости и надежности при равной номинальной мощности нагрузки имеет использование АГКЗ в качестве генератора и подсистемы «АВ – ЗПТ – АИН» в качестве преобразователя

ля частоты. Построение такого вариант АСЭ рассмотрено, в частности, в [2] применительно к колесному трактору

300 л.с. с электромеханической трансмиссией.

Таблица 1. Особенности вариантов реализации АСЭ

№	Наименование отличительной особенности	Тип силовой части АСЭ				
		СГОВ – СВ	АГФР – ПЧ	ГПТ–АВ–ЗПТ–АИН – СФ	ГПТ – НПЧ – СФ	АГКЗ – АИН – СФ
1	Отсутствие скользящего контакта (надежность)	–	–	+	+	+
2	Преобразователь пониженной мощности (стоимость, массогабариты)	+	+	–	–	+
3	Активная компенсация влияния несимметрии нагрузки (качество выходного напряжения)	–	–	+	+	+
4	Регулирование частоты системой управления генератора (независимое изменение скорости ДВС)	–	+	+	+	–

В условиях, когда независимое от частоты выходного напряжения АСЭ изменение скорости ДВС не требуется и предъявляются повышенные требования к надежности, качеству выходного напряжения и стоимости, преимущество имеет система «АГКЗ – АИН – СФ» с инвертором пониженной мощности, схема которой представлена на рис. 1.

III. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ АСЭ

В состав АСЭ входят ДВС, АГКЗ, 3-фазный мостовой инвертор напряжения на интеллектуальных IGBT модулях, 3-фазный синус-фильтр, состоящий из дросселей L_f и двух блоков конденсаторов (C_{f1} , C_{f2}), блок датчиков, включающий датчики фазных токов АИН, токов синус-фильтра и выходных напряжений АСЭ (напряжений нагрузки), звено постоянного тока, включающее соединенные последовательно емкости C_{d1} , C_{d2} , средняя точка которых объединена с нейтральным проводом электроприемников (нагрузки) и датчики напряжений на этих емкостях. Управление осуществляется от системы управления СУ АСЭ.

ДВС выполняет роль первичного источника механической энергии и по заданию от СУ АСЭ осуществляет регулирование скорости вращения генератора. В зависимости от того, где располагается регулятор скорости ДВС – в СУ ДВС или в СУ АСЭ, на вход ДВС поступает либо задание по моменту (M^*), либо задание по скорости ω^* . АГКЗ реализует электромеханическое преобразование энергии, формируя на своем выходе систему трехфазных напряжений. Между АГКЗ и нагрузкой циркулирует основной поток энергии, при этом АГКЗ не проводит нейтральный ток и может возбуждаться либо за счет своего остаточного намагничивания, либо за счет дополнительного источника низкого напряжения (аккумуляторной батареи (АБ), подключаемой к шинам ЗПТ через отсекающий диод – на рис. 1 не показаны).

Синус-фильтр выполняет задачу фильтрации коммутационной составляющей процессов на частоте ШИМ АИН, находящейся, как правило в диапазоне 4..10кГц. При этом, через C_{f1} протекает дифференциальная, а через C_{f2} – как дифференциальная, так и нейтральная составляющие токов синус-фильтра, что позволяет индивидуально подходить к

фильтрации этих составляющих в напряжениях нагрузки. Дополнительными функциями емкостей синус-фильтра является обеспечение режима самовозбуждения АГКЗ и баланса реактивной мощности системы. Совместно с емкостями ЗПТ они выполняют роль источников реактивной мощности, причем потоки реактивной энергии между ними могут распределяться в разных пропорциях в зависимости от характера и величины реактивной составляющей нагрузки. Датчики токов и напряжений измеряют и доставляют в систему управления всю первичную информацию, необходимую для функционирования АСЭ.

