

УДК 621.313.332

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ВЕКТОРНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

А. В. Джура

Институт электродинамики НАН Украины
просп. Победы, 56, г. Киев, 03680, Украина. E-mail: mlins@ied.org.ua

Рассмотрен алгоритм управления трехфазным автономным генератором с короткозамкнутым ротором и многофункциональной полупроводниковой системой возбуждения, подключенной к фазам статора. Генератор предназначен для питания потребителей постоянного тока напряжением стабилизированной величины. Рассмотренный алгоритм можно классифицировать как векторный с ориентацией по потокоцеплению статора. Его преимуществом перед известными является простота и малая чувствительность к изменению параметров машины. В качестве подтверждения работоспособности предложенного алгоритма приведены результаты численного расчета установившихся электромагнитных процессов при постоянной частоте вращения ротора.

Ключевые слова: асинхронный генератор, векторное управление, вентильный преобразователь, постоянный ток.

МОДИФІКОВАНИЙ ВЕКТОРНИЙ АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМ АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ

О. В. Джура

Институт електродинаміки НАН України
просп. Перемоги, 56, м. Київ, 03680, Україна. E-mail: mlins@ied.org.ua

Розглянуто алгоритм керування трифазним автономним генератором із короткозамкнутим ротором і багатофункціональною напівпровідниковою системою збудження, яка підключена до фаз статора. Генератор призначений для живлення користувачів постійного струму напругою стабілізованої величини. Розглянутий алгоритм можливо класифікувати як векторний з орієнтацією за потокозчепленням статору. Його перевагою над відомими є простота і мала чутливість до зміни параметрів машини. Підтвердженням працездатності запропонованого алгоритму є результати чисельного розрахунку усталених електромагнітних процесів за постійної частоти обертання ротора.

Ключові слова: асинхронний генератор, векторне керування, вентильний перетворювач, постійний струм.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Генераторы постоянного тока (ГПТ) находят применение в системах электропитания судов (подзаряд аккумуляторов, питание цепей управления, освещения и пр.), автомобильного и железнодорожного транспорта, в энергетике, при ремонтно-строительных работах. Коллекторные ГПТ обладают хорошими регулировочными свойствами и большой перегрузочной способностью. Вместе с тем они достаточно дороги и требуют частого технического обслуживания. Особенно это касается щеточно-коллекторного механизма. Поэтому в настоящее время они вытесняются машинно-вентильными ГПТ (МВГПТ). МВГПТ выполняются, как правило, на основе синхронных машин (СМ) с электромагнитным возбуждением. Также в составе МВГПТ имеется выпрямитель, нагрузки постоянного тока которого подключаются к нагрузке. Если от ГПТ требуется высокая стабильность выходного напряжения при колебаниях частоты вращения, бесконтактное исполнение, высокая устойчивость к вибрациям, малый уровень шумов, быстрое затухание переходных электромагнитных процессов, то целесообразно в этом случае применять асинхронный генератор (АГ) с вентильным возбуждением (ВВ) по цепям статора [1].

Поскольку, надежность и эксплуатационные свойства АГ с ВВ в большой мере зависят от особенностей выбранного алгоритма управления, то

разработка и исследование эффективности таких алгоритмов является важной задачей. Рассмотренная в рамках данной статьи блок-схема алгоритма управления АГ с ВВ предлагается как один из вариантов решения этой задачи.

Цель работы – рассмотрение модифицированного векторного алгоритма управления автономным асинхронным генератором как одного из вариантов решения задач надежности и эксплуатационных свойств асинхронного генератора с вентильным возбуждением.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Силовая часть АГ с ВВ (рис. 1) включает трехфазную асинхронную машину (АМ) и вентильный преобразователь (ВП), собранный по схеме трехфазного мостового инвертора.

