

УДК 621.314.2, 621.316.722.076.12

А. Г. Волков, *аспир.*, Г. С. Зиновьев, *проф.*,

А. В. Сидоров, *магистрант*, С. А. Харитонов, *проф.*

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия,

e-mail: genstep@mail.ru

### АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА И ТОКОВОГО КОМПЕНСАТОРА

*Исследуются возможности построения системы электроснабжения самолета на базе асинхронного генератора. Инновациями в такой системе будет использование полупроводникового преобразователя типа инвертора тока для самовозбуждения асинхронной машины, с параллельным решением задачи стабилизации напряжения при переменной скорости вращения вала машины и, при необходимости, компенсацией искажений напряжения генератора, вызванное нелинейностью или несимметрией нагрузки. В качестве преобразователя используется автономный инвертор тока, в отличие от инвертора напряжения, не содержащий электролитического конденсатора, имеющего известные ограничения. Построена математическая модель системы. Для анализа энергетических соотношений применяются прямые методы расчета АДУ. Результаты аналитических расчетов представлены.*

**Ключевые слова:** Автономные системы генерирования, Асинхронный генератор, Компенсатор неактивной мощности, Обратный инвертор тока

*Досліджуються можливості побудови системи електропостачання літака на базі асинхронного генератора. Інноваціями у такій системі буде використання напівпровідникового перетворювача типу інвертора струму для самозбудження асинхронної машини, з паралельним вирішенням задачі стабілізації напруги при змінній швидкості обертання валу машини та, при необхідності, компенсацією викривлення напруги генератора, спричиненого нелінійністю або несиметрією навантаження. У якості перетворювача використовується автономний інвертор струму, який, на відміну від інвертора напруги, не містить електролітичного конденсатора, що має відомі обмеження. Збудовано математичну модель системи. Для аналізу енергетичних співвідношень застосовуються методи розрахунку АДУ. Результати аналітичних розрахунків наведено.*

**Ключові слова:** Автономні системи генерування, Асинхронний генератор, Компенсатор неактивної потужності, Обернений інвертор

#### Введение

Известно, что традиционные стационарные системы генерирования электрической энергии средней и большой мощности строятся на базе синхронных генераторов независимого возбуждения. Напротив, в автономных системах генерирования электрической энергии, таких как ветроэнергетика, автомобильные генераторы, сварочные генераторы предпочтение отдается асинхронному генератору [1, 2, 8, 10]. В системах генерирования электрической энергии среднемагистральных самолетов получили распространение системы с синхронными генераторами с постоянными магнитами [9, 4]. Но для дальнемагистральных самолетов, где суммарная мощность системы электроснабжения в четырех каналах достигает 1000 кВт, такие решения на базе синхронного генератора будут затруднительными, поэтому актуальным является исследование возможностей построения системы электроснабжения самолета на базе асинхронного генератора. Инновациями в такой системе будет использование полупроводникового преобразователя типа инвертора тока для самовозбуждения асинхронной машины, с параллельным решением задачи стабилизации напряжения при переменной скорости вращения вала машины и, при необходимости, компенсацией искажений напряжения

генератора, вызванное нелинейностью или несимметрией нагрузки. В качестве преобразователя используется автономный инвертор тока, в отличие от инвертора напряжения, не содержащий электролитического конденсатора, имеющего ограничение по допустимой отрицательной температуре, не достаточной для эксплуатации самолета в условиях большинства территорий России. Известно исследование рациональности применимости конверторов тока по схеме “back-to-back” для проекта будущей ветроустановки на 10MW [3] со стабильной частотой. При этом каждый конвертор пропускает полную мощность нагрузки.

### Постановка задачи

В данной работе устанавливаются и анализируются энергетические соотношения для определения параметров параллельного генератору регулятора реактивной мощности на базе трехфазного инвертора тока с ШИМ. При этом стабилизируется только величина напряжения на выходе генератора, его частота переменна, но зато через конвертор не проходят токи перегрузки и короткого замыкания нагрузки. Строится математическая модель системы генерирования электрической энергии на основе прямых методов анализа энергетических процессов в системах. Затем анализируются основные энергетические характеристики, и на этой основе делается её сравнение с известными системами.

