

УДК 621.313 + 06

Энергетический комплекс на базе высокооборотной электрической машины

М. С. Подберезная¹, П. Г. Колпахчян²

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Подберезная М. С., Колпахчян П. Г. Энергетический комплекс на базе высокооборотной электрической машины // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 114–132. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-114-132

Аннотация

Цель: Целью настоящего исследования является рассмотрение вопросов проектирования высокооборотных электрогенераторов, используемых совместно с газовыми микротурбинами. **Методы:** Для решения поставленных задач были использованы теория электрических машин; метод конечных элементов; теория автоматического управления; методы математического анализа, математического и схемотехнического моделирования; численное моделирование на ПЭВМ с использованием программных комплексов FEMM и Matlab Simulink. Исследования проводились на экспериментальных образцах высокооборотного электрогенератора и подтверждены результатами испытаний в составе энергетического комплекса на основе газовой микротурбины в 2019 г. **Результаты:** Разработан комплекс научно обоснованных технических решений по проектированию высокооборотного электрогенератора с системой управления энергетического комплекса на базе микрогазовой турбины. В результате разработан и изготовлен высокооборотный электрогенератор для газовой микротурбины с мощностью 100 кВт и частотой вращения 100 000 об/мин. При проектировании выбран электрогенератор асинхронного типа с массивным ротором. Особенностью разработанной конструкции является применение пятифазной обмотки статора. Разработана система управления экспериментального образца высокооборотного электрогенератора для микро-ГТУ. **Практическая значимость** заключается в разработке методов и алгоритмов проектирования высокооборотного генераторного оборудования для микро-ГТУ. Выработаны рекомендации по выбору типа и конфигурации высокооборотного электрогенератора для электрического комплекса на базе микрогазовой турбины. Предложена методика расчета параметров схемы замещения высокооборотного электрогенератора, позволяющая определять параметры схемы замещения по известной конфигурации активного слоя на этапе проектирования.

Ключевые слова: Высокооборотный электрогенератор, система управления, асинхронная электрическая машина с массивным ротором, электромеханические процессы, компьютерное моделирование.

Введение

Распределенная генерация электроэнергии на основе автономных энергетических комплексов малой мощности является одним из активно развивающихся направлений энергетики. Особенно актуальным применение такого подхода является для энергоснабжения удаленных объектов, а также при наличии значительного количества потребителей малой мощности, распределенных по большой площади. Одним из ключевых элементов таких систем являются генерирующие установки малой и средней мощности, которые можно разместить в непосредственной близости от потребителей энергии. Наиболее подходящим типом генерирующих устройств для рассматриваемых энергетических систем

являются микрогазотурбинные установки (микро-ГТУ). Их работа возможна как на природном или сжиженном газе, так и на биогазе или других видах газообразного топлива, что делает возможности использования местных энергетических ресурсов.

Эффективность микро-ГТУ во многом определяется частотой вращения турбины. В востребованном диапазоне мощностей 50–200 кВт наилучшие показатели достигаются при частоте вращения порядка 200 000 об/мин. В реальных системах частота вращения микро-ГТУ ограничивается высокооборотным электрогенератором (ЭГ), который располагается на общем валу с газовой турбиной. Повышение частоты вращения высокооборотного ЭГ позволяет существенно повысить эффективность микро-ГТУ. При мощности 100 кВт большинство существующих высокооборотных ЭГ работают с частотой вращения 60 000 об/мин. Поэтому актуальным является создание высокооборотного ЭГ мощностью 100 кВт и частотой вращения 100 000 об/мин. В связи с этим в статье рассматриваются вопросы, возникающие при разработке такого генератора.

Высокая частота вращения газовой микротурбины делает невозможным непосредственное питание потребителей и совместную работу с сетью промышленной частоты. Применение непосредственного преобразователя частоты или матричного преобразователя не позволяет обеспечить надежную работу системы и высокое качество электроэнергии на выходе генератора из-за наличия высших гармоник в выходном напряжении и проблем с синхронизацией работы нескольких генераторов друг с другом и с сетью. Поэтому в рассматриваемом высокооборотном электрогенераторе используется двойное преобразование электроэнергии, с явно выраженным звеном постоянного тока. В этом случае в его состав входят электрическая машина, выполняющая роль электромеханического преобразователя, активный выпрямитель и сетевой инвертор с общим звеном постоянного тока, система управления. Высокооборотный генератор является электротехническим комплексом, структура которого приведена на рис. 1.

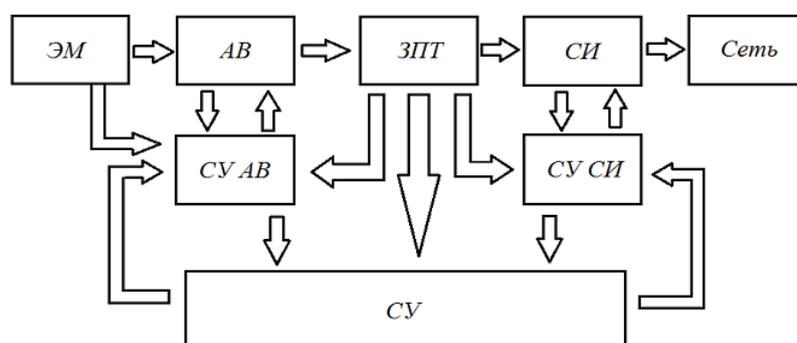


Рис. 1. Структурная схема высокооборотного электрогенератора энергетического комплекса на базе микро-ГТУ

1. Выбор типа электрической машины

Основной проблемой при разработке высокооборотной электрической машины (ЭМ) является обеспечение прочности конструкции. Наиболее сложным узлом являются ротор и опоры вала (подшипники), динамические свойства и прочность которых определяют допустимую частоту вращения.

Наилучшими удельными характеристиками обладают ЭМ с высококоэрцитивными редкоземельными постоянными магнитами (ПМ) на роторе. ПМ такого типа обладают хорошей прочностью при работе «на сжатие», но практически не допускают нагрузки «на растяжение». Расчеты толщины бандажа и прочности ротора для ЭМ с ПМ на 100 кВт и частотой вращения до 150 000 об/мин более подробно рассмотрены в статье [1]. Анализ полученных расчетных данных показал, что при частоте вращения выше 60 000 об/мин невозможно получить мощность генератора 100 кВт. Это происходит из-за того, что для обеспечения прочности требуется увеличение толщины бандажа. В результате возрастает немагнитный зазор. В этом случае увеличение высоты ПМ практически не приводит к росту мощности ЭМ, так как приводит к еще большему увеличению толщины бандажа. В результате, при неизменной линейной нагрузке, как следует из теории ЭМ [2], мощность не возрастает, так как определяется индукцией в воздушном зазоре, снижающейся при увеличении немагнитного зазора. На рис. 2. приведена зависимость предельной мощности высокооборотной ЭМ с ПМ на роторе в зависимости от частоты вращения [1].

В качестве альтернативы синхронной электрической машины с постоянными магнитами на роторе была рассмотрена асинхронная электрическая машина с массивным ротором. Одним из основных преимуществ такой ЭМ является то, что ротор может быть выполнен с валом газовой микротурбины в виде одной детали. Это упрощает технологию изготовления и сборки энергетического комплекса.