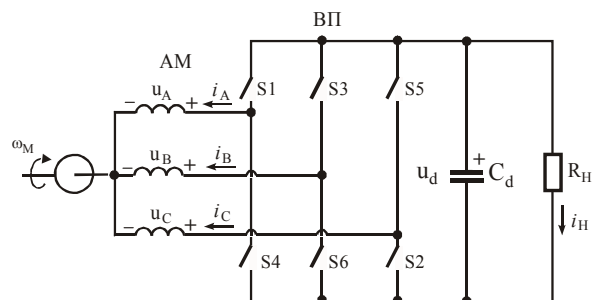


Рисунок 1 – Схема АГ с вентильным возбуждением

К зажимам постоянного тока ВП подключена нагрузка R_H . ВП осуществляет возбуждение АГ и стабилизирует напряжение на нагрузке. Начальное возбуждение АГ с ВВ производится либо от остаточного потока намагничивания, либо, что более надежно, от аккумуляторной батареи (АБ) небольшой емкости в цепи постоянного тока ВП. АБ подключается к зажимам ВП через полупроводниковый диод и в дальнейшем после возбуждения АГ может быть отключена.

Из известных принципов регулирования напряжения АГ с ВВ наибольшей простотой в реализации отличается частотный [1]. Частотное регулирование подразумевает изменение частоты управляющих импульсов полупроводниковых ключей ВП с целью изменения скольжения АГ и как следствие его выходной мощности (напряжения).

Чтобы реализовать простейшую частотную систему управления (СУ), требуется лишь два датчика (напряжения и частоты вращения ротора). Для реализации же векторного принципа регулирования [4] необходимо дополнительно располагать датчиками тока и производить вычисления, оперируя с параметрами машины, что порождает проблему точного определения этих параметров (активное и реактивное сопротивление рассеяния, индуктивность взаимной индукции).

Учитывая изложенное, была разработана модифицированная векторная блок-схема алгоритма управления (рис. 2), которая объединяет в себе преимущества частотного и векторного принципов управления, а именно, простоту и раздельное регулирование насыщения и электромагнитного момента АГ.