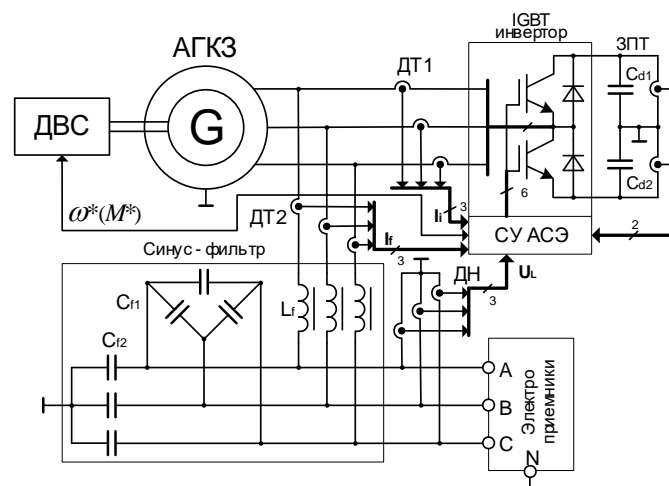


Рис. 1. Структурная схема АСЭ

СУ АСЭ выполняет функции управления процессами, протекающими в АСЭ в режимах пуска, стабилизации выходного напряжения, развития аварийных ситуаций, вызываемых, в частности, короткими замыканиями в нагрузке, перегрузками, перенапряжениями, неисправностями оборудования АСЭ. Один из возможных вариантов построения СУ АСЭ представлен на рис. 2. Система управления реализована в ортогональной системе координат (d, q, o), оси d, q которой расположены в плоскости поперечного сечения АГКЗ, ось « d » ориентирована по вектору потокоцепления ротора, а ось « o » по валу АГКЗ. На оси d и q проецируются дифференциальные (симметричные) составляющие процессов, а на ось « o » – нейтральные

(несимметричные). Регулирование дифференциальных составляющих процессов системы осуществляется посредством двухканальной системы подчиненного регулирования с внутренними контурами регулирования реактивного (I_{sd}) и активного (I_{sq}) тока статора и внешними контурами регулирования напряжения на нагрузке (U_L) и напряжения ЗПТ (U_{DC}). Блок компенсации перекрестных связей (БКПС) выполняет схему линеаризации контуров регулирования составляющих тока путем компенсации влияния нелинейных перекрестных связей, присущих математической модели асинхронной машины [7].

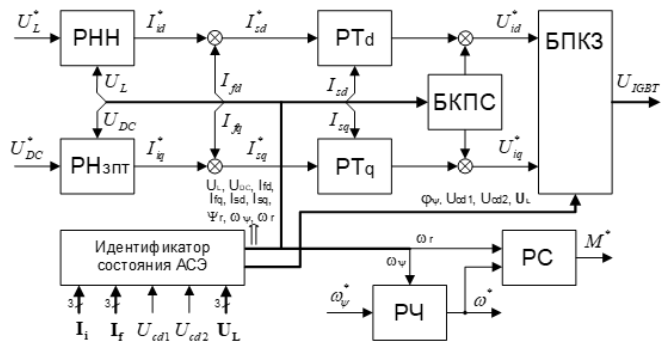


Рис. 2. Структурная схема системы управления АСЭ

Стабилизация частоты выходного напряжения АСЭ на желаемом уровне 50Гц выполняется ПИ-регулятором частоты (РЧ) с выхода которого сигнал задания скорости ДВС подается на вход регулятора скорости (РС). Все переменные, необходимые для реализации процесса управления АСЭ вычисляются в идентификаторе состояния системы, построенном на основе известных уравнений асинхронной машины и координатных преобразований из неподвижной системы координат А,В,С в синхронную систему координат (d,q,о).