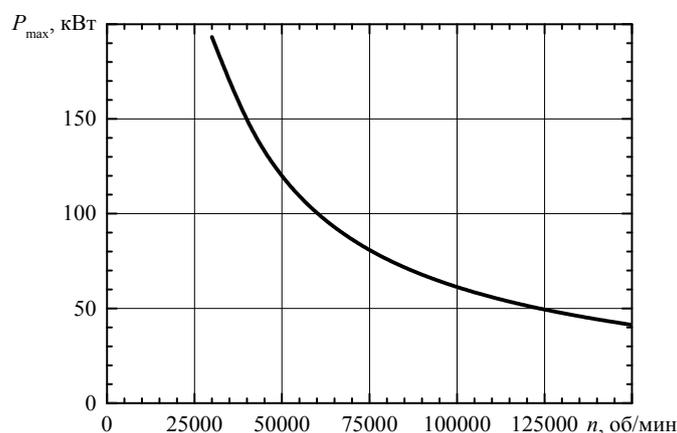


Рис. 2. Зависимость максимальной мощности ЭГ от частоты вращения ротора

При разработке высокооборотной асинхронной ЭМ с массивным ротором одним из наиболее сложных вопросов является снижение уровня потерь на статоре и роторе. Магнитопровод статора перемагничивается с частотой вращения магнитного поля, поэтому для уменьшения уровня магнитных потерь было принято сниженное значение индукции в воздушном зазоре. Потери в массивном роторе в значительной степени определяются наличием высших гармоник поля. Для снижения их уровня использовалась пятифазная обмотка статора. Также ее использование позволяет снизить токовую нагрузку на силовые полупроводниковые приборы активного выпрямителя и использовать модули.

2. Система управления высокооборотным электрогенератором для микро-ГТУ

Способы и алгоритмы регулирования высокооборотного ЭГ во многом определяют эффективность его работы, поэтому одним из наиболее важных вопросов при создании высокооборотного ЭГ является разработка системы управления. Наилучших результатов с точки зрения качества переходных процессов и точности управления позволяют добиться системы, построенные на основе принципов векторного регулирования [3]. Для рассматриваемого высокооборотного асинхронного ЭГ была разработана двухканальная система автоматического регулирования со стабилизацией потокосцепления ротора, структурная схема которой приведена на рис. 3. Каналы стабилизации потокосцепления ротора и регулирования момента выполнены двухконтурными, с управлением по напряжению. Это позволяет использовать для управления активным выпрямителем широтно-импульсную модуляцию с контролем гармонического состава [3] и обеспечить приемлемую частоту переключения силовых полупроводниковых приборов при высоком качестве регулирования.

Выбор и отработка алгоритмов регулирования и первоначальная настройка системы управления должны проводиться уже на этапе разработки высокооборотного ЭГ, до изготовления экспериментального образца. Вследствие этого для проведения таких исследований и проектирования устройств с его использованием необходима разработка математической модели (ММ), описывающей процессы в нем в рабочих режимах. Одним из наиболее сложных вопросов является определение параметров ММ на этапе проектирования. Поэтому был рассмотрен вопрос создания ММ и методики определения параметров и выполнена их проверка по результатам экспериментальных исследований.

Рассматриваемый высокооборотный электрогенератор имеет массивный ротор. В асинхронной ЭМ такого типа особенно сильно проявляется эффект вытеснения тока в роторе. Традиционные методы расчета параметров ММ не могут быть использованы в этом случае. Необходимо создание методики определения параметров схемы замещения асинхронной ЭМ с массивным ротором.

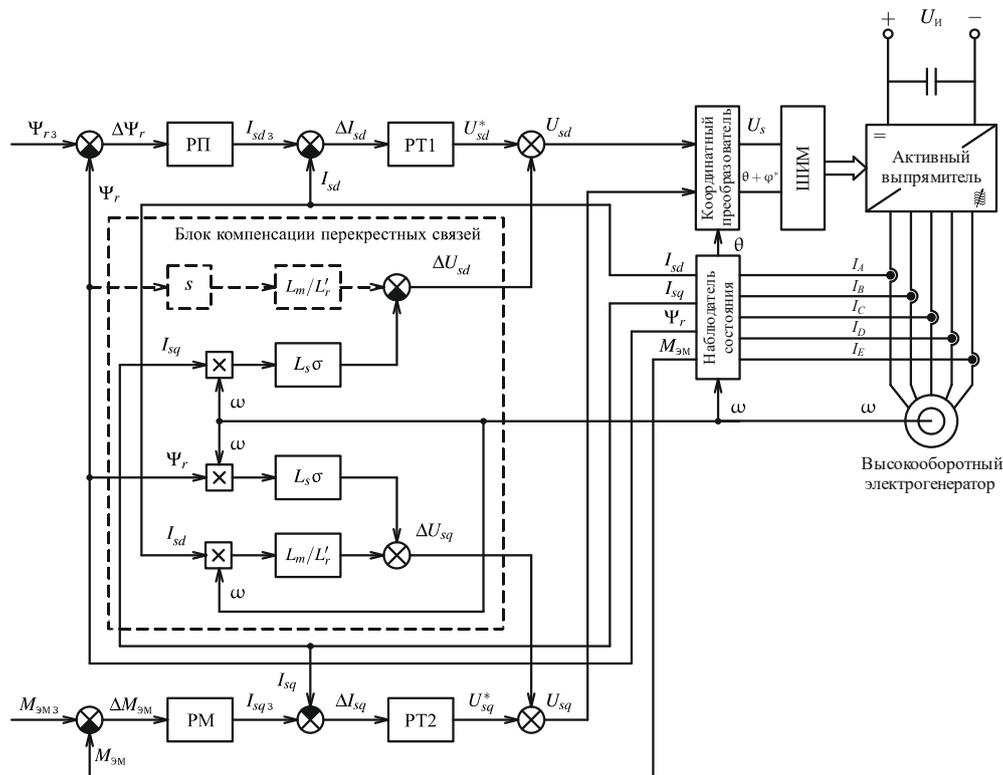


Рис. 3. Структурная схема системы автоматического регулирования высокооборотного ЭГ на базе асинхронной ЭМ с массивным ротором

Для определения параметров схемы замещения известен метод, основанный на использовании результатов серии расчетов магнитного поля при неподвижном роторе и питании обмоток переменным током разной частоты [4–8]. В оригинальном методе рассматривается машина с одним контуром на роторе и не учитывается наличие индуктивности рассеяния ротора.

Метода основан на том, что параметры схемы замещения асинхронной ЭМ определяются путем аппроксимации зависимости мнимой части индуктивности фазы статора от частоты токов статора, полученных в результате серии расчетов распределения магнитного поля при заторможенном роторе. Аппроксимация выполняется с использованием метода наименьших квадратов. Рассматриваемый метод показывает хорошие результаты для асинхронных ЭМ в традиционном исполнении, с короткозамкнутой клеткой на роторе или с двойной клеткой. Для определения структуры и параметров схемы замещения высокооборотного электрогенератора с массивным ротором необходима модификация рассматриваемого метода, учитывающая особенности решаемой задачи.