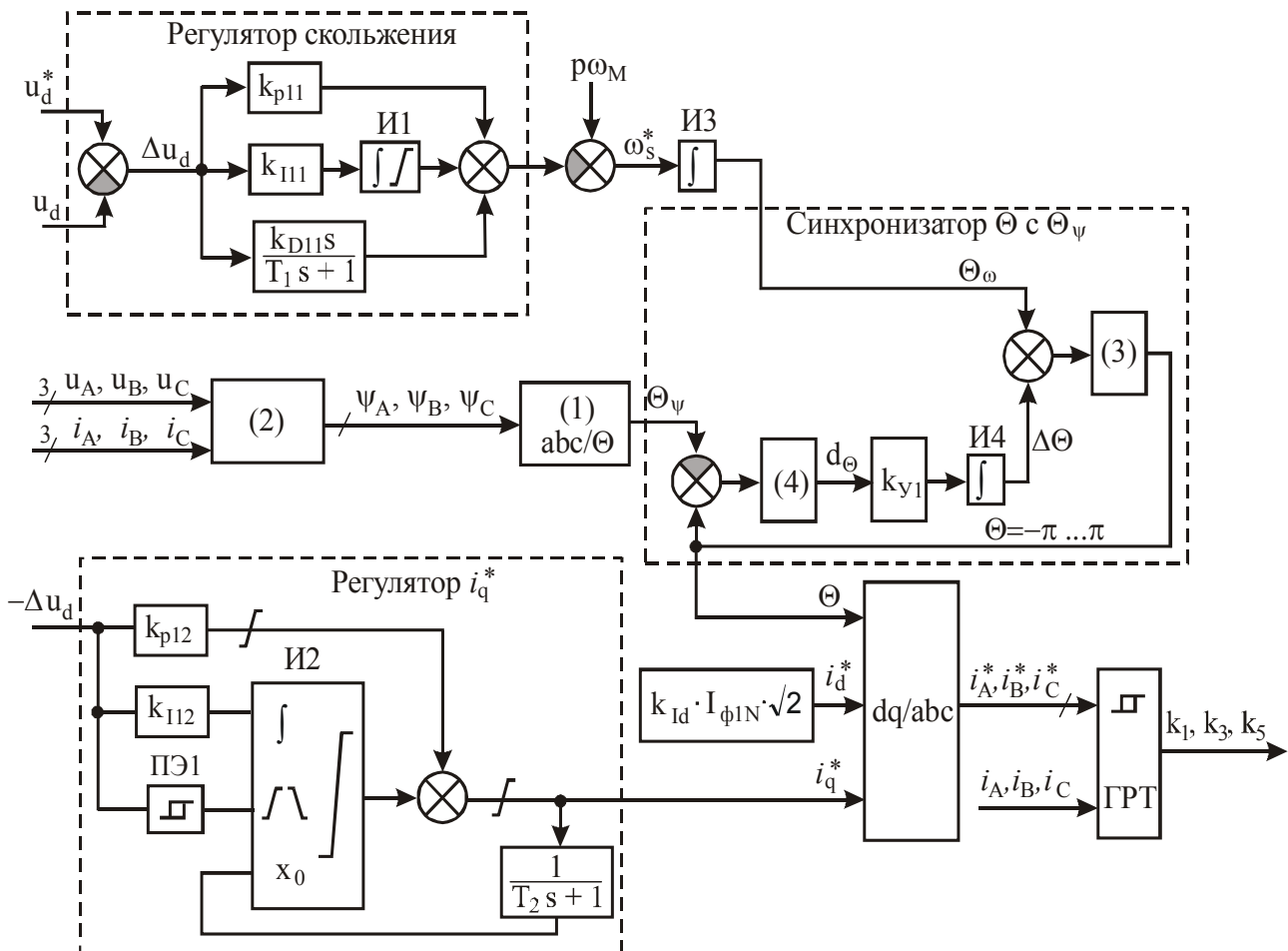


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма управления ВП

Рассмотрим кратко, как она функционирует.

Регулятор скольжения усиливает сигнал рассогласования между заданным u_d^* и фактическим u_d значениями напряжения на зажимах постоянного

тока вентильного преобразователя. Сигнал на выходе этого регулятора равен заданной величине угловой частоты скольжения.

Вычитая заданную величину частоты скольжения из угловой электрической частоты вращения

ротора $p\omega_M$ (p – число пар полюсов), отримаємо задану кругову частоту вращення поля ω_s^* .

В іншому структурі блок-схеми реалізує векторний принцип регулювання по потокозчепленню статора. Додаткові елементи, які необхідні для усунення взаємного впливу контурів регулювання моменту і струму намагнічування, в даній роботі не розглядаються.

Кут повороту результуючого вектора потокозчеплення статора визначається в блоці abc/Θ з вираження [2]

$$\Theta_\Psi = \arctg Y/X + \pi \cdot \text{sign}Y \cdot (\text{sign}X)^2 \cdot (1 - \text{sign}X)/2, \quad (1)$$

де $X = \sqrt{3}(\Psi_C - \Psi_B)/2$, $Y = 1,5\Psi_A$, $\text{sign}X(Y) = 0$ при $X(Y) = 0$, $\text{sign}X(Y) = 1$ при $X(Y) > 0$, інакше -1 .

Миттєві значення потокозчеплень фаз статора розраховуються через виміряні фазні струми i_A, i_B, i_C і напруги u_A, u_B, u_C

$$\Psi_{A(B,C)} = \int (u_{A(B,C)} - r_1 i_{A(B,C)}) dt. \quad (2)$$

При практичній реалізації алгоритму напруги u_A, u_B, u_C можна визначати через комутаційні функції ключів ВП і напругу u_d в ланці постійного струму виходячи з виражень приведених в [3].

Сигнал Θ_Ψ не використовується напряму, а лише для того, щоб синхронізувати Θ з Θ_Ψ .