Блок преобразований, компенсации и защит (БПКЗ) выполняет следующие функции:

- обратное преобразование заданных напряжений АИН из вращающейся в естественную систему координат;
- компенсация влияния несимметрии нагрузки на качество выходного напряжения АСЭ;
- компенсация временного запаздывания в системах управления и идентификации;
- ограничение компонент вектора заданного напряжения на допустимом уровне;
- программная защита силовых ключей от аварийных режимов работы АСЭ;
- алгоритмическая компенсация дисбаланса напряжений на емкостях ЗПТ;
- формирование ШИМ ключей АИН с учетом компенсации влияния «мертвого времени».

Вопросы координатных преобразований, компенсации временных запаздываний, ограничения компонент вектора заданного напряжения, формирования ШИМ рассмотрены в [7], в частности, применительно к электроприводам серии ЭПВ.

Применение в АСЭ функции компенсации влияния несимметрии нагрузки связана с тем, что АГКЗ формирует на своем выходе симметричную 3-фазную систему ЭДС,

которая в условиях несимметрии нагрузки и существенных значений выходного импеданса АСЭ относительно импеданса нагрузки (их отношение обычно составляет 5..15%) приводит к отклонениям величины и искажениям формы выходного напряжения. Задача компенсации этих отклонений в общем виде ставится следующим образом: СУ АСЭ должна таким образом скорректировать выходные напряжения АИН, чтобы это привело к желаемому качеству напряжения на нагрузке при заданном уровне (коэффициенте) ее несимметрии. В идеальном случае компенсации в выходном напряжении АСЭ должны быть полностью подавлены составляющие обратной и нулевой последовательности фаз, вызванные несимметрией нагрузки. В частном случае задача компенсации отклонений может ставиться, например, как задача выравнивания действующих значений фазных напряжений на нагрузке.

Коэффициент несимметрии нагрузки будем определять, как отношение разницы мощностей максимально и минимально нагруженных фаз к номинальной мощности одной фазы нагрузки: $K_{nn} = (S_{max} - S_{min}) / S_{nom}$. При допущении о постоянстве выходных фазных напряжений АСЭ это выражение можно приблизительно записать относительно токов нагрузки $K_{nn} \approx (I_{max} - I_{min}) / I_{nom}$, а в частном случае чисто активной линейной нагрузки удобно выразить через сопротивление:

$K_{nn} \approx R_{nom} (R_{max} - R_{min}) / (R_{max} R_{min})$. Таким образом, коэффициент K_{nn} принимает значение «1» при номинальном значении нагрузки в одной из фаз и полном ее отсутствии в любой другой и значение «0» при равенстве нагрузок по всем фазам.

Решение задачи компенсации несимметрии нагрузки может выполняться в рамках поисковых и беспоисковых алгоритмов как в синхронной, так и в неподвижной системе координат. При этом, в общем случае корректировке должны подвергаться все три компонента вектора выходного напряжения АИН. В качестве примера приведем алгоритм поисковой компенсации несимметрии нагрузки, реализованный в неподвижной системе координат путем выравнивания действующих значений фазных напряжений:

- на временном интервале кратном периоду изменения выходного напряжения АСЭ выполняется оценка его действующих фазных значений;

- определяется фаза с максимальным отклонением напряжения от номинального (заданного) и по его значению принимается решение о необходимости коррекции;

- выполняется расчет коэффициента коррекции напряжения фазы с максимальным отклонением: $K_{кор} \approx U_{nom} / (U_{nom} + K_{\phi} (U_{rms} - U_{nom}))$, где U_{rms} - действующее напряжение фазы с максимальным отклонением от номинального значения; K_{ϕ} - коэффициент форсировки, задающий темп итерационной сходимости итерационного алгоритма коррекции;

- при выполнении условия нормирования (все коэффициенты коррекции фаз либо больше, либо меньше единицы) выполняется нормирование коэффициентов коррек-

ции, путем их деления на наиболее близкий к единице коэффициент;

- выполняется коррекция заданных в системе координат A,B,C значений выходного напряжения АИН путем их умножения на корректирующие коэффициенты;
- после временной выдержки на затухание переходной составляющей процессов (1..2 периода основной гармоники) итерационная процедура коррекции повторяется.