Для решения задачи определения параметров схемы замещения асинхронной ЭМ с массивным ротором предложено использовать метод, описанный в [9]. Этот метод является развитием подхода, изложенного в [10]. Метод заключается в следующем. Асинхронная ЭМ представляется в виде схемы замещения, имеющей n

контуров на роторе. Она показана на рис. 4, на котором приняты следующие обозначения [2]:

\vec{U}_s, \vec{I}_s — напряжение и ток статора;

$\vec{I}_m, \vec{I}_{r1}, \vec{I}_{r2}, \dots, \vec{I}_{rn}$ — ток контура намагничивания и токи контуров ротора;

$r_s, L_{\sigma s}$ — активное сопротивление и индуктивность рассеяния статора;

L_m — индуктивность контура намагничивания;

$r'_{r1}, L'_{\sigma r1}; r'_{r2}, L'_{\sigma r2}; \dots; r'_{rn}, L'_{\sigma rn}$ — активные сопротивления и индуктивности рассеяния контуров ротора;

s — относительное скольжение.

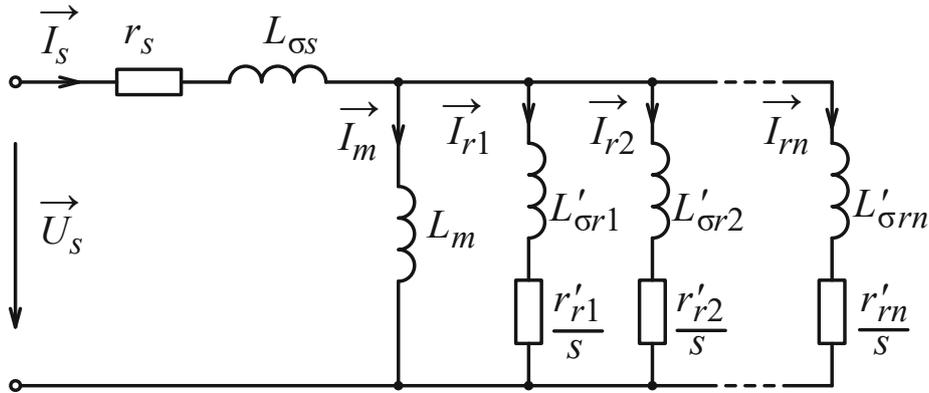


Рис. 4. Схема замещения асинхронной электрической машины с n контурами на роторе

При неподвижном роторе скольжение ротора равно единице. В этом случае комплексное сопротивление фазы асинхронной электрической машины равно:

$$Z_f(\omega) = r_s + j\omega L_f(\omega), \tag{1}$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота токов статора.

Индуктивность фазы в соответствии со схемой (рис. 3) равна:

$$L_f(\omega) = L_{\sigma s} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_m} + \frac{1}{j\omega L'_{\sigma r1} + r'_{r1}} + \frac{1}{j\omega L'_{\sigma r2} + r'_{r2}} + \dots + \frac{1}{j\omega L'_{\sigma rn} + r'_{rn}}} \cdot \frac{1}{j\omega}. \tag{2}$$

В качестве определяемых параметров выступают индуктивность контура намагничивания, активные сопротивления и индуктивности рассеяния контуров ротора. Аппроксимирующая функция, в соответствии с описанным выше подходом, является зависимостью мнимой части индуктивности фазы от частоты тока статора:

$$L_{fq}(\omega, f) = \text{Im}(L_f(\omega, b)), \tag{3}$$

где $b = (L_m, L'_{\sigma r1}, r'_{r1}, L'_{\sigma r2}, r'_{r2}, \dots, L'_{\sigma rn}, r'_{rn})^T$ — вектор параметров аппроксимации, имеющий размерность $2n + 1$.

Индуктивность рассеяния статора определяется по вещественной части индуктивности фазы [6], полученной в результате серии расчетов распределения поля.

В процессе обработки полученных в ходе расчетов данных были рассмотрены три случая: с одним, двумя и тремя контурами на роторе. Параметры приведены на одну фазу. На рис. 5 показаны результаты аппроксимации действительной и мнимой частей индуктивности фазы высокооборотного электрогенератора при одном и трех контурах на роторе [11].

Анализ полученных зависимостей показывает, что использование модели асинхронной ЭМ с одним контуром на роторе не позволяет с достаточной точностью аппроксимировать зависимость индуктивности фазы рассматриваемого высокооборотного электрогенератора. Это происходит из-за сильного влияния эффекта вытеснения тока в массивном роторе. Увеличение количества контуров на роторе в модели асинхронной ЭМ значительно улучшает точность аппроксимации. Анализ полученных данных показал, что для адекватного представления электромагнитных процессов в исследуемой электрической машине во всем диапазоне скольжений достаточно использовать три контура.

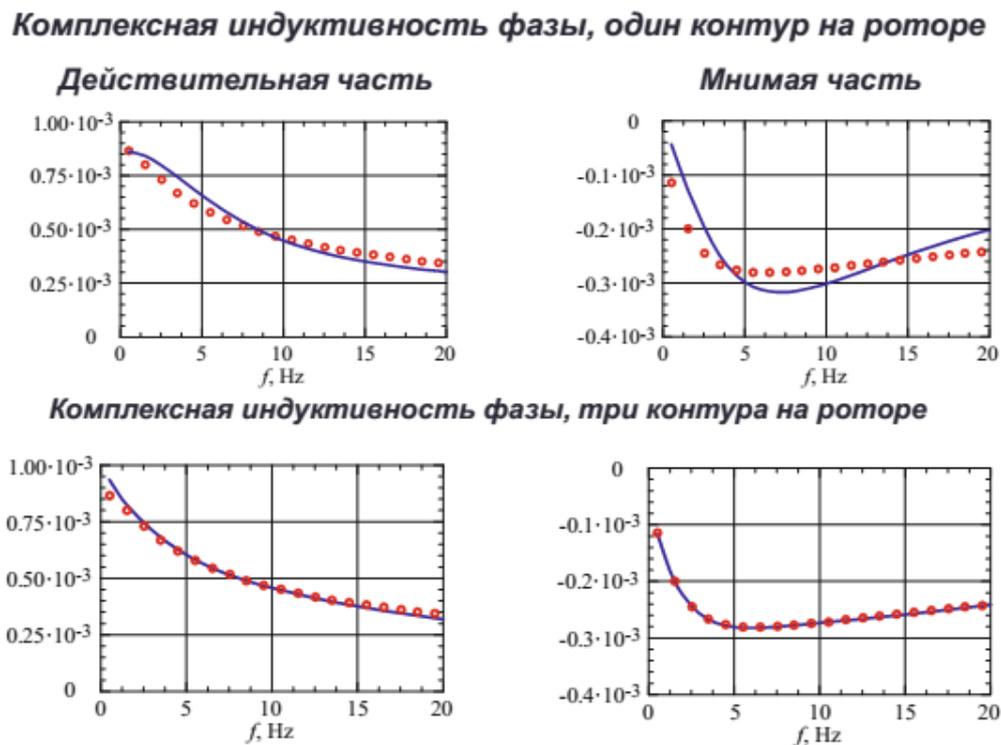


Рис. 5. Результаты аппроксимации вещественной и мнимой частей индуктивности фазы высокооборотного асинхронного ЭГ с массивным ротором при схеме замещения с одним и тремя контурами на роторе

3. Наблюдатель состояния высокооборотного асинхронного электрогенератора с массивным ротором

Особенностью конструкции рассматриваемой ЭМ, как было отмечено выше, является наличие массивного ротора в виде цилиндра из сплошного материала. На электромагнитные процессы в такой ЭМ значительное влияние оказывает вытеснение тока в массивном роторе. Поэтому традиционно используемые методы моделирования и управления асинхронной электрической машиной не могут быть использованы без изменений, учитывающих это явление.