**Структурная схема системы.** На рис.1 показана структурная схема исследуемой системы электроснабжения.

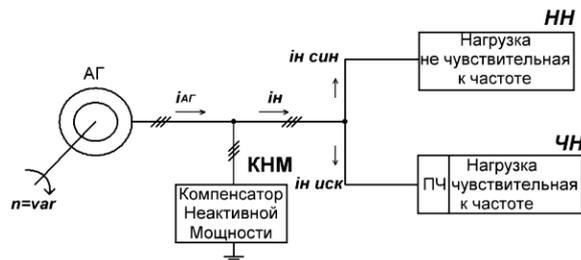


Рис. 1

Здесь АГ – асинхронный генератор, КНМ – компенсатор неактивной мощности на базе АИТ, НН – нагрузка, не чувствительная к частоте переменного напряжения (тепловая, осветительная, выпрямительная и т.д.), ЧН – нагрузка, чувствительная к частоте питающего напряжения, требующая для питания преобразователя частоты ПЧ.

**Расчет энергетических соотношений.** Расчетная схема замещения системы для одной фазы (при сбалансированной нагрузке) приведена на рис.2

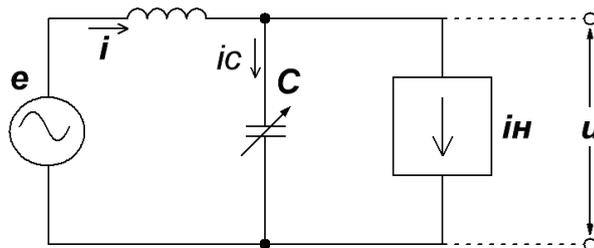


Рис. 2

Здесь асинхронный генератор замещен источником эдс  $e$  с индуктивностью  $L$ , компенсатор неактивной мощности представлен конденсатором с варьируемой величиной емкости (тока), а нагрузка заменена источником тока  $i_n$  в общем случае известной несинусоидальной формы. Задача компенсатора состоит в стабилизации напряжения  $u$  на нагрузке при изменении нагрузки и частоты вращения вала асинхронного генератора в 2 раза, что типично для самолетных систем электроснабжения и для ветрогенераторов.

Все энергетические расчетные соотношения для этой системы получим прямыми методами расчета [5].

Исходные дифференциальные уравнения системы имеют вид

$$\begin{cases} e - L \frac{di}{dt} = u \\ i - C \frac{du}{dt} = i_n \end{cases} \quad (1)$$

Отсюда получаем дифференциальное уравнение для напряжения  $u$  на нагрузке

$$C \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{u}{L} = \frac{e}{L} - \frac{di_n}{dt} \quad (2)$$

Задачей регулирования компенсатора неактивной мощности КНМ является стабилизация напряжения на нагрузке, поэтому получим из (2) выражение для действующего значения этого напряжения, считая на первом этапе расчета все процессы синусоидальными. В соответствии с процедурой алгебраизации уравнения (2) в методе АДУ(1) [5] получаем выражение в относительных единицах для действующего значения первой гармоники напряжения на нагрузке, приняв за базовые величины номинальное значение напряжения бортовой сети  $V_H$ , номинальный ток потребителя  $I_H$ , номинальный модуль сопротивления потребителя:

$$Z_n = V_n / I_n \quad (3)$$

Обозначая все относительные величины звездочкой у переменной, т.е.:

$$E^* = E / V_n, V^* = V / V_n, X_C^* = 1 / (\omega C \cdot Z_n), X_L^* = \omega \cdot L / Z_n$$

Уравнение для напряжения сети примет следующий вид

$$(V^*)^2 \cdot \left(1 - \frac{X_C^*}{X_L^*}\right) = (X_C^*)^2 \cdot \left[\left(\frac{E^*}{X_L^*}\right)^2 + (I_n^*)^2 - \frac{2E^* \cdot I_n^* \cdot \sin \psi}{X_L^*}\right] \quad (4)$$