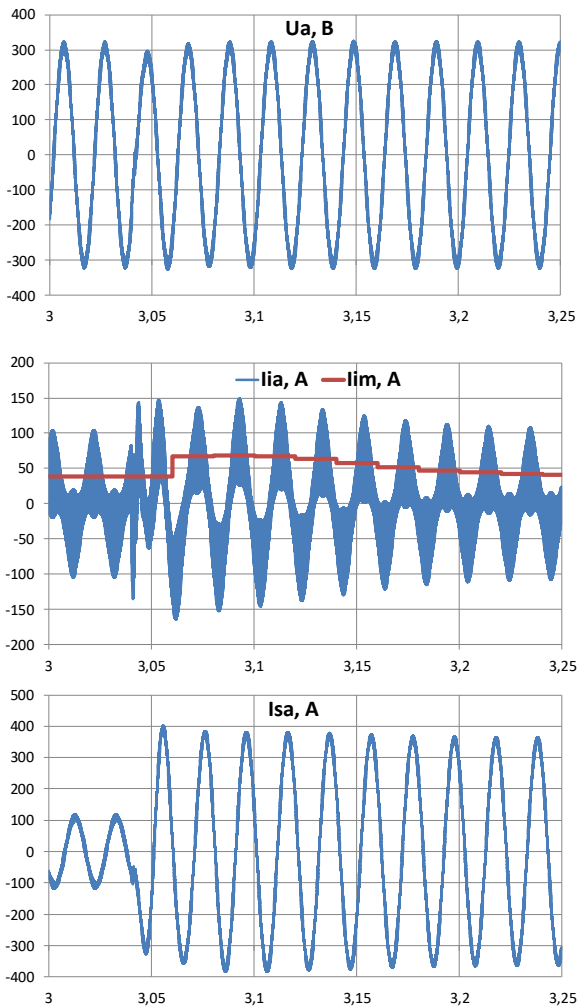


Рис. 3. Временные диаграммы работы АСЭ в режиме ступенчатого набора номинальной симметричной нагрузки

Реализация программных защит от аварийных режимов для преобразователей пониженной мощности несколько отличается от аналогичных защит в преобразователях полной мощности. Это определяется тем, что потоки мощности основного силового канала АСЭ не замыкаются через АИН, а циркулируют между АГКЗ, синус-фильтром и нагрузкой. При правильно подобранных параметрах силового канала через АИН должна циркулировать только часть реактивной энергии возбуждения АГКЗ и реактивной мощности нагрузки (другая ее часть циркулирует между АГКЗ, нагрузкой и синус-фильтром), а также нейтральная составляющая токов нагрузки и энергия компенсации влияния несимметрии нагрузки. В связи с этим выбор номинальной мощности АИН зависит от степени несимметрии нагрузки и чем выше коэффициент несим-

метрии K_{nn} , тем больше должна быть мощность АИН относительно номинальной мощности нагрузки. В частности, при $K_{nn} = 0$ (полностью симметричная нагрузка) мощность АИН может не превышать 20% от номинальной мощности АГКЗ и нагрузки, а при $K_{nn} = 1$ она может достигать 50..60%.

При работе АСЭ с инвертором пониженной мощности могут возникать режимы, при которых АИН приходится защищать от кратковременных воздействий повышенных токов и напряжений, возникающих, например, в переходных режимах ступенчатого изменения больших нагрузок по фазам, при этом действия внутренних ограничений регуляторов может оказаться недостаточным вследствие возможного возникновения кратковременной неуправляемости, когда энергии, запасенной в ЗПТ АИН, просто не хватает для управления более энергетически мощными процессами. В этом случае самым эффективным способом предотвращения неблагоприятного развития аварийной ситуации является одновременная кратковременная блокировка всех ключей инвертора на время возвращения системы в управляемую область. Причем, на интервале этой блокировки основной энергетический канал и идентификатор состояния системы продолжает работать, а система управления анализировать выполнение условий выхода из блокировки, что обеспечивает безударное возвращение системы в свое полноценное рабочее состояние (с разблокированным АИН).