Для успешной работы совместно с газовой турбиной регулирование ЭГ должно быть реализовано с высокими динамическими показателями во всем диапазоне скоростей. Эффективность системы автоматического регулирования, реализующей принципы векторного регулирования (см. рис. 3), во многом определяется точностью оценки величины и положения вектора потокосцепления ротора. Поэтому наблюдатель состояния асинхронной ЭМ является одним из наиболее важных элементов такой системы.

В процессе работы, под действием различных факторов, параметры асинхронной электрической машины изменяются. Для эффективной работы системы управления необходимо, чтобы наблюдатель состояния адаптировался к этим изменениям. Для ЭМ традиционной конструкции, с обмоткой типа «беличья клетка», изменение параметров происходит в основном из-за изменения активного сопротивления статора и ротора при нагреве обмоток. Такие изменения происходят относительно медленно по сравнению с электромагнитными процессами. Большинство известных типов наблюдателей состояния [12–14] имеют возможность адаптироваться к такому медленному изменению параметров регулируемой асинхронной электрической машины.

Параметры контура ротора (активное сопротивление и индуктивность рассеяния) асинхронной ЭМ с массивным ротором зависят от скольжения и значительно изменяются при насыщении магнитопровода, поэтому необходимо создание такого наблюдателя состояния асинхронной ЭМ с массивным ротором, который учитывал бы эту особенность.

Отличительной чертой работы наблюдателя состояния высокооборотного ЭГ, работающего совместно с газовой микротурбиной, является то, что частота вращения ротора изменяется с использованием датчика. Это необходимо для того, чтобы контролировать работу микротурбины вне зависимости от состояния электрогенератора и его системы управления. Поэтому информацию об угловой скорости вращения ротора электрогенератора нет необходимости определять с использованием наблюдателя состояния. Другой особенностью наблюдателя состояния высокооборотного ЭГ асинхронного типа является необходимость адаптации к быстро меняющимся параметрам цепи ротора — активного сопротивления и

индуктивности рассеяния. По различным оценкам, в рассматриваемом случае наилучшие результаты могут быть получены с использованием фильтра Калмана [15–18].

В качестве измеряемых величин в рассматриваемом наблюдателе состояния выступают напряжения и токи фаз высокооборотного ЭГ. По этим измеренным значениям наблюдатель состояния должен восстанавливать переменные, необходимые для работы векторной системы управления: проекции тока статора и потокосцепления ротора на оси системы координат, связанной со статором, электромагнитный момент.

С учетом указанных особенностей и требований к наблюдателю состояния высокооборотного ЭГ применение линейного фильтра Калмана невозможно, так как при необходимости адаптации к изменению параметров цепи ротора задача становится нелинейной и требуется применение расширенного фильтра Калмана.

Наблюдатель состояния на основе расширенного фильтра Калмана создается на основе динамического описания объекта управления. В рассматриваемом случае переменными состояния объекта являются проекции векторов потокосцепления статора и ротора на оси системы координат $\alpha - \beta$. В качестве управляющего воздействия выступают фазные напряжения, приложенные к обмотке статора, измеряемыми величинами являются фазные токи. Уравнения состояния имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}[\Psi] = (p\omega[D] - [R][L]^{-1})[\Psi] + [B][u_{f\text{mean}}] \\ [i_f] = [C] \cdot [\Psi] \end{cases}, \quad (4)$$

где $[B]$ и $[C]$ — матрицы управления и измерения;

$[u_{f\text{mean}}]$ — вектор фазных напряжений (управляющих воздействий).

Вектор переменных состояния дополняется двумя переменными — активным сопротивлением и индуктивностью рассеяния ротора (приведенными к статору).

Фильтр Калмана рассматривается в дискретной постановке. Работа фильтра на каждом шаге по времени состоит из двух этапов — прогноза и коррекции. Прогноз состояния системы на $k + 1$ шаге осуществляется с использованием численного дифференцирования:

$$[\Psi]_{k+1}^* = f(t_k, [\Psi]_k) = [\Psi]_k + \Delta T \cdot \frac{d}{dt}[\Psi]_k, \quad (5)$$

где ΔT — шаг дискретизации фильтра по времени.

На этапе прогноза также рассчитывается прогнозируемая матрица ковариации ошибок вектора состояния:

$$[P]_{k+1}^* = [F]_k [P]_k [F]_k^T + Q, \quad (6)$$

где $[F]_k = \frac{\partial f(t_k, [\Psi]_k)}{\partial [\Psi]_k}$ — матрица эволюции системы для момента времени t_{k+1} ;

$[Q]$ — матрица ковариации процесса.

На этапе коррекции рассчитываются ковариационная матрица для вектора отклонения (вектора ошибки) и оптимальная по Калману матрица коэффициентов усиления, формирующаяся на основании ковариационных матриц имеющегося прогноза вектора состояния и полученных измерений:

$$\begin{aligned} [S]_k &= [C][P]_{k+1}^* [C]^T + [R], \\ [K]_k &= [P]_{k+1}^* [C]^T [S]_k^{-1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $[R]$ — матрица ковариации ошибок измерения.

Затем определяются вектор оценки состояния системы и его ковариационная матрица на шаге $k + 1$:

$$\begin{aligned} [\Psi]_{k+1} &= [\Psi]_{k+1}^* + [K]_{k+1} \left([i_{f\ mean}] - [C][\Psi]_{k+1}^* \right), \\ [P]_{k+1} &= ([I] - [K]_{k+1} [C])[P]_{k+1}^*, \end{aligned} \quad (8)$$

где $[i_{f\ mean}]$ — вектор фазных токов (измеряемых величин).

Матрица ковариации процесса задается на основании априорной информации о структуре уравнений математической модели электромагнитных процессов и точности, с которой известны параметры высокооборотного генератора. Матрица ковариации ошибок измерений рассчитывается путем анализа тестовой выборки измерений токов фаз и периодически корректируется в процессе вычислений.

