

Stabilization of Voltage Parameters of Induction Generator Excited by a Voltage Inverter

Padalko D.A.

National Research Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russian Federation

Abstract. The article reveals the operational aspects of induction generator. Methods for stabilization of induction generator (IG) parameters under inverter excitation are investigated. The study was carried out using mathematical description and simulation modeling in MATLAB Simulink. The paper provides analysis of causes of generated voltage amplitude and frequency displacement when the loading condition and the rate vary. Due to the parametric resonance nature of IG self-excitation, the author introduces the expression that allows estimating the capacitor capacitance required to maintain the generation process, depending on the rotor speed of electric machine, load nature and rate. Based on the studies, it was proved that it is possible to stabilize the IG voltage parameters by maintaining the magnetizing circuit inductance L_m at the constant level, and realizing a control law close to $U/f = \text{const}$. The study proves that using the inverter together with the voltage regulator allows ensuring the quality of electricity corresponding to modern standards. The necessity of problem solving of the required quality of the voltage by the harmonic component for the exciter - inverter with PWM is shown. The prospects of the power generation system based on induction machine (IM) with a semiconductor frequency converter, which serves as an adjustable supplier of capacitive current for IM for autonomous objects, are substantiated. The use of semiconductor frequency converters makes it possible to provide high stability of the output voltage parameters and good speed of the mechatronic generation system with an asynchronous machine.

Keywords: induction generator, inverter excitation, voltage parameters stabilization, mathematical modeling, parametric resonance, self-excitation process.

Stabilizarea parametrilor de tensiune ai unui generator de inducție excitat de un invertor de tensiune

Padalko D.A.

Universitatea Națională de Cercetare Politehnică din Tomsk
Tomsk, Federația Rusă

Rezumat. Sunt examinate particularitățile caracteristicilor generatorului asincron. Se investighează metodele de stabilizare a parametrilor unui generator asincron (GA) sub excitația invertorului. Studiul a fost realizat prin descrierea matematică și modelarea prin simulări în mediul de programare vizuală Simulink din pachetul de aplicații MatLab. Se analizează cauzele deviației amplitudinii și frecvenței tensiunii generate atunci când are loc schimbarea caracterului și valorii sarcinii. Reieșind natura de auto-excitație a AG rezonanță parametrică s-a introdusă o expresie care permite estimarea valorii capacității condensatoarelor necesară pentru menținerea procesului de generare în funcție de viteza rotorului mașinii electrice, natura și valoarea sarcinii. Pe baza studiilor efectuate, sa confirmat că este posibilă stabilizarea parametrilor tensiunii generate de către GA prin menținerea inductivității circuitului de magnetizare la un nivel constant.

Cuvinte-cheie: generator asincron, excitație cu invertor, stabilizarea parametrilor de tensiune, modelarea matematică, rezonanța parametrică, procesul de auto-excitație.

Стабилизация параметров напряжения асинхронного генератора, возбуждаемого инвертором напряжения

Падалко Д. А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Томск, Российская Федерация

Аннотация. Раскрыты особенности работы асинхронного генератора. Исследованы способы стабилизации параметров асинхронного генератора (АГ) при инверторном возбуждении. Исследование выполнено путем математического описания и имитационного моделирования в среде визуального программирования Simulink пакета прикладных программ MatLab. Проведен анализ причин отклонения амплитуды и частоты генерируемого напряжения при изменении характера и величины нагрузки. Исходя из параметрическо-резонансной природы самовозбуждения АГ введено выражение, позволяющее оценить требуемую для поддержания процесса генерирования величину емкости конденсатора в зависимости от частоты вращения ротора электрической машины, характера и величины нагрузки. На

основании проведенных исследований было подтверждено, что возможна стабилизация параметров генерируемого напряжения АГ путем поддержания индуктивности намагничивающего контура на постоянном уровне.

Ключевые слова: асинхронный генератор, инверторное возбуждение, стабилизация параметров напряжения, математическое моделирование, параметрический резонанс, процесс самовозбуждения.