В результате протекания нейтральных токов нагрузки через среднюю точку емкостей ЗПТ потенциал этой точки (он же потенциал нейтрали нагрузки) оказывается плавающим относительно потенциалов положительной и отрицательной шин ЗПТ. Он зависит как от величины и знака нейтрального тока, так и от вида ШИМ (от закона коммутации) [8]. При этом существуют законы коммутации, автоматически выравнивающие потенциал средней точки ЗПТ, например, ШИМ, формируемый двумя тройками векторов напряжения, образующих треугольный сектор векторной диаграммы выходных напряжений АИН, с чередующимися последовательностями включения значащих и нулевых векторов. Есть также законы коммутации, которые способны смещать этот потенциал в нужном направлении и выравнивать его за счет перехода от одного закона коммутации к другому. В случае, если выбирается второй способ выравнивания потенциала нейтрали, то на БПКЗ дополнительно возлагается функция компенсации дисбаланса напряжений на емкостях ЗПТ, которая напрямую связана с выравниванием потенциала нейтрали.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование АСЭ выполнено в среде Delphi. При моделировании учитывались алгоритмы переключения ключей инвертора, эффекты насыщения и потери в стали двигателя [7, 9]. Учет динамики ДВС выполнялся с помощью инерционного звена 1-го порядка на основе данных натурального эксперимента. В качестве генератора использовалась асинхронная машина с короткозамкнутым ротором со следующими параметрами: $P_{ном}=150кВт$; $U_{ном}=230В$; $I_{ном}=270А$; $f_{ном}=50Гц$; $КПД=90\%$; $Cos(\varphi)=0.89$;

$L\sigma_s=0.00022\text{Гн}$; $L\sigma_r=0.00018\text{Гн}$; $Lm0:=0.0138\text{Гн}$;
 $Lmn=0.0077\text{Гн}$; $R_s_{20}=0.0167\text{Ом}$; $R_r_{20}=0.0098\text{Ом}$; $Z_p=2$;
 $J=3\text{кгм}^2$, где $L\sigma_s$, $L\sigma_r$, $Lm0$, Lmn – индуктивности рассеяния статора, ротора, взаимная в режиме ХХ и номинальном.