4. Результаты моделирования процессов в системе силовой преобразователь — высокооборотная электрическая машина

Для оценки правильности изложенного подхода к созданию наблюдателя состояния на основе расширенного фильтра Калмана было выполнено моделирование его работы совместно с моделью высокооборотного асинхронного ЭГ с массивным ротором. Для этого была использована описанная выше модель асинхронной ЭМ с тремя контурами на роторе. Высокооборотный ЭГ работает совместно с полупроводниковым преобразователем электроэнергии, выполняющим функции

активного выпрямителя. Преобразователь является мостовым пятифазным автономным инвертором напряжения. В расчетах было принято, что используется одноимпульсная модуляция выходного напряжения преобразователя, напряжение в звене постоянного тока равно 600 В, ротор электрогенератора вращается с частотой 100 000 об/мин. Был рассмотрен случай перехода от режима холостого хода к режиму генерации. Для этого частота напряжения, приложенного к обмоткам электрогенератора, ступенчато изменялась от синхронной частоты на величину скольжения в номинальном режиме (12 Гц). Сигналы напряжения и тока фаз электрогенератора подавались с выхода модели электрической машины на вход наблюдателя состояния после суммирования с нормально распределенной помехой с дисперсией порядка 10 %, что соответствует показателям реально используемых систем измерения. Время дискретизации наблюдателя было принято 5 мкс. На рис. 6 показаны зависимости токов, напряжений и электромагнитного момента, потокосцепления ротора в укрупненном масштабе времени [19].

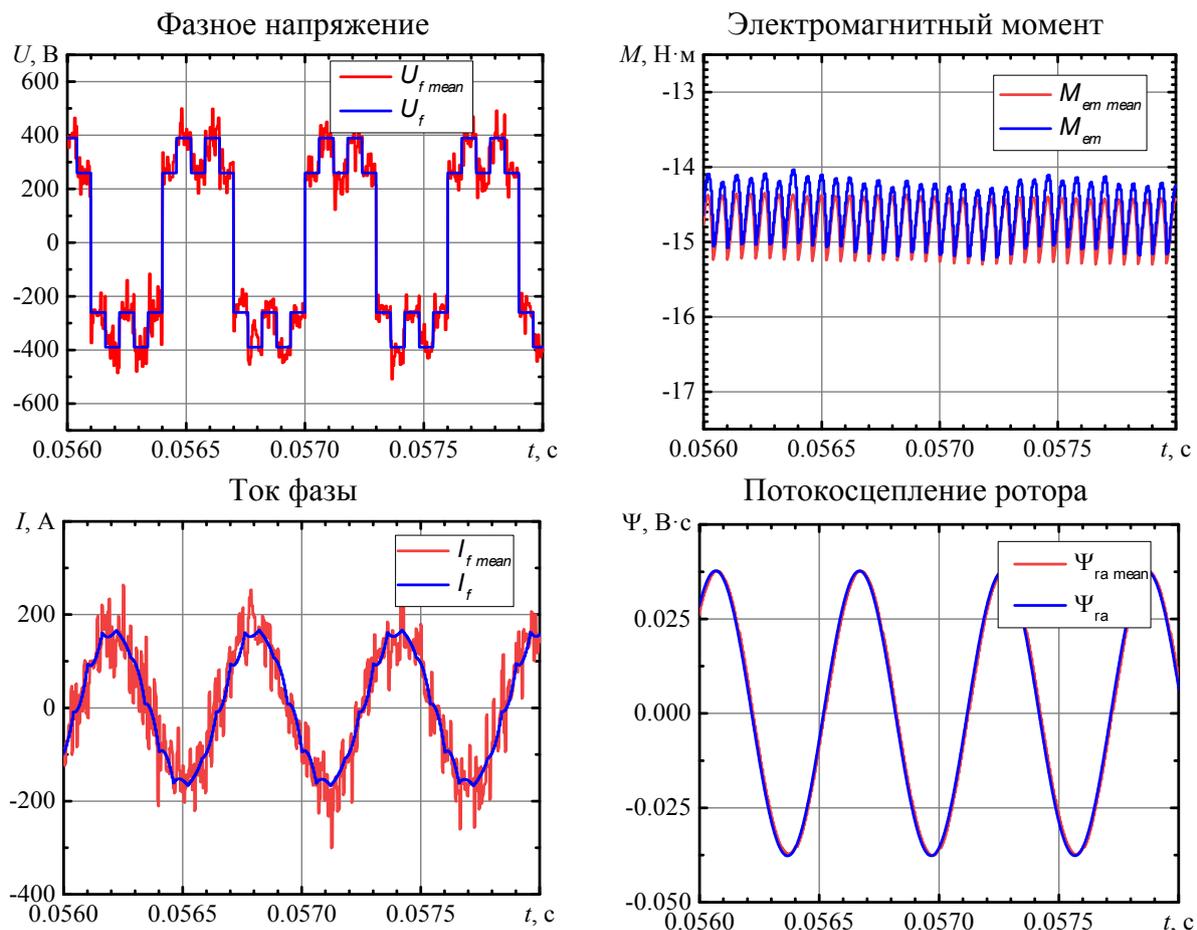


Рис. 6. Результаты моделирования процессов в системе высокооборотный электрогенератор — наблюдатель состояния на основе расширенного фильтра Калмана в укрупненном масштабе времени

Анализ полученных результатов показывает, что разработанный наблюдатель состояния обеспечивает хорошую фильтрацию измеряемых сигналов (фазных токов) и позволяет восстанавливать скрытые переменные, такие как поток сцепления ротора и электромагнитный момент с точностью, достаточной для нормальной работы системы автоматического регулирования. Принятый шаг дискретизации является допустимым с точки зрения устойчивости работы фильтра.

5. Устройство сопряжения с электрической сетью высокооборотного электрогенератора для микро-ГТУ

Для работы совместно с электрической сетью промышленной частоты (50 Гц) используется статический полупроводниковый преобразователь с возможностью синхронизации с сетью. Поскольку для газовой турбины недопустимы резкие изменения нагрузки со стороны ЭГ, в схеме преобразователя должно быть предусмотрено наличие реостатного тормоза. При внезапном пропадании нагрузки со стороны потребителей электроэнергии он позволяет избежать выхода из строя турбины. Поэтому для работы совместно с высокооборотным ЭГ целесообразно применение преобразователей со звеном постоянного напряжения. В этом случае на выходе ЭГ устанавливается активный выпрямитель, работающий на звено постоянного напряжения, общее с подключенным к электрической сети инвертором. Наличие звена постоянного тока упрощает реализацию реостатного тормоза. Кроме того, возможным становится подключение нескольких ЭГ к общему звену постоянного напряжения для повышения надежности электроснабжения и резервирования. Схема сетевого инвертора приведена на рис. 7.