Введение

К системам генерирования электроэнергии, построенным на машинах постоянного и переменного тока, выдвигаются требования стабилизации параметров генерируемого напряжения. Системы генерирования, построенные на базе синхронных машин и машин постоянного тока, по причине своей распространенности и определенных преимуществ, изучены в достаточной мере, что позволило создать схемы стабилизации, позволяющие поддерживать неизменными параметры генерируемого напряжения во всем номинальном диапазоне работы. Асинхронные генераторы (АГ) обладающие особенностью – срывом генерации при

коротких замыканиях, что является значимым преимуществом для автономных систем генерирования, не получили должного распространения в виду характерных трудностей стабилизации амплитуды и частоты генерируемого напряжения, довольно мягкой внешней характеристики. Известные схемы стабилизации напряжения, основанные как на комбинированном подключении конденсаторов и дросселей насыщения, подмагничивании спинки статора, применении нелинейных конденсаторов – варикондов, феррорезонансных стабилизаторов, так и на применении источника постоянной частоты и т.д. [2-4, 11,18].

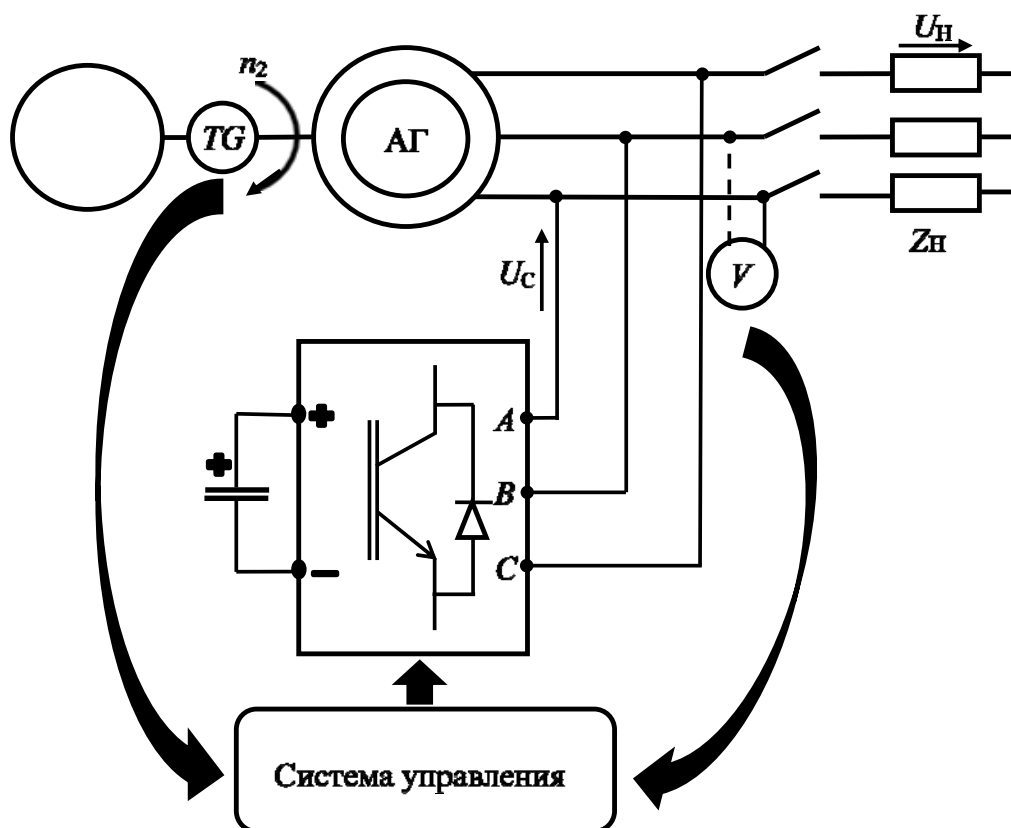


Рис. 1. Модель системы генерирования на базе АМ.