В початковий момент на виході інтегратора $I4$ синхронізатора Θ з Θ_Ψ нульовий сигнал $\Delta\Theta = 0$. Сума $\Delta\Theta$ і Θ_ω перетворюється в Θ на основі наступної залежності:

$$\Theta = 2\pi[(\Theta_\omega + \Delta\Theta)/2\pi - \text{fix}((\Theta_\omega + \Delta\Theta)/2\pi)] - \pi, \quad (3)$$

де fix – функція, округлює свій аргумент до найближчого до нуля цілого. В результаті кут Θ дорівнює $\Theta_\omega + \Delta\Theta$, обмеженому межами $-\pi \dots \pi$ ($\Theta_\omega = 0 \dots \infty$). При наявності розбіжності між Θ_Ψ і Θ , вона коректується так, щоб її значення привести, як і Θ , до діапазону $-\pi \dots \pi$ (до періодичної функції)

$$d_\Theta = \Theta_\Psi - \Theta + 2\pi \cdot \text{sign}(\Theta - \Theta_\Psi) \cdot \text{fix}(\Theta - \Theta_\Psi), \quad (4)$$

а потім посилюється елементами гілки зворотного зв'язу K_{y1} і $I4$, що призводить до поступового зменшення цієї розбіжності.

Задана величина струму АГ i_q^* в системі координат dq вращаючої синхронно з результую-

чим вектором потокозчеплення визначається після посилення сигналу $-\Delta u_d$ регулятором i_q^* . Інтегратор $I2$ регулятора охопчений зворотним зв'язом для більш швидкого виходу в установившийся режим. Сигнал зворотного зв'язу з виходу регулятора посилюється апериодическим зв'язом і поступає на вхід x_0 $I2$. При зміні знака Δu_d (по фронту) $I2$ встановлює свій вихідний сигнал рівним присутньому на вході x_0 , а в інше час виробляє неперервне інтегрування. Величина заданого струму i_d^* , який визначає насичення АГ, задана фіксованою $i_d^* = K_{Id} \cdot I_{\phi N} \cdot \sqrt{2}$, де $I_{\phi N}$ – дійсуюче значення номінального фазного струму АМ.

Розраховані значення струмів машини i_d^*, i_q^* з двохфазної системи координат перетворюються координатним перетворювачем dq/abc в трифазну систему

$$\begin{aligned} i_A^* &= i_d^* \sin \Theta + i_q^* \cos \Theta, \quad i_C^* = -i_A^* - i_B^*, \\ i_B^* &= 0,5 i_q^* (\sqrt{3} \sin \Theta - \cos \Theta) - 0,5 i_d^* (\sin \Theta + \sqrt{3} \cos \Theta). \end{aligned}$$

Гистерезисний регулятор струму (ГРТ) формує логічні сигнали управління k_1, k_3, k_5 ключами $S1, S3, S5$, сопоставляючи фактичне і задане значення струму кожної фази. Ключі $S4, S6, S2$ управляються в протифазу до $S1, S3, S5$.

Роботоспосібність розглянутого алгоритму була перевірена шляхом чисельного розрахунку електромагнітних процесів в АГ (рис. 1). Повна математическа модель генератора включає взаємозв'язані моделі АМ, ВП, привода [3] і системи управління. В ході чисельного експерименту було прийнято наступне:

- АГ виконаний на основі асинхронної машини з короткозамкнутим ротором, номінальна потужність якої 75 кВт, $p=2$ (число пар полюсов), номінальний фазний струм $I_{\phi N} = 135,8$ А;

- насичення враховується по основній гармоніці поля виходячи з розрахованої характеристики х.х. [2], параметри розсіювання постійні;

- частота вращення ротора постійна $\omega_M = 157$ рад/с;

- ключі ВП ідеальні, $C_d = 0,15$ Ф;

- параметри СУ (рис. 2): $K_{P11} = 0,8$, $K_{I11} = 0,08$, $K_{D11} = 0,02$, $T_1 = 0,05$ с, $K_{P12} = 20$, $K_{I12} = 120$, $T_2 = 0,1$ с, $K_{Id} = 0,4$, $K_{y1} = 10$;

- входні рівні спрацювання порогових елементів ГРТ $\pm 2,0$ А;

– нагрузка генератора активная, заданное напряжение на нагрузке $u_d^* = 700 \text{ В}$.