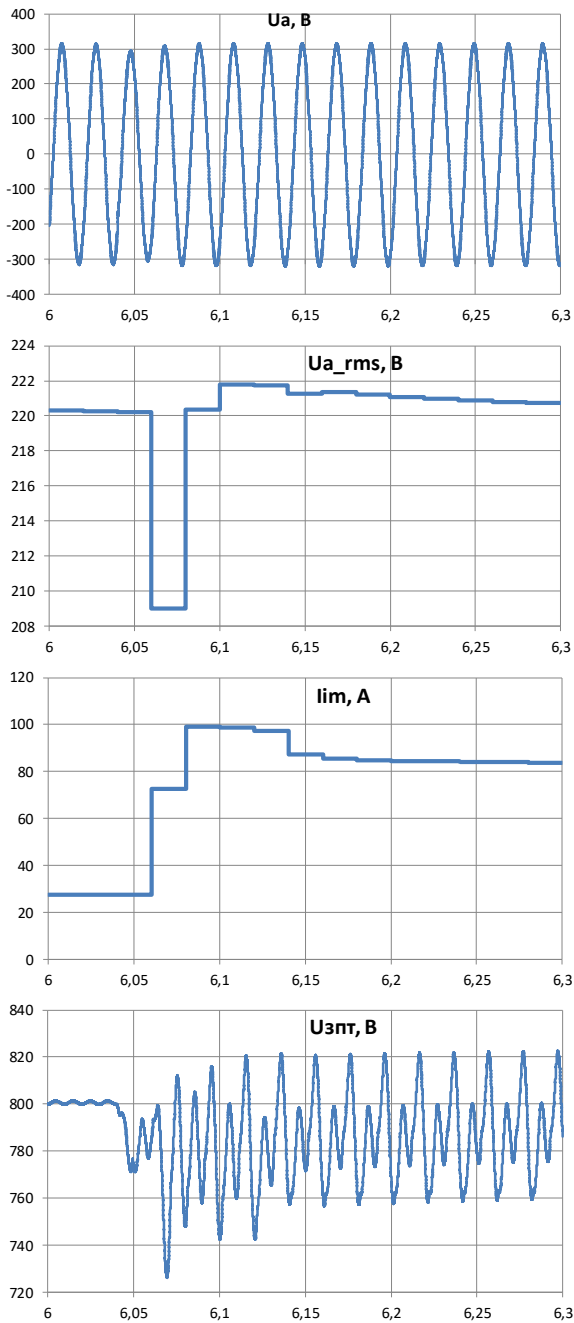


Рис. 4. Временные диаграммы работы АСЭ при ступенчатом введении асимметричной нагрузки

На рис. 3 представлены временные диаграммы напряжения нагрузки (U_a), тока инвертора (I_{ia}), тока статора генератора (I_{sa}), относящихся к фазе «А» АСЭ, и наибольшего из действующих значений фазных токов инвертора (lim) в режиме ступенчатого наброса номинальной активной симметричной нагрузки ($R_{na}=R_{nb}=R_{nc}=1\text{ Ом}$) из слабонагруженного состояния ($R_{na}=R_{nb}=R_{nc}=10\text{ Ом}$). Из

диаграмм видно, что переходный процесс проходит с незначительным кратковременным (в пределах одного периода) провалом напряжения. Максимальный действующий ток инвертора не превышает 40А (или 18% от номинального выходного тока АСЭ – $I_{acэ_ном}=220\text{А}$) в установившемся режиме и 67А (или 30% от $I_{acэ_ном}$) в кратковременном переходном режиме. Вычисление действующих значений переменных производилось с дискретностью в один период основной гармоники (0.02с).

На рис. 4 изображены временные диаграммы мгновенного и действующего (U_a_{rms}) напряжения нагрузки фазы А, наибольшего из действующих значений фазных токов инвертора, напряжения ЗПТ ($U_{зпт}$) при ступенчатом приложении несимметричной активной нагрузки $R_{na}=1\text{ Ом}$; $R_{nb}=2\text{ Ом}$; $R_{nc}=2\text{ Ом}$ из исходного состояния 50%-й симметричной загруженности ($R_{na}=R_{nb}=R_{nc}=2\text{ Ом}$) в момент времени $t=6.04\text{ с}$. Процессы получены при активированной поисковой компенсации несимметрии нагрузки. Система в течении одного периода отрабатывает небольшое динамическое отклонение напряжения и в поисковом режиме стабилизирует его уровень на заданном значении (220В) с допустимой погрешностью 1 В. Аналогичные процессы протекают во всех трех фазах. Несимметрия нагрузки приводит к некоторому возрастанию действующего значения максимально нагруженной фазы инвертора: до 83А (38% от $I_{acэ_ном}$) в установившемся режиме и до 99А (45%) в переходном, а также к допустимым по величине пульсациям напряжения ЗПТ, вызванным протеканием нейтрального тока через его емкости. Уровень пульсаций зависит от коэффициента несимметрии (в данном эксперименте он равен 0.5) и величины емкости ЗПТ.

