

## АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С НЕРЕГУЛИРУЕМЫМИ ГИДРОТУРБИНАМИ

**Введение.** Электрификацию удаленных от электросетей малозаселенных территорий экономически целесообразно осуществлять путем создания небольших автономных трехфазных либо однофазных энергогенерирующих систем [1,2]. Их располагают в непосредственной близости от потребителей и рассчитывают на потребности данной местности. С учетом удорожания и истощения невозобновляемых источников энергии в этих энергосистемах предпочтительно использовать энергию ветра, малых рек, биогаз и т. д.. При наличии гидроресурсов генераторы часто выполняют на основе асинхронных машин (АМ) малой мощности (до 50 кВт) с емкостным возбуждением (ЕВ), а их привод из стоимостных соображений осуществляют от нерегулируемых гидротурбин [3]. Стабилизацию частоты выходного напряжения автономного асинхронного генератора (АГ) при постоянном напоре воды осуществляют с помощью регулируемой балластной нагрузки, установленная мощность которой равна номинальной мощности агрегата [3,4].

Большая установленная мощность балластной нагрузки, критичность к ее выходу из строя, непрерывная эксплуатация генератора в номинальном режиме, невозможность плавного отдельного регулирования частоты и амплитуды выходного напряжения являются основными недостатками асинхронных генераторов с ЕВ и приводом от нерегулируемых гидротурбин.

**Постановка задач исследования.** Целью данной работы является разработка схемного решения, математической модели и алгоритма управления АГ, в которых отсутствуют перечисленные недостатки. Для их устранения в схеме АГ применены полупроводниковые устройства, которые осуществляют регулирование возбуждения генератора, а также преобразование его выходного напряжения в напряжение постоянной частоты и амплитуды.

**Материалы исследования.** Предложенная схема автономного однофазного АГ с вентильно-емкостным возбуждением и постоянной частотой выходного напряжения показана на рис. 1. Она состоит из следующих

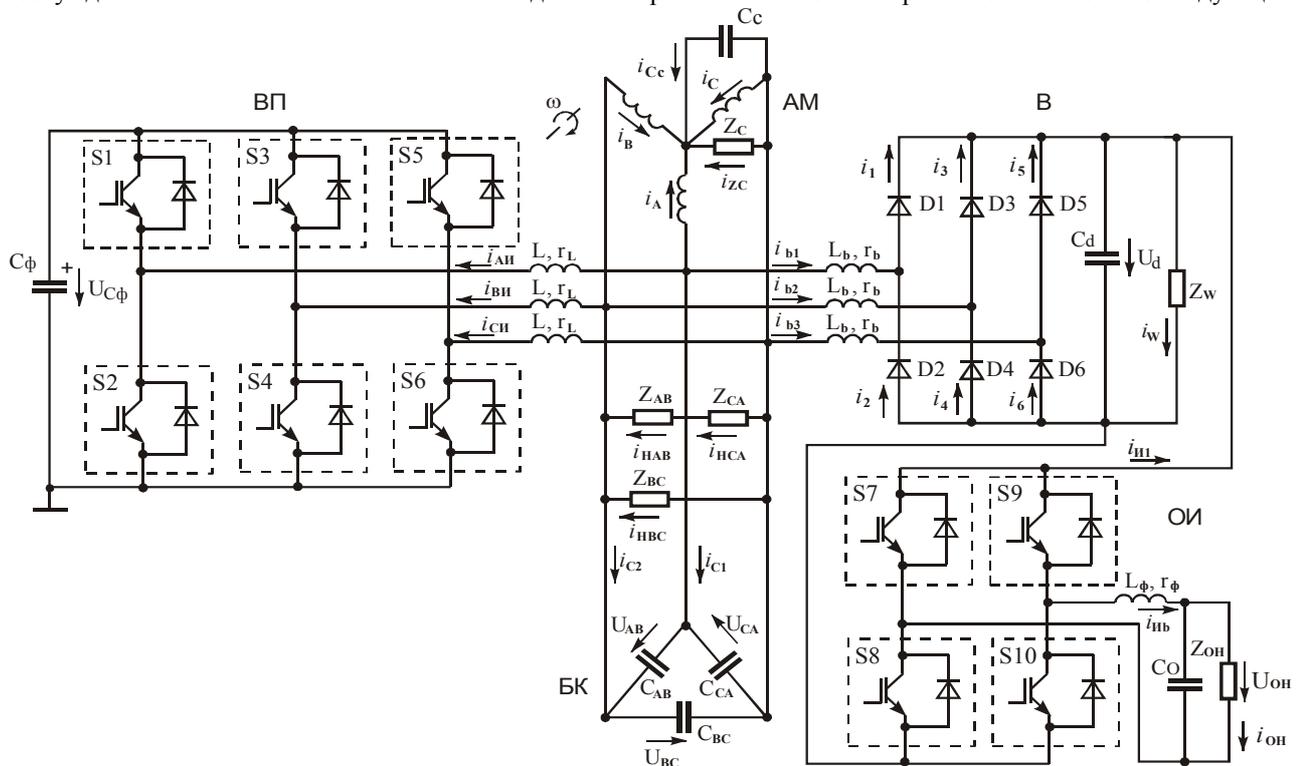


Рис.1. Схема силовой части АГ

структурных элементов: АМ, трехфазный вентильный преобразователь системы возбуждения (СВ), батарея конденсаторов (БК) начального возбуждения  $C_{AB}$ ,  $C_{BC}$ ,  $C_{CA}$ , балластные сопротивления  $Z_{AB}$ ,  $Z_{BC}$ ,  $Z_{CA}$ , трехфазный выпрямитель (В), однофазный инвертор (ОИ), работающий на нагрузку  $Z_{OH}$ . Вспомогательные

элементы  $C_C$ ,  $Z_C$ ,  $Z_W$  имеют пренебрежимо малые проводимости.  $C_C$  и  $Z_C$  введены в расчетную электрическую схему для облегчения математического описания АГ,  $Z_W$  - для контроля адекватности математической модели (ММ) выпрямителя.

#### Модель электрической машины

Система алгебро-дифференциальных уравнений в фазной системе координат А, В, С, которая описывает АМ с соединенными в "