Предложенные схемы стабилизации и плохое быстродействие, не позволяющее имеют высокие массогабаритные показатели обеспечить качество электроэнергии в

системах энергоснабжения общего назначения, определяемого соответствующим ГОСТ 32144-2013 [5]. Развитие схмотехники управления и элементной базы полупроводниковых устройств позволяют решить вопросы гарантированного возбуждения и стабилизации параметров асинхронных генераторов. Наиболее подходящими являются схемы, в которых возбуждающий конденсатор звена постоянного тока коммутируется с помощью полупроводниковых ключей. Таким образом, конденсатор звена постоянного тока при инверторном возбуждении заменяет батарею конденсаторов при классическом возбуждении. Необходимая величина напряжения звена постоянного тока определяется мощностью асинхронной машины, используемой в качестве генератора, емкостью конденсатора звена постоянного тока и потерями на преобразование энергии.

Предлагается схема с полупроводниковым возбуждением в виде управляемого по току автономного инвертора напряжения на IGBT-транзисторах (рис. 1), в которых преобразователь, может служить резервным источником активной мощности, а также компенсатором реактивной мощности. Наличие выпрямителя напряжения позволяет поддерживать напряжение в звене постоянного тока, что способствует постоянству режима работы инвертора. Инверторное возбуждение не исключает особенности АГ к срыву генерации при коротком замыкании фаз. Прекращение самовозбуждения будет обусловлено не только принципом работы асинхронной машины, но и наличием защиты инвертора – источника реактивной энергии. Присутствие данной особенности позволяет использовать АГ с инверторным возбуждением в автономных объектах, для которых установлены требования по отработке аварийных режимов КЗ [16].

Модель содержит пропорционально – интегральный регулятор напряжения, управляющий величиной выдаваемой инвертором реактивной мощности для поддержания амплитуды и частоты напряжения на зажимах генератора.

I. ПРИЧИНА САМОВОЗБУЖДЕНИЯ АГ

Вариация частоты и амплитуды выходного напряжения определяется электромагнитными процессами, происходящими в асинхронной машине (АМ) в режиме генерирования при изменении величины и характера нагрузки. Исходя из трактовки «параметрического резонанса», рассмотренной в работах [12-14], как причина самовозбуждения АМ – колебательного процесса, вызываемого модуляцией какого-либо из реактивных параметров контура, принимающего нарастающий характер. Данный вид резонансного явления был впервые экспериментально обнаружен Г.С. Гореликом и Г.М. Гинцем при исследованиях суперрегенеративного приемника. В дальнейшем, в достаточной мере явление параметрического резонанса было исследовано академиками АН СССР Л.И. Мандельштамом и Н.Д. Папалекси [10]. Ограничение нарастаний амплитуды колебаний объясняется нелинейным процессом насыщения магнитной цепи, а значение частоты генерируемого напряжения определяется реактивными параметрами электрической машины и схемы возбуждения.

Главной особенностью данного вида резонанса является отсутствие потребности в постоянном источнике возбуждающей ЭДС. Необходимая для возбуждения первичная энергия может быть представлена в виде остаточного магнитного потока машины, напряжения на конденсаторе, внешних флуктуациях магнитного поля и т.д. При этом глубина модуляции и частота изменения реактивного параметра влияют на скорость роста колебаний и эффективность вложенной энергии. Создание математической модели явления параметрического резонанса АГ работающего на нагрузку, сопровождается трудностями интерпретации полученных выражений [7,8,19-22].

Причиной изменений реактивных параметров асинхронных машин является пульсация магнитного поля, определяемая конструктивными особенностями статора и взаимоположением пазов статора и короткозамкнутых стрижней ротора. Высота зубцов, материал клиньев паза и прочие конструктивные особенности АМ также оказывают воздействие на направление и значение магнитной индукции, потока.