Необходимо найти зависимость  $X_C^*$ , а значит и тока компенсатора  $I_k^*$

$$I_k^* = I_k / I_n = V^* / X_C^* = 1 / X_C^*, \text{ при } V^* = 1$$

от варьируемых параметров системы  $E^*, I_n^*, X_L^*, \sin \psi$ . Для этого придадим уравнению (4) форму квадратного уравнения относительно искомой переменной:

$$(X_C^*)^2 - A \cdot X_C^* + B = 0 \quad (5)$$

Где А и В соответствующие коэффициенты уравнения:

$$A = \frac{2X_L^* \cdot (V^*)^2}{(V^*)^2 - \left[\left(\frac{E^*}{X_L^*}\right)^2 + (I_n^*)^2 - 2\frac{E^* \cdot I_n^* \cdot \sin \psi}{X_L^*}\right] \cdot X_L^*} \quad (6)$$

$$B = \frac{(X_L^* \cdot V^*)^2}{(V^*)^2 - \left[\left(\frac{E^*}{X_L^*}\right)^2 + (I_n^*)^2 - 2\frac{E^* \cdot I_n^* \cdot \sin \psi}{X_L^*}\right] \cdot X_L^*} \quad (7)$$

Его решение:

$$X_C^* = \frac{A}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)^2 - B} \quad (8)$$

Обратная величина  $X_C^*$  определяет относительный ток компенсатора и относительную полную мощность компенсатора, т. к.

$$I_k^* = I_k / I_n = V_n \cdot \omega L / I_n = 1 / X_C^* \text{ при } V = V_n, S_k^* = V_n^* \cdot I_n^* = I_n^*$$

На рис. 3 построены графики зависимостей  $X_C^*$  и  $I_k^*$  от  $E^*$  при двух значениях  $X_L^*$ , равным 0.25 и 0.5 что соответствует четырехкратным и двукратным токам короткого замыкания генератора, а на рис. 4 – зависимости этих же переменных от тока нагрузки при  $\sin \psi = 0.6$

(На рис. 3 и рис. 4 пустые маркеры – первичная ось Y, заполненные маркеры – вторичная ось Y).

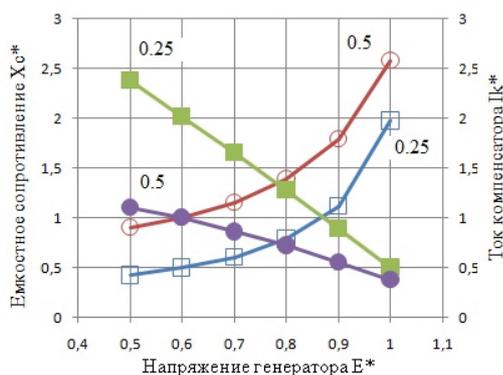


Рис. 3

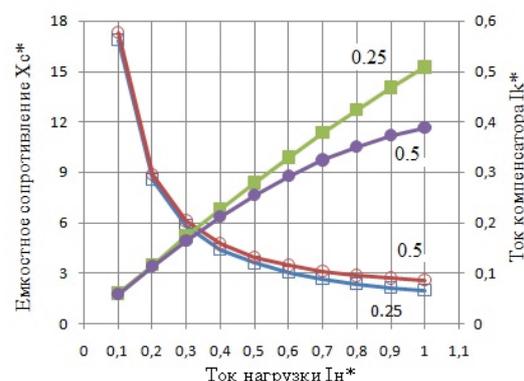


Рис. 4

Таким образом, наибольшая полная мощность компенсатора при выборе  $V_n^* = E_{max}^* = 1$  и регулировании эдс генератора вниз в 2 раза, как видно из графика равна  $S_K^* = 2.38$ . Уравнение для тока генератора также получим из (1):

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{i}{LC} = \frac{1}{L} \cdot \frac{de}{dt} + \frac{i_n}{LC} \tag{9}$$