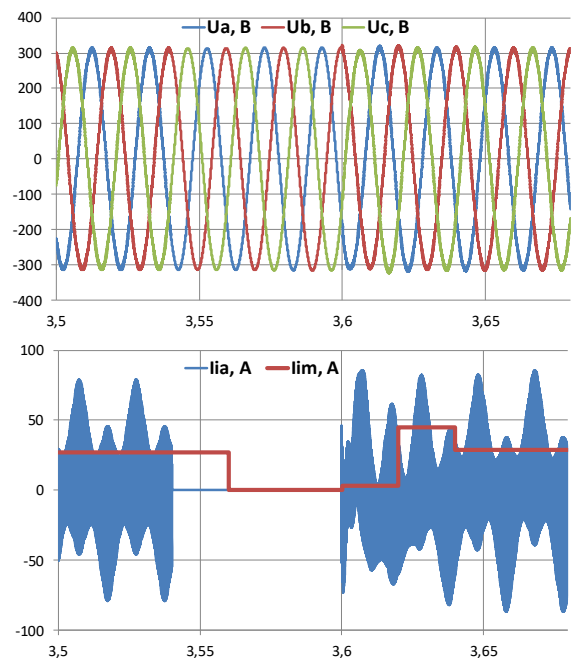


Рис. 5. Временные диаграммы работы АСЭ с симметричной нагрузкой 50% от номинальной при кратковременной (3.54...3.6с) блокаде АИН

На рис. 5 показаны временные диаграммы напряжений на нагрузке, мгновенного и действующего токов инвертора

при симметричной активной нагрузке $R_{на} = R_{нб} = R_{нс} = 2 \text{ Ом}$ в режиме временной блокировки (принудительного запаривания) силовых ключей инвертора. Процессы приведены в согласованном режиме работы АСЭ, т.е. когда отключение и подключение инвертора не приводит к сколь-нибудь заметным изменениям напряжений и токов в нагрузке и генераторе. В общем случае напряжения на нагрузке в режиме заблокированного инвертора зависят от величины и характера нагрузки, параметров генератора и синус-фильтра. В частности, при снижении нагрузки напряжение растет, а при увеличении – снижается. В этом случае инвертор стабилизирует выходные напряжения на заданном уровне, исправляя их несимметрию, вызванную протеканиями токов нулевой и обратной последовательностей фаз. Блокировка инвертора используется преимущественно для предотвращения аварийных режимов, в частности защиты от недопустимых токовых нагрузок и изменений напряжения ЗПТ.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен вариант построения автономной станции электроснабжения на основе асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором и инвертора напряжения пониженной мощности, обеспечивающий высокое качество выходного напряжения при различных нагрузках, включая существенно несимметричные и нелинейные. Он характеризуется пониженной стоимостью и повышенной надежностью относительно аналогичных технических решений, использующих в своем составе полномасштабные преобразователи частоты либо электрические машины со скользящими контактами (синхронные или асинхронные с фазным ротором), а также возможностью функционирования в режиме блокировки инвертора с ограничением по точности выходного напряжения и диапазону нагрузок.

Номинальная мощность инвертора АСЭ, предназначенного для питания активной симметричной нагрузки, не превышает 20% от номинальной мощности нагрузки и генератора. Для питания нагрузки с коэффициентом несимметрии 0.5 номинальная мощность инвертора должна быть увеличена до 40% от номинальной мощности нагрузки.

Система управления АСЭ обеспечивает стабилизацию фазных напряжений нагрузки и среднего значения напряжения ЗПТ, ограничение тока АИН на желаемом уровне, защиту от сверхтоков и недопустимых изменений напряжения, эффективную коррекцию несимметрии и нелинейных искажений со стороны нагрузки. Опционально подключаемый алгоритм компенсации несимметрии нагрузки в поисковом режиме работы обеспечивает минимизацию несимметрии выходных напряжений с точностью 0.5% в течении нескольких периодов основной гармоники с предельным кратковременным динамическим отклонением не более 10%. При отключенной коррекции несимметрии суммарная статическая ошибка, учитывающая несимметрию и несинусоидальные искажения фазных напряжений, не превышает 3% во всем диапазоне изменения линейных нагрузок при изменении коэффициента несимметрии нагрузки от 0 до 1.