Из анализа явления параметрического резонанса были получены условия

нарастающих колебаний (1), из которых следует, что для обеспечения нарастающего характера колебаний изменение индуктивности или емкости должно быть больше величины линейно зависящей от параметра реактивного элемента и обратно пропорциональной добротности [1]:

$$\Delta C > \frac{\pi \cdot C}{Q}, \Delta L > \frac{\pi \cdot L}{Q} \quad (1)$$

где Q – добротность колебательного контура;

L и C – индуктивность и емкость колебательного контура.

Детальное исследование пульсации магнитной индукции по радиальной длине воздушного зазора показало, что относительная величина пульсаций для АМ АИР160S4 составляет порядка 28,5 %. При этом для нарастающих колебаний параметрического резонанса АГ с фазной емкостью в $C = 400$ мкФ, требуемой для поддержания процесса самовозбуждения при номинальной индуктивно-емкостной нагрузке $\cos\phi = 0.8$, необходимо и достаточно периодического изменения реактивных элементов на 6,2%. Таким образом, конструктивные особенности асинхронной машины позволяют судить о достаточной величине изменения реактивного элемента – индуктивности намагничивающего контура, обеспечивающего запас устойчивости [17].

Переход в генераторный режим асинхронных машин с инверторным возбуждением полностью аналогичен физическому процессу самовозбуждения асинхронного генератора с классической схемой возбуждения – конденсаторной батареей. Необходимая емкость, способствующая резонансному явлению и как результат процессу возбуждения асинхронного генератора, содержится в звене постоянного тока частотного преобразователя. Таким образом, что конденсатор звена постоянного тока при инверторном возбуждении заменяет батарею конденсаторов при классическом возбуждении, а необходимая величина напряжения звена постоянного тока, определяется мощностью АМ используемой в качестве генератора, емкостью конденсатора звена постоянного тока и потерями на преобразование энергии. Можно подвести

итог, что основная причина самовозбуждения асинхронных машин – колебательный процесс, вызываемый модуляцией реактивного параметра контура, принимающего нарастающий характер.

II. СТАБИЛИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРИРУЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Напряжение и частоту генерируемого напряжения определяют несколько основных параметров: степень насыщения магнитной системы, частота вращения ротора, эквивалентная емкость системы возбуждения, конструктивные особенности асинхронной машины, величина и характер нагрузки. Частота генерируемой электроэнергии определяется фазной емкостью и индуктивностью намагничивающего контура АМ и характеризуется выражением резонансной частоты и из зависимости частоты генерируемого напряжения определяемой частотой вращения ротора асинхронной машины (2).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C \cdot L_m}}, \quad (2)$$

$$f = \frac{p \cdot n}{60 \cdot (1-s)},$$

где L_m – индуктивность намагничивающего контура АМ;

C – величина емкости звена DC - звена инвертора напряжения;

p – число пар полюсов;

s – величина скольжения.

Исходя из системы (2) и эмпирических результатов получено выражение (3), определяющее функциональную зависимость требуемой величины фазной емкости конденсатора при классическом возбуждении в зависимости от скорости вращения ротора электрической машины, характера и величины нагрузки, считая произведение $p^2 n^2$ константой, значение которой равно $p^2 n^2 = 9 \cdot 10^6$.

$$C = \frac{(1-s)^2 \cdot 10^{-4}}{\pi^2 L_m (1 - \sin \phi)} \quad (3)$$

Из функциональной зависимости величины емкости фазного конденсатора, либо емкости звена постоянного тока инвертора напряжения следует, что данное

значение кроме индуктивного сопротивления намагничивающего контура также зависит от числа пар полюсов и скорости вращения ротора. Полученное выражение дает результаты схожие со значениями, полученными многими деятелями науки эмпирическим и экспериментальным путем. Для асинхронной машины АИР160S4 (таблица) для самовозбуждения на холостом

ходу понадобится фазная емкость в 118 мкФ, наиболее подходящее значение из номинальных рядов емкостей конденсаторов 120 мкФ. Окончательный выбор емкости батареи конденсаторов либо емкости DC – звена инвертора стоит производить исходя из максимальной величины и характера нагрузки АГ.