Для решения этой задачи воспользуемся методом АДУ с применением метода пространственного состояния. В рамках этого метода, получим:

$$\begin{pmatrix} 0 & -wL & 1 & 0 \\ wL & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & wC \\ 0 & 1 & -wC & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_a \\ I_p \\ V_a \\ V_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ 0 \\ I_{Ha} \\ I_{Hp} \end{pmatrix}$$

Далее получим формулу для нахождения тока генератора:

$$I^* = \sqrt{\left(\frac{I_a}{1 - w^2 LC}\right)^2 + \left(\frac{I_p}{1 - w^2 LC}\right)^2} \tag{10}$$

На рис. 5 и рис. 6 построены графики зависимости тока асинхронного генератора от эдс генератора (скорости его вала) и тока потребителя также для двух значений  $X_C^* = 0,25$  и  $0,5$ . При этом значения  $X_C^*$  в формуле брались из соответствующих графиков для  $X_C^*$  на рис. 3.

(На рис. 5 пустые маркеры – первичная ось Y, заполненные маркеры – вторичная ось Y).

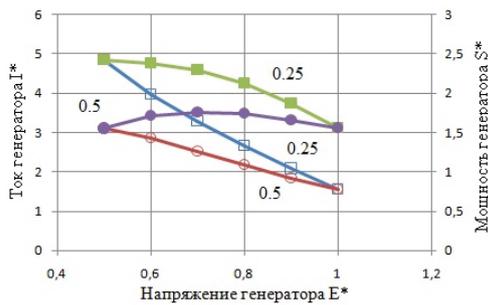


Рис. 5

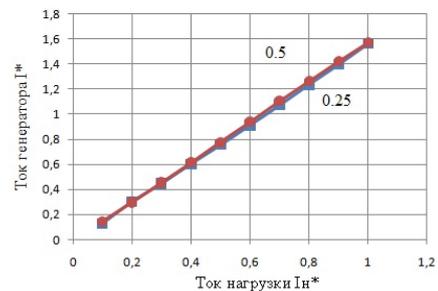


Рис. 6

Здесь же (рис. 5) построена зависимость для полной мощности генератора, вычисляемая как:

$$S^* = E^* \cdot I^* \tag{11}$$

Как видно из графика на рис.5, наибольшая мощность генератора составляет  $S^* = 2.42$ .

При наличии в потребителе источника высших гармоник тока напряжение бортовой сети исказится. Поэтому необходимо оценить коэффициент гармоник напряжения сети, что выполнимо методом АДУ2 расчета по высшим гармоникам [5]. Схема замещения бортовой системы генерации по высшим гармоникам представлена на рис. 7.

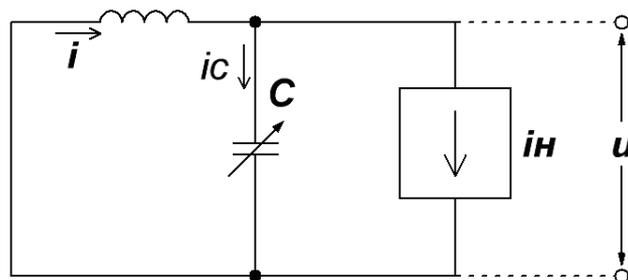


Рис. 7

Дифференциальное уравнение для напряжения высших гармоник имеет вид:

$$C \frac{du_{62}}{dt} + \frac{1}{L} \cdot u_{62} = i_{н62} \quad (12)$$

Построим решение для коэффициента гармоник напряжения сети в рамках второго уровня допущений в методе АДУ1 для повышения точности решения. Проинтегрируем уравнение (12) два раза, полученную систему интегральных уравнений алгебраизируем методом АДУ2 и решим систему алгебраических уравнений относительно  $V_{62}^*$ .

$$u_{62} + \frac{1}{LC} \cdot u_{62} = \frac{1}{C} \cdot \bar{i}_{н62} \quad (13)$$

$$\bar{u}_{62} + \frac{1}{LC} \cdot \bar{u}_{62} = \frac{1}{C} \cdot \bar{i}_{н62} \quad (14)$$