Результаты моделирования установившихся режимов работы АГ приведены на рис. 3 и 4. На графиках приведены временные диаграммы изменения угла поворота результирующего вектора потокосцепления Θ статора, тока нагрузки i_H , фазного тока i_A и первой гармоники напряжения фазы А $u_{A(1)}$ генератора (рис. 3,а, 4,а), а также напряжение фазы А u_A (рис. 3,б, 4,б), в режиме малой нагрузки с сопротивлением $R_H = 1500 \text{ Ом}$ (рис. 3) и большой нагрузки постоянной величины с сопротивлением $R_H = 11 \text{ Ом}$ (рис. 4).

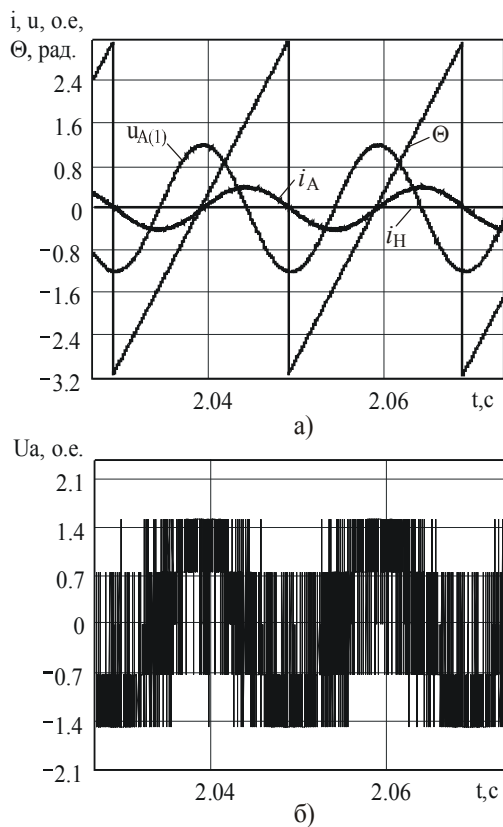


Рисунок 3 – Осциллограммы токов и напряжений ($R_H = 1500 \text{ Ом}$)

За 1 о.е. напряжений принято $220\sqrt{2} \text{ В}$, за 1 о.е. фазного тока – амплитуда номинального фазного тока ($135,8\sqrt{2} \text{ А}$), за 1 о.е. тока нагрузки – ток $85,7 \text{ А}$, при котором выходная мощность АГ составляет $\sim 80\%$ от номинальной мощности АМ.

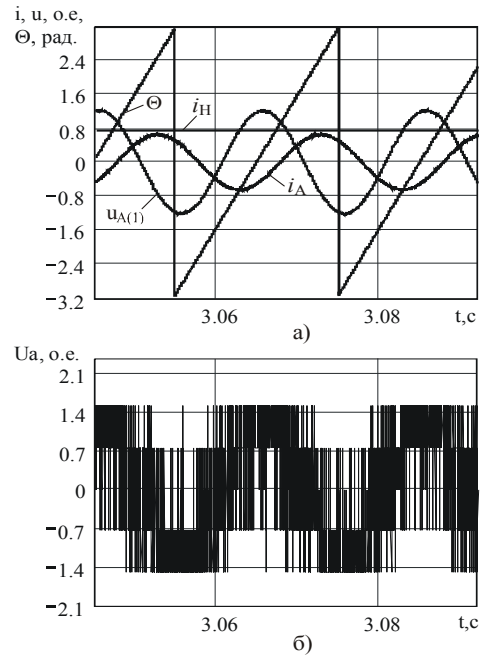


Рисунок 4 – Осциллограммы токов и напряжений ($R_H = 11 \text{ Ом}$)

Как видно из рис. 3 и 4, при нагрузке $R_H = 1500 \text{ Ом}$ фазовый сдвиг между фазным током i_A и напряжением $u_{A(1)}$ близок к 90° , а при $R_H = 11 \text{ Ом}$ увеличивается до $\sim 126^\circ$, что соответствует теории АГ с ВВ [1]. Амплитуда пульсаций тока i_H составила $0,0017\%$ при $R_H = 1500 \text{ Ом}$ и $0,0028\%$ при $R_H = 11 \text{ Ом}$. Полученные результаты подтверждают работоспособность и эффективность предложенной структуры блок-схемы алгоритма управления вентильной системой возбуждения АГ.