Таблица. Параметры схемы замещения АГ на базе асинхронной машины АИР160S4

Мощность P_I , кВт	R_s , Ом	R_r , Ом	$L_s = L_r$, Гн	R_m	L_m , Гн	C , мкФ
15	0.2761	0.1645	0.00219	0	0.07614	120

Выражение (3) может быть использовано для анализа требуемой для возбуждения мощности инвертора напряжения:

$$W_C = 0,314 \cdot U^2 \frac{(1-s)^2 \cdot 10^{-4}}{\pi^2 L_m (1 - \sin\varphi)} \quad (4)$$

Обеспечение стабильной частоты и амплитуды генерируемого асинхронным генератором напряжения требует помимо поддержания рабочей точки на кривой намагничивания, регулирование индуктивности намагничивающего контура, определяемой степенью насыщения магнитопровода статора электрической машины.

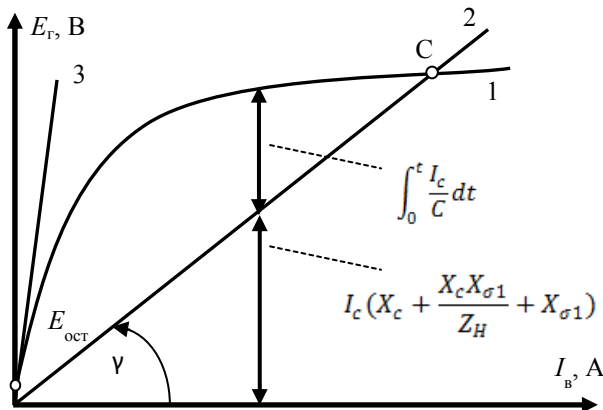


Рис. 2. Характеристики асинхронного генератора: 1 – характеристика холостого хода, 2 – вольтамперная характеристика конденсаторной батареи, 3 – критическое значение сопротивления.

Индуктивность намагничивания L_m определяется мощность электрической машины и может находиться в широком диапазоне от тысячных до сотен Гн, чем

меньше мощность, тем выше индуктивность намагничивания. Данная величина меняется во время работы в зависимости от насыщения стали электрической машины (рис. 2).

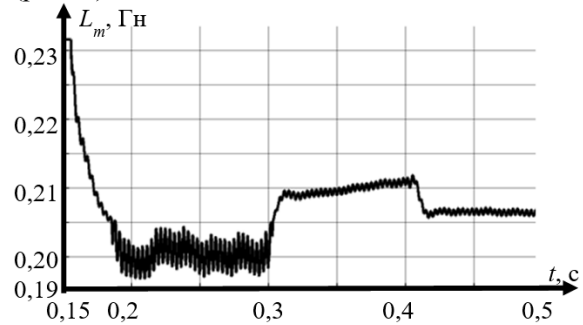


Рис. 3. Индуктивность намагничивающего контура при изменении нагрузки в разомкнутой системе.

Стабилизация амплитуды и частоты генерируемого напряжения осуществляется по одному каналу. Этому способствует особенность изменения состояния асинхронного генератора при работе на различные характеры нагрузки. Работа на активную и активно-индуктивную нагрузку характеризуются снижением амплитуды напряжения за счет размагничивающего действия якоря (статора АМ), и обусловлено падением напряжения на сопротивлении обмоток АМ. Кроме этого наблюдается уменьшение частоты генерируемого напряжения по причине увеличения индуктивности намагничивающего контура L_m из-за уменьшения насыщения машины и сдвига рабочей точки на кривой (рис 3). Исходя из выражений (2), (3), следует вывод: увеличение индуктивности влечет уменьшение частоты генерируемого напряжения. Таким образом, стабилизация

напряжения и частоты осуществляется поддержанием неизменной индуктивности намагничивающего контура, путем изменения намагничивающей составляющей тока инвертора. Фактически, реализуется процесс, близкий к закону $U/f = const$. Аналогичные явления характерны и для прочих электромагнитных устройств, например, для трансформаторов напряжения. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают полученные результаты, для исследуемого асинхронного генератора с инверторным возбуждением, удалось обеспечить стабильность линейного напряжения амплитудой в 380В и частотой 50Гц, максимальное отклонение амплитуды и частоты выходного напряжения от номинальных величин не превышает соответственно 10 и 3 %.