Рассмотренная система может быть рекомендована для применения в качестве относительно недорогого и надежного 3-фазного источника с повышенным качеством выходного напряжения, может применяться для питания удаленных жилых и промышленных объектов (как стационарных, так и мобильных), использоваться в качестве источника резервного питания. Наибольшая экономия может быть получена при опциональном встраивании АСЭ в уже существующую систему тягового электропривода с асинхронным генератором и 3-фазным активным выпрямителем. В этом случае к уже существующим элементам системы добавляется только синус-фильтр и дополнительные датчики тока и напряжения. Примером такого применения может являться автономная станция электроснабжения на базе тракторов с электромеханической трансмиссией [2, 10, 11].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] Григоращ О.В. Системы автономного электроснабжения: монография / О.В. Григоращ, Н.И. Богатырев, Н.Н. Курзин; под ред. Н.И. Богатырева. – Краснодар: БИИ, 2001, 333 с.
- [2] Виноградов, А.Б. Управление станцией автономного электроснабжения в составе транспортного средства / А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов, С.Н. Флоренцев, А.А. Коротков // *Электричество*. – 2009. – №9. – С. 49–55.
- [3] Григоращ О.В. Статические преобразователи и стабилизаторы автономных систем электроснабжения: монография / О. В. Григоращ, Ю. П. Степура, А. Е. Усков. – Краснодар, 2011. – 188с.
- [4] Хватов О.С. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения: монография / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев, И.С. Поляков; Нижегород. гос. техн. у-т им. Р.Е. Алексеева, 2016. – 172 с
- [5] Хватов О.С. Электротехнические генераторные комплексы переменной частоты вращения на основе машины двойного питания: монография / О.С. Хватов. – Н.Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2015. – 276 с.
- [6] ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
- [7] Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2008. – 318 с.
- [8] Виноградов, А.Б. Анализ энергетических показателей и методика выбора оптимальных алгоритмов широтно-импульсной модуляции для управления трехфазным инвертором напряжения / А.Б. Виноградов, Д.Б.Изосимов // *Электричество*. – 2009. – №5. – С. 37–41.
- [9] Виноградов, А.Б. Оптимизация КПД системы векторного управления асинхронным тяговым электроприводом с идентификатором параметров / Виноградов А.Б., Изосимов Д.Б., Флоренцев С.Н., Глебов Н.А. // *Электротехника*. – 2010. - №12.- с. 12-19.
- [10] Флоренцев С.Н. Комплексный подход проектирования тягового электрооборудования для электромеханических трансмиссий / С.Н. Флоренцев, Д.Б. Изосимов // *Материалы 77-й междунар. научн-техн. конф. «Автомобиль и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров»*, 27-28 марта 2012 г. МГТУ «МАМИ», Секция 3, с.82-96.
- [11] Виноградов, А.Б. Особенности реализации тягового электрооборудования гусеничного промышленного трактора мощностью 160 л.с. / А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов, В.Л. Чистосердов // *Электротехника*. – 2017. - №5. – с. 14-18.

Autonomous power supply station based on squirrel-cage induction generator and a low-power frequency converter

Anatoliy B. Vinogradov
Electrical Drive Research and
Technical Center “Vector”
Ivanovo, Russia
vinogr_ab@mail.ru

Abstract — The paper considers the construction of an autonomous power supply station based on an asynchronous generator with a short-circuited rotor and a low-power voltage inverter that provides high-quality output voltage under various loads, including significantly non-symmetrical and nonlinear ones, at a relatively low price and increased reliability.

Keywords—autonomous power supply station, asynchronous generator, voltage inverter, sine filter, internal combustion engine.