В итоге вышеупомянутых преобразований получаем:

$$K_z^2 = \frac{V_{62}^2}{V_n^2} = (X_C^* \cdot I_{н(1)}^* \cdot \bar{K}_{zm})^2 - 2 \frac{(X_C^*)^4}{(X_L^*)^2} \cdot (I_{н(1)}^* \cdot \bar{K}_{zm})^2 \quad (15)$$

По этому отношению на рис. 8 построены зависимости коэффициента гармоник напряжения от относительного значения  $X_C^*$ .

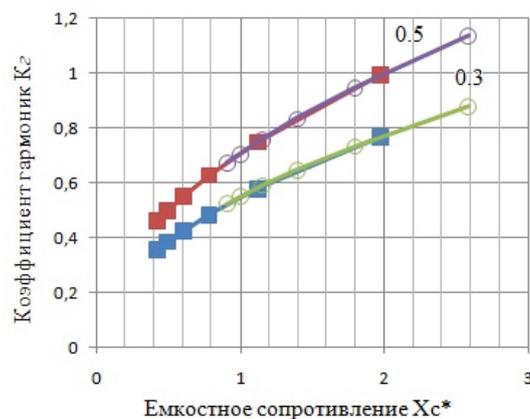


Рис. 8

Диапазон изменения коэффициента гармоник определяется по графикам рис. 3, при двух значениях  $X_L^*$  - 0,25 (квадратный маркер) и 0,5 (круглый маркер), значения  $\bar{K}_{zm} = 0,05$  и  $\bar{K}_{zm} = 0,01$  взяты для тока неуправляемого выпрямителя по трехфазной мостовой схеме [7] при доле этого тока  $I_{н(1)}^* = 0,3$  и  $0,5$  от общего тока потребителя.

### Выводы

Полная мощность компенсатора и полная мощность генератора, при четырехкратном токе короткого замыкания, как видно из рис. 3 и рис. 4 (вторичные оси  $Y$  – заполненный маркер), составляют  $S_k^* = 2,38$  и  $S^* = 2,42$  соответственно. Полная мощность компенсатора при тех же условиях при использовании синхронного генератора (СГ) составляет  $S_k^* = 4,7$ , а полная мощность СГ составляет  $S^* = 5,35$  [1].

Качество электроэнергии во всем диапазоне на уровне ГОСТ, оцениваемое коэффициентом искажения напряжения бортовой сети, не может быть обеспечено без фильтра, что следует из графиков (рис. 4). Другой путь обеспечения ЭМС нелинейного потребителя (неуправляемого выпрямителя) связан с использованием активного выпрямителя у потребителя, имеющего практически синусоидальный входной ток [7].

### Список литературы

1. Bansal A. B. Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview. IEEE transactions on energy conversion, vol. 20, no. 2, june 2005, p. 292- 299.
2. Bansal A. B., Bhatti T. S., and Kothari D. P. Bibliography on the Application of Induction Generators in Nonconventional Energy Systems. IEEE transactions on energy conversion, vol. 18, no. 3, september 2003, p. 433- 439.
3. Nicolich A., Jęftenic B. Current source converter topologies for PMSG wind turbine application/ Proc. ConfEPE-PEMC2010, 2010, CD, p. S14-27—S14-32.