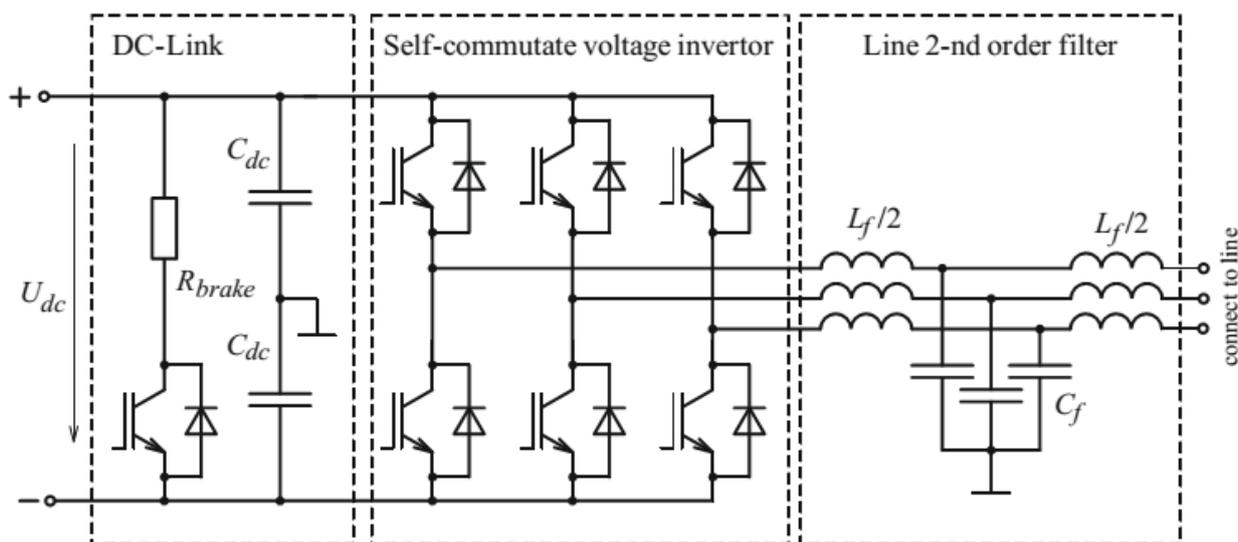


Рис. 7. Упрощенная принципиальная схема сетевого инвертора

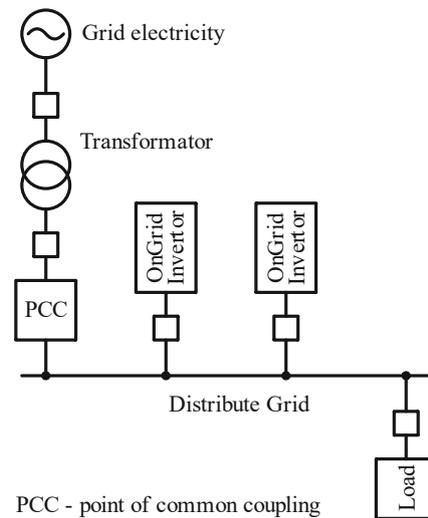


Рис. 8. Структурная схема системы электроснабжения

В системах энергоснабжения на основе микро-ГТУ, как правило, используется несколько параллельно работающих установок. Поэтому сетевые инверторы каждой из них должны допускать совместную работу на общую нагрузку в режиме автономного электроснабжения или работы совместно с электрической сетью.

Для снижения уровня высших гармоник на выходе инвертора расположен Т-образный фильтр. Формирование тока на выходе сетевого инвертора происходит на дросселе фильтра. На выходе инвертора устанавливается синус-фильтр второго порядка. С одной стороны на дроссель действует напряжение сети, с другой стороны — напряжение инвертора, который выступает в качестве управляемого источника напряжения.

В качестве иллюстрации применения инвертора, синхронизированного с сетью, была рассмотрена работа системы электроснабжения, состоящая из двух сетевых инверторов, нагрузки и распределительной сети, соединенной с внешней электрической сетью. На рис. 8 приведена структурная схема рассматриваемой системы электроснабжения. Трехфазная распределительная сеть переменного тока, с частотой 50 Гц и напряжением 380 В, подключена к электрической сети. К распределительной сети подключены два сетевых инвертора мощностью по 100 кВт и нагрузка мощностью 100 кВт.

Расчеты выполнены при следующих условиях. В начальный момент времени сетевые инверторы отключены от распределительной сети. Нагрузка получает питание от внешней сети. Сетевые инверторы подключаются к сети через 0,05 с. За это время система управления каждого из инверторов завершает процедуру синхронизации с напряжением сети в точках подключения, и они готовы к работе. В момент времени 0,04 с сетевые инверторы одновременно подключаются к сети. При этом первый инвертор генерирует ток с амплитудой 50 А, второй — 170 А. Сдвиг по фазе между напряжениями и токами в точках подключения инверторов

отсутствует (составляющая тока по оси q задается равной нулю). В таком режиме инверторы являются источниками только активной мощности, реактивная мощность не потребляется и не генерируется.

Для демонстрации возможности перераспределения нагрузки между сетевыми инверторами на интервале времени от 0,2 с до 0,3 с амплитуда тока первого инвертора увеличивается до 170 А, а второго — снижается до 50 А. На интервале времени от 0,35 с до 0,4 с задание тока по оси q второго сетевого инвертора изменяется от 0 А до -50 А. Данный режим соответствует генерации реактивной мощности.

На рис. 9, 10 показаны результаты расчетов. На рис. 9 приведены зависимости тока электрической сети, токов в точке подключения первого и второго сетевых инверторов и напряжения на нагрузке после в процессе подключения инверторов к сети. На рис. 10 показаны те же величины на всем расчетном интервале времени, а также активная и реактивная мощность электрической сети, первого и второго сетевых инверторов.

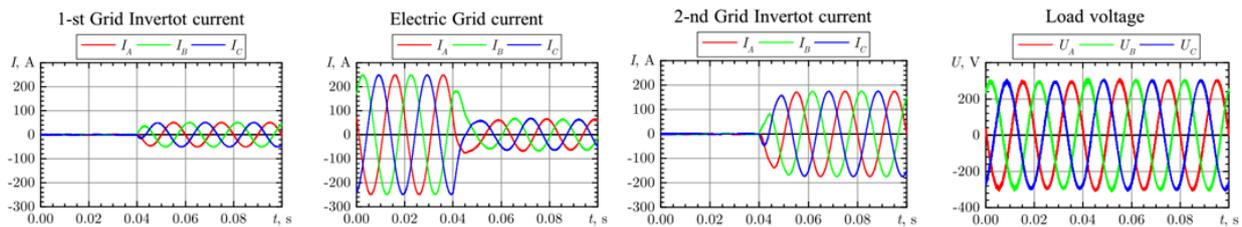


Рис. 9. Токи сети, первого и второго сетевых инверторов и напряжения на нагрузке в процессе подключения инверторов к сети