ВЫВОДЫ. Предложена структура блок-схемы алгоритма векторного управления АГ с вентильным возбуждением по цепям статора. Ее особенностью является определение частоты первой гармоники тока вентильного преобразователя подобно частотным системам управления, с помощью простейшего регулятора частоты скольжения.

Полученный в результате интегрирования заданного значения угловой частоты статорного напряжения сигнал является ориентировочным углом поворота вектора поля и непрерывно корректируется таким образом, чтобы поддерживалась его синхронность с углом поворота вектора потокосцепления, вычисленного через потокосцепление фаз статора.

Необходимо отметить, что использование напрямую определенного через потокосцепление фаз статора угла поворота вектора поля для формирования заданных токов преобразователя в случае вен-

тильного возбуждения проблематично и приводит к неустойчивой работе генератора.

Дальнейшим направлением работы по усовершенствованию алгоритмов управления АГ с ВВ может быть переход к бесдатчиковому определению частоты вращения ротора, поскольку отказ от использования датчиков частоты вращения (оптических, магнитных) способствует увеличению надежности всего устройства.

Также актуальными являются исследования в области векторного управления многообмоточных АГ с вентильным возбуждением по цепям статора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазуренко Л.И., Лищенко А.И. Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок. – Київ: Наукова думка, 2011. – 272 с.

2. Джюра О.В. Гідродизельна автономна енергосистема з асинхронними генераторами // Гідроенергетика України. – 2013. – № 3–4. – С. 40–46.

3. Мазуренко Л.И., Джюра О.В., Диннік Л.М., Білик О.А. Математична модель асинхронних генераторів з вентильним збудженням автономної енергосистеми постійного струму // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 2/2013 (22), част. 2. – С. 321–326.

4. Потапенко Е.М., Шийка А.А. Робастное управление асинхронным электроприводом с минимизацией потребляемой мощности // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 2/2013 (22), част. 2. – С. 315–320.

MODIFIED VECTOR TECHNIQUE OF A SELF-EXCITED INDUCTION GENERATOR CONTROL

A. Dzhura

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine
prosp. Peremohy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine. E-mail: mlins@ied.org.ua

This article discusses a control methodology for squirrel cage three-phase self-excited induction generator with a multifunctional electronic excitation system connected to stator winding. The generator is intended for the direct current consumers with stabilized voltage. The considered methodology may be classified as stator oriented control one. Its advantage in comparison to known control schemes lies in simplicity and small sensitivity to the machine parameters deviations. As a confirmation of normal operation of the proposed methodology, the simulation results of steady-state electromagnetic processes with constant rotational speed are given.

Key words: induction generator, vector control, electronic converter, direct current.

REFERENCES

1. Mazurenko, L.I. and Lischenko, A.I. (2011), *Asinchronnie generatory s ventilnim i ventilno-emkostnim возбуждением для автономных энергоустановок* [Induction generators with electronic and electronic-capacitor excitation systems for autonomous energy sets], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.

2. Dzhura, O.V. (2013), “Hydro-diesel autonomous energy system with induction generators”, *Hydroenergetika Ukrainy*, no. 3–4, pp. 40–46.

3. Mazurenko, L.I., Dzhura, O.I., Dynnik, L.M. and Bilyk, O.A. (2013), “Mathematical model of induction generator with electronic excitation of the direct current autonomous grid”, *Electromechanichni i energozberigaiuchi systemy*, no. 2(22), part 2, pp. 321–326.

4. Potapenko, E.E. and Shiyka, A.A. (2013), “Robust loss-minimising control of induction motor drive”, *Electromechanichni i energozberigaiuchi systemy*, no. 2(22), part 2, pp. 315–320.

Стаття надійшла 25.05.2014.