4. Гейст А. В., Коробков Д. В., Макаров Д. В., Решетников А. Н., Харитонов С. А. Стабилизация выходного напряжения синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов при переменной частоте вращения вала.
5. Зиновьев Г. С. Основы Силовой Электроники. Новосибирск, НГТУ, 4<sup>е</sup> изд. 2009, 672 с.
6. Зиновьев Г. С., Клан В. А., Петров М. А., Щербелев А.А. Электромагнитная совместимость устройств силовой электроники. Ч.1 Методическое руководство к практическим занятиям. Новосибирск, НГТУ, 2005, 48 с.
7. Зиновьев Г.С., Попов В.И., Амброзевич Р.С., Баулин В.Г., Волков А.В., Митряшкина А.И., Светлосанова О.В., Снытко С.С. Электромагнитная совместимость устройств силовой электроники. Ч.2 Методическое руководство к практическим занятиям. Новосибирск, НГТУ, 2006, 87 с.
8. Костырев М.Л., Скороспешкин А.И. Автономные асинхронные генераторы с вентильным возбуждением. М.: Энергоатомиздат 1993.
9. Левин А. В., Алексеев И. И., Харитонов С. А., Ковалев Л. К. Электрический самолет: от идеи до реализации. // Машиностроение. 2010 – 288 с.
10. Торонцев Н.Д. Асинхронные генераторы для автономных энергетических установок. Приложение к журналу “Энергетик” 2004.

#### STAND-ALONG SYSTEM OF ELECTROSUPPLY ON THE BASIS OF THE INDUCTION GENERATOR AND CURRENT COMPENSATOR

A. G. Volkov, g.s., G. S. Zinoviev, prof., A.V. Sidorov, m.d., S .A. Kharitonov, prof.  
Novosibirsk State Technical University, Prospect K.Marksa 20, 630073, Russia  
Tel. 7(383)346-08-66, e-mail: genstep@mail.ru

*The possibility of building an aircraft power supply system based on an asynchronous generator investigated. One of the key features of this system is usage of a current source inverter (CSI) for induction machine self-excitation. Besides, induction machine output voltage stabilization is achieved at variable shaft speed operating conditions. Moreover, generator output voltage distortion is compensated in case of non-linear or unbalanced loads. As the power converter a current source inverter is used. This allows one not to use dc-link capacitor which has well known limitations. A mathematical model of the system is proposed. In order to obtain power quality indices the algebraization of the differential equations method (ADE) is used. The results of analytical calculations are presented.*

**Keywords:** Stand-alone system, Induction Generator, Reactive power compensator, Current source inverter

1. Bansal A. B. Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview. IEEE transactions on energy conversion, vol. 20, no. 2, june 2005, p. 292- 299.
2. Bansal A. B., Bhatti T. S., and Kothari D. P. Bibliography on the Application of Induction Generators in Nonconventional Energy Systems. IEEE transactions on energy conversion, vol. 18, no. 3, september 2003, p. 433- 439.
3. Nolic A., Jefenic B. Current source converter topologies for PMSG wind turbine application/ Proc. ConfEPE-PEMC2010, 2010, CD, p. S14-27—S14-32.
4. Geist A.V., Korobkov D.V., Makarov D.V., Reshetnicov A.N., Kharitonov S.A. Stabilization of the output voltage of the synchronous generator with permanent magnets with variable speed shaft. (Rus.)
5. Zinoviev G.S. Fundamentals of power electronics, Novosibirsk, NGTU, 4izd. 2009. 672 p. (Rus.)
6. Zinoviev G.S., Klan V.A., Petrov M.A., Sherbelev A.A. Electromagnetic compatibility of power electronics. P.1 Methodological guide for practical training. Novosibirsk, NSTU, 2005, 48 p. (Rus.)
7. Zinoviev G.S., Popov V. I., Ambrozevich R.S., Baulin V.G., Volkov A.V., Mitriashkina A.I., Svetlosanova O.V., Snitko S.S. Electromagnetic compatibility of power electronics. P.2 Methodological guide for practical training. Novosibirsk, NSTU, 2006, 87 p. (Rus.)
8. Kostirev M.L., Skorospeshkin A.I. Autonomous induction generators with brushless excitation. М.: Energoatomizdat 1993. (Rus.)
9. Levin A.V., Alekseev I.I., Kharitonov S.A., Kovalev L.K. Electric plane: from idea to realization. // Mashinostroenie. 2010 – 288 p. (Rus.)

10. *Toropcev N.D.*. Asynchronous generators for autonomous power plants. Supplement to the journal "Energetic" 2004. (Rus.)