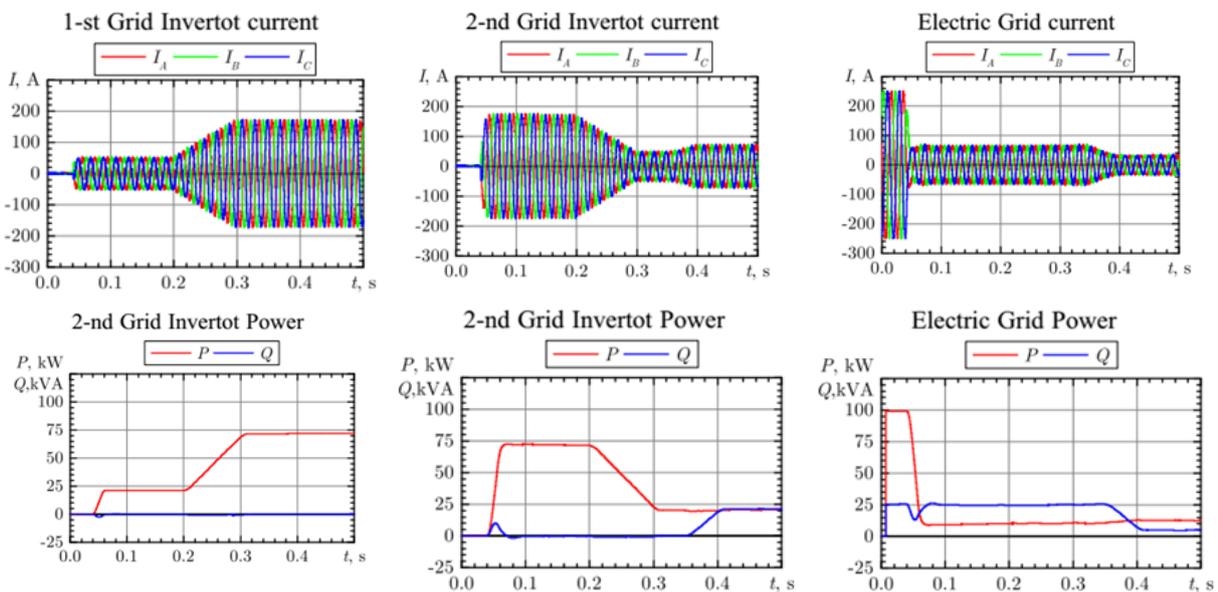


Рис. 10. Токи сети, активная и реактивная мощность сети, первого и второго сетевых инверторов

Заключение. Основные выводы

Анализ результатов, полученных в ходе проведения исследовательских испытаний, показывает, что использованные при разработке высокооборотного электрогенератора для микро-ГТУ технические решения позволили создать работоспособную конструкцию. Были решены задачи создания конструкции электро-механического преобразователя, статического полупроводникового преобразователя, системы управления. Применение асинхронной ЭМ с массивным ротором в качестве электро-механического преобразователя высокооборотного ЭГ позволило преодолеть ограничение по мощности 60 кВт на частоте вращения 100 000 об/мин, возникающее при использовании высокооборотных синхронных ЭМ с ПМ на роторе из-за проблем с прочностью металлических бандажей.

Применение пятифазной обмотки статора в сочетании с магнитными клиньями и специальными видами модуляции выходного напряжения показало себя эффективным с точки зрения снижения потерь от высших временных и пространственных составляющих магнитного поля. Соотношение потерь в стали и в обмотке статора в разработанном высокооборотном ЭГ соответствует принятому в практике создания высокооборотных ЭМ.

Библиографический список

1. Колпахчян П. Г. Об одной возможности изготовления роторов высокоскоростных электрогенераторов с постоянными магнитами / П. Г. Колпахчян, Б. Н. Лобов, И. В. Русакевич и др. // Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018: материалы докладов конференции, Новочеркасск, 03–06 октября 2018 года. — Новочеркасск: ООО «Лик», 2018. — С. 14–19.
2. Гольдберг О. Д. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / О. Д. Гольдберг. — М.: Высшая школа, 1984. — 431 с.
3. Kolpakhchyan P. Systems Approach to the Analysis of Electromechanical Processes in the Asynchronous Traction Drive of an Electric Locomotive / P. Kolpakhchyan, A. Zarifian, A. Andruschenko // Rail Transport — Systems Approach. — 2017. — Pp. 67–134.
4. Dolinar D. Calculation of two-axis induction motor model parameters using finite elements / D. Dolinar, R. De Weerd, R. Belmans et al. // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 1997. — Vol. 12. — Iss. 2. — Pp. 133–142.
5. Levi E. General method of magnetising flux saturation modelling in d-q axis models of double-cage induction machines / E. Levi // IEEE Proceedings on Electric Power Applications. — 1997. — Vol. 144. — Iss. 2. — Pp. 101–109.
6. Wilow V. Electromagnetical model of an induction motor in COMSOL Multiphysics: Master's thesis / V. Wilow // KTH, Electrical Energy Conversion. — 2014. — P. 50.

7. Nocedal J. Numerical Optimization / J. Nocedal, S. Wright // Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. — 2nd edition. — Springer-Verlag GmbH, 2006. — 664 p.
8. Kanzow C. Levenberg — Marquardt methods with strong local convergence properties for solving nonlinear equations with convex constraints / C. Kanzow, N. Yamashita, M. Fukushima // Journal of Computational and Applied Mathematics. — 2004. — Vol. 172. — Iss. 2. — Pp. 375–397.
9. McGuinness D. T. A performance comparison of different rotor types for high-speed induction motors / D. T. McGuinness, M. O. Gulbahce, D. A. Kocabas // 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). — 2015. — Pp. 584–589.
10. Williamson S. Calculation of cage induction motor equivalent circuit parameters using finite elements / S. Williamson, M. J. Robinson // IEEE Proceedings. Electric Power Applications. — 1991. — Vol. 138. — Iss. 5. — P. 264.
11. Колпахчян П. Г. Определение параметров схемы замещения асинхронной электрической машины с массивным ротором / П. Г. Колпахчян, М. С. Подберезная, Д. В. Ольховатов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2019. — Т. 62. — № 5. — С. 31–36. — DOI: 10.17213/0136-3360-2019-5-31-36.
12. Jouili M. Luenberger state observer for speed sensorless ISFOC induction motor drives / M. Jouili, K. Jarray, Ya. Koubaa et al. // Electric Power Systems Research. — 2012. — Vol. 89. — Pp. 139–147. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779612000648> (дата обращения: 27.12.2019).
13. Zhang Y. A comparative study of Luenberger observer, sliding mode observer and extended Kalman filter for sensorless vector control of induction motor drives / Y. Zhang, Z. Zhao, T. Lu et al. // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. — 2009. — Pp. 2466–2473.
14. Messaoudi M. MRAS and Luenberger Observer Based Sensorless Indirect Vector Control of Induction Motors / M. Messaoudi, S. Lassaad, B. Mouna et al. // Asian Journal of Information Technology. — 2008. — Vol. 7. — Pp. 232–239.
15. Tiwari V. Sensorless speed control of induction motor drive using extended Kalman filter observer / V. Tiwari, S. Das, A. Pal // 2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). — 2017. — Pp. 1–6.
16. Basheer O. Flux and Speed Estimation of Induction Motors using Extended Kalman Filter / O. Basheer, M. Obaid // International Journal of Computer Applications. — 2018. — Vol. 181. — Pp. 27–31.
17. Alonge F. Sensorless Control of Induction-Motor Drive Based on Robust Kalman Filter and Adaptive Speed Estimation / F. Alonge, F. D’Ippolito, A. Sferlazza // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2014. — Vol. 61. — Pp. 1444–1453.
18. Rumzi N. High performance direct torque control induction motor drive utilising TMS320C31 digital signal processor / N. Rumzi // Digital Signal Processing Solutions, 22.04.2000.
19. Kolpakhchyan P. G. High-Speed Induction Motor State Observer Based on an Extended Kalman Filter / P. G. Kolpakhchyan, A. E. Kochin, B. N. Lobov et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2020. — Vol. 1156. — Pp. 633–644. — DOI: 10.1007/978-3-030-50097-9_65.