При экспериментальных исследованиях асинхронного генератора АИМ160S4 были получены следующие результаты, до момента времени 0.26 секунды асинхронная машина работает в двигательном режиме за счет питания переменным напряжением инвертора внешнего момента. Устойчивый генераторный режим работы достигается через 0.37 секунды после начала моделирования, при этом электромагнитный момент достигает значения в 20 Н·м, а скорость вращения ротора при этом устанавливается на величине 164 рад/с, что соответствует 1566 оборотам в минуту. В моменты времени 0.4 и 0.6 секунды происходит включение нагрузки, что приводит к изменению насыщения электрической машины и как следствие изменению индуктивности намагничивающего контура. Частота генерируемого напряжения достигает $f = 49,7$ Гц, из чего следует, что величина скольжения составит $s = -0.048$. Подключение номинальной нагрузки приводит к снижению мгновенного значения напряжения на 15 В, а время отработки статической ошибки составляет порядка трех секунд. Дальнейшие проведенные исследования показали стабильную работу АГ для всех видов нагрузки.

Таким образом, регулирование двух параметров выходного напряжения происходит за счет наличия одной обратной связи, оценивая отклонение фазного

напряжения от эталонной величины. Для поддержания постоянной индуктивности намагничивающего контура.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для компенсации отклонения система управления инвертором начинает пропускать большую энергию за счет увеличения скважности импульсов ШИМ. Подтягивая амплитуду напряжение к заданному уровню и частоту к номинальному значению за счет уменьшения индуктивности намагничивающего контура [16].

Вариация напряжения в звене постоянного тока будет влиять на режим работы инвертора и как следствие асинхронного генератора, изменяя объем реактивной энергии, поставляемой за один импульс системы управления. Для исключения влияния перемены напряжения в блоке постоянного тока на снятые характеристики следует использовать источник постоянного напряжения, либо использовать инвертор, в качестве компенсатора реактивной мощности, для преобразования избыточного напряжения на конденсаторе в активную мощность. Анализ конденсаторного возбуждения показал, что для явления самовозбуждения во время переходного процесса требуется реактивная энергия, соизмеримая с мощностью используемой асинхронной машины, после установившегося режима необходимый объем реактивной энергии составляет 5-25 % от мощности генератора из чего можно сделать заключение, что при использовании низковольтного источника, энергии может быть недостаточно для возникновения процесса возбуждения.

Анализ работы системы стабилизации амплитуды и частоты генерируемого напряжения показал, что инверторное возбуждение позволяет поддерживать генерируемое напряжение во всем номинальном диапазоне мощности, соответствуя требованиям ГОСТ 32144-2013. Однако, использование инвертора, управляемого ШИМ-генератором в качестве возбудителя, требует использования индуктивно-емкостных фильтров для обеспечения качественного спектрального состава напряжения и настройки регулятора

напряжения для максимального быстродействия системы стабилизации регулируемых параметров выходного напряжения.

ВЫВОДЫ

1) В системах генерирования автономных объектов, по причине существенных достоинств, представляет интерес использование асинхронных машин с короткозамкнутым ротором, как электромеханических преобразователей энергии. Предложенная система генерирования типа «асинхронный генератор – автономный инвертор напряжения» с обратной связью по выходному напряжению генератора реализует совместное регулирование напряжения и частоты лишь по одному контуру напряжения. Регулирование частоты происходит за счет воздействия тока инвертора на индуктивность намагничивающего контура электрической машины, фактически изменяя частоту резонанса системы. При этом в системе генерирования автоматически реализуется закон, близкий к $U/f = \text{const}$.

2) Получение достоверных результатов моделирования возможно только при учете кривой насыщения магнитной цепи асинхронной машины, требуется располагать действительной кривой намагничивания, исключается принятие прямолинейной магнитной характеристики. Помимо этого, необходимо учитывать характер нагрузочного сопротивления и изменение сопротивления взаимной индукции, определяемое магнитным состоянием, влияющее на стационарный режим работы генератора.

3) Использование инвертора напряжения с регулятором напряжения позволяет достичь заданного стандартами качества электроэнергии. При имитационном и экспериментальном исследовании было обеспечено отклонение частоты не превышающее 0,4 Гц, медленное изменение напряжения не превышало 5%, мгновенное изменение напряжения при подключении номинальной активно-индуктивной нагрузки не превышает 10% во всем интервале проведения эксперимента. Решением вопроса обеспечения требуемого качества по

коэффициенту гармонических составляющих напряжения является установка индуктивно-емкостного фильтра между системой генерирования и нагрузкой, выбор реактивных параметров фильтра уже поднимался в достаточном количестве [6, 9].

4) Обладая простотой конструкцией, высокой надежностью и низкой стоимостью система генерирования на базе АМ с полупроводниковым преобразователем частоты, выступающим в качестве регулируемого «поставщика» емкостного тока для АМ, в совокупности представляют перспективную высококачественную систему генерации электроэнергии для автономных объектов, в том числе для летательных аппаратов.

Литература (References)

- [1] N.D. Birjuk, O.S. Horpjakov Zadacha ob ustojchivosti po Ljapunovu parametricheskogo kolebatelnogo kontura [The problem of Lyapunov stability of a parametric oscillatory circuit]. *Teorija i tehnika radiosvjaz' – Theory and technique of radio communication*, 2015, no. 2., pp. 5–10. (In Russian).
- [2] Brekken, T.K.A. Control of a doubly fed induction wind generator under unbalanced grid voltage conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, Vol. 22, pp. 129-135.
- [3] Ekanayake, JB, Holdsworth, L, Wu, XG, Jenkins, N. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines. *IEEE Transactions on Power System*, 2003, Vol. 18, pp. 803-809.
- [4] Galkin M.P. e.a. *Ustrojstvo dlja avtomaticheskoi stabilizacii naprjazhenija avtonomnogo asinhronnogo generatora* [Device for automatic voltage stabilization of an independent asynchronous generator]. Patent RF, no. 469200, 1975.
- [5] GOST 32144-2013 *Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehniceskikh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoi jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija* [State standard 32144-2013 Electrical energy. The compatibility of technical means is electromagnetic. Norms of quality of electric energy in general-purpose power supply systems] - Introduction. 2014-17-01. - Moscow: Standardinform Publ., 2014. p. 16.
- [6] Haritonov S.A., Simonov B.F., Korobkov D.V., Makarov D.V. K voprosu stabilizacii naprjazhenija sinhronnogo generatora s postojannymi magnitami pri peremennoj chastote vrashhenija [To the problem of stabilizing the voltage of a synchronous

- generator with permanent magnets at a variable frequency of rotation]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh - Physical and technical problems of mining*, 2012, no 4, pp. 102–115 (In Russian).
- [7] Kitaev A.V., Orlov I.N. O fizicheskom mehanizme samovozbuzhdenija asinhronnoj mashiny [On the physical mechanism of self-excitation of an asynchronous machine]. *Jelektrichestvo – Electricity*, 1978, № 4, pp. 47–52 (In Russian).
- [8] Lima, F.K.A., Luna, A., Rodriguez, P., Watanabe, E.H., Blaabjerg, F. Rotor voltage dynamics in the doubly fed induction generator during grid faults, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, Vol. 25, pp. 118-130.
- [9] Malyshkov, G.M. Vyhodnye fil'try prostejshih invertorov - JetvA / Pod red. Ju.I. Koneva. – M.: Sovetskoe radio [Soviet radio], 1978, Vyp.10, pp. 178 –185 (In Russian).
- [10] Mandel'shtam L.I., Ja. D. Papaleksi. O parametricheskom vozbuzhdenii jelektricheskikh kolebanij [On the parametric excitation of electric oscillations]. *Zhurnal tehnichekoj fiziki – Journal of Technical Physics*, 1934, Tom IV, no. 1, pp. 335–352. (In Russian).
- [11] Morren, J, de Haan, SWH Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2005, Vol. 20, pp. 435-441.
- [12] Padalko, D.A. Javlenie parametricheskogo rezonansa v asinhronnyh generatorah [The phenomenon of parametric resonance in asynchronous generators]. *Jelektrotehnicheskie sistemy i komplekсы – Electrical systems and complex / Magnitogorskij gosudarstvennyj tehnichekoj universitet*, 2016, no. 3 (32). – pp. 10–14. (In Russian).
- [13] Padalko D. A. Jelektromagnitnye processy generirovanija jelektroenergii v mehatronnoj sisteme s asinhronnoj mashinoj. Diss. Kand. Tech. Nauk, [Electromagnetic Processes of Electric Power Generation in a Mechatronic System with an Asynchronous Machine. Kand. Tech. sci. diss.]Tomsk, 2016. – 181 p.
- [14] D. A. Padalko, A. G. Garganeev, P.V. Tyuteva Resonance Phenomen Analysis in Induction Generator, *Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) : 17th International Conference of Young Specialists*, 30 June - 4 July 2016, Novosibirsk, IEEE, 2016, pp. 532–535.
- [15] Pena, R., Clare, J.C., Asher, G.M Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variablespeed wind-energy generation, *IEE Proceedings: Electric Power Applications*, 1996, Vol. 143 : Issue 3, pp. 231-241.
- [16] Red'ko, V. V.; Leonov, A. P.; Red'ko, L. A Problems of Automatic Test of Insulation in Cable Production, *3rd All-Russian Scientific and Practical Conference on Innovations in Non-Destructive Testing*, 2015, no. 671, 012049 (In Russian).
- [17] Shridhar, L., Singh, B., Jha, CS. Analysis of Self-Excited Induction Generator Feeding Induction-motor, *PES 1993 Summer Meeting*, 1993, Vol. 9, pp. 390-396.
- [18] Tsybikov B., Beyerlein E. V., Tyuteva P. V. Comparison of energy efficiency determination methods for the induction motors, *MATEC Web of Conferences*, 2017, Vol. 91: Smart Grids 2017, [01034, 6 p.].
- [19] Reigosa, D., Briz, F., Blanco, C., Guerrero, J.M. Sensorless control of doubly-fed induction generators based on stator high frequency signal injection, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE*, 2013, pp. 503-510.
- [20] Nasimullah, Asghar M., Performance comparison of wind turbine based doubly fed induction generator system using fault tolerant fractional and integer order controllers, *Renewable Energy*, 2018, no. 116, pp. 244-264.
- [21] Dhoubib, B., Kahouli, A., Abdallah, H.H. Dynamic behavior of grid-connected fixed speed wind turbine based on proportional-integral pitch controller and fault analysis, *International Conference on Green Energy and Conversion Systems*, 2017, [8066242, 11 p.].
- [22] Ibrahim, A.O., Nguyen, T.H., Lee, D.-C., Kim, S.-C. Ride-through strategy for DFIG wind turbine systems using dynamic voltage restorers, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, pp. 1611-1618.

Сведения об авторе.



Падалко Дмитрий Андреевич. Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Энергетический институт, кафедра электротехнических комплексов и материалов, кандидат технических наук, ассистент. Основное направление исследований: системы энергоснабжения автономных объектов на базе асинхронных машин.
E-mail: padalkoda@tpu.ru