Дата поступления: 20.07.2023

Решение о публикации: 31.08.2023

Контактная информация:

ПОДБЕРЕЗНАЯ Маргарита Сергеевна — ассистент; pumadj@yandex.ru

КОЛПАХЧЬЯН Павел Григорьевич — д-р техн. наук, доц.; kolpakhchyan@mail.ru

An Energy Complex Based on a High-Speed Electric Machine

M. S. Podbereznaia¹, P. G. Kolpakhchyan²

¹Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Podbereznaia M. S., Kolpakhchyan P. G. An Energy Complex Based on a High-Speed Electric Machine. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 114-132. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-114-132

Summary

Purpose: The purpose of this study is to develop the scientific basis for designing high-speed electric generators used in conjunction with gas micro-turbines. **Methods:** To solve the tasks set, the theories of electrical machines; the finite element method; automatic control theory; methods of mathematical analysis, mathematical and circuit modeling; numerical modeling on a PC using FEMM and Matlab Simulink software complexes have been used. The research has been carried out on experimental samples of a high-speed electric generator and confirmed by the results of tests as part of an energy complex based on a gas micro-turbine in 2019. **Results:** A complex of scientifically based technical solutions for the design of a high-speed electric generator with an energy complex control system based on a micro-gas turbine has been developed. As a result, a high-speed electric generator for a gas microturbine with a power of 100 kW and a rotation speed of 100,000 rpm has been developed and manufactured. When designing, an asynchronous type electric generator with a massive rotor has been selected. A feature of the developed design is the use of a five-phase stator winding. A control system of an experimental sample of a high-speed electric generator for micro-GTU has been developed. **Practical significance:** It lies in the development of methods and algorithms for designing high-speed generator equipment for micro-GTU. Recommendations have been developed for choosing the type and configuration of a high-speed electric generator for an electric complex based on a micro-gas turbine. A method is proposed for calculating the parameters of the substitution circuit of a high-speed electric generator, which allows us to determine the parameters of the substitution circuit according to the known configuration of the active layer at the design stage.

Keywords: High-speed electric generator, control system, asynchronous electric machine with a massive rotor, electromechanical processes, computer modeling.

References

1. Kolpakhch'yan P. G., Lobov B. N., Rusakevich I. V. et al. *Ob odnoy vozmozhnosti izgotovleniya rotorov vysokoskorostnykh elektrogeneratorov s postoyannymi magnitami. Trudy X Mezhdunarodnoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2018: materialy dokladov konferentsii, Novocherkassk, 03–06 oktyabrya 2018 goda* [About one possibility of manufacturing rotors of high-speed electric generators with permanent magnets. Proceedings of the X International Conference on

Automated Electric Drive AEP 2018: materials of conference reports, Novocherkassk, October 03–06, 2018]. Novocherkassk: OOO “Lik” Publ., 2018, pp. 14–19. (In Russian)

2. Gol'dberg O. D. *Proektirovanie elektricheskikh mashin: uchebnik dlya vuzov* [Design of electrical machines: a textbook for universities]. M.: Vysshaya shkola Publ., 1984, 431 p. (In Russian)

3. Kolpakhchyan P., Zarifian A., Andruschenko A. Systems Approach to the Analysis of Electromechanical Processes in the Asynchronous Traction Drive of an Electric Locomotive. Rail Transport — Systems Approach, 2017, pp. 67–134.

4. Dolinar D., De Weerd R., Belmans R. et al. Calculation of two-axis induction motor model parameters using finite elements. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997, vol. 12, Iss. 2, pp. 133–142.

5. Levi E. General method of magnetising flux saturation modelling in d-q axis models of double-cage induction machines. IEEE Proceedings on Electric Power Applications, 1997, vol. 144, Iss. 2, pp. 101–109.

6. Wilow V. Electromagnetical model of an induction motor in COMSOL Multiphysics: Master's thesis. KTH, Electrical Energy Conversion, 2014, p. 50.

7. Nocedal J., Wright S. Numerical Optimization. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. 2nd edition. Springer-Verlag GmbH, 2006, 664 p.

8. Kanzow C., Yamashita N., Fukushima M. Levenberg — Marquardt methods with strong local convergence properties for solving nonlinear equations with convex constraints. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2004, vol. 172, Iss. 2, pp. 375–397.

9. McGuinness D. T., Gulbahce M. O., Kocabas D. A. A performance comparison of different rotor types for high-speed induction motors. 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2015, pp. 584–589.

10. Williamson S., Robinson M. J. Calculation of cage induction motor equivalent circuit parameters using finite elements. IEEE Proceedings. Electric Power Applications, 1991, vol. 138, Iss. 5, p. 264.

11. Kolpakhch'yan P. G., Podbereznaya M. S., Ol'khovtov D. V. Opredelenie parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnoy elektricheskoy mashiny s massivnym rotorom [Determination of the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous electric machine with a massive rotor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics]. 2019, vol. 62, Iss. 5, pp. 31–36. DOI: 10.17213/0136-3360-2019-5-31-36. (In Russian)

12. Jouili M., Jarray K., Koubaa Ya. et al. Luenberger state observer for speed sensorless ISFOC induction motor drives. Electric Power Systems Research, 2012, vol. 89, pp. 139–147. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779612000648> (accessed: December 27, 2019).

13. Zhang Y., Zhao Z., Lu T. et al. A comparative study of Luenberger observer, sliding mode observer and extended Kalman filter for sensorless vector control of induction motor drives. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009, pp. 2466–2473.

14. Messaoudi M., Lassaad S., Mouna B. et al. MRAS and Luenberger Observer Based Sensorless Indirect Vector Control of Induction Motors. Asian Journal of Information Technology, 2008, vol. 7, pp. 232–239.

15. Tiwari V., Das S., Pal A. Sensorless speed control of induction motor drive using extended Kalman filter observer. 2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2017, pp. 1–6.
16. Basheer O., Obaid M. Flux and Speed Estimation of Induction Motors using Extended Kalman Filter. *International Journal of Computer Applications*, 2018, vol. 181, pp. 27–31.
17. Alonge F., D'Ippolito F., Sferlazza A. Sensorless Control of Induction-Motor Drive Based on Robust Kalman Filter and Adaptive Speed Estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 61, pp. 1444–1453.
18. Rumzi N. High performance direct torque control induction motor drive utilising TMS320C31 digital signal processor. *Digital Signal Processing Solutions*, 22.04.2000.
19. Kolpakhchyan P. G., Kochin A. E., Lobov B. N. et al. High-Speed Induction Motor State Observer Based on an Extended Kalman Filter. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1156, pp. 633–644. DOI: 10.1007/978-3-030-50097-9_65.

Received: July 20, 2023

Accepted: August 31, 2023

Author's information:

Margarita S. PODBEREZNAYA — Assistant; pumadj@yandex.ru

Pavel G. KOLPAKHCHYAN — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; kolpakhchyan@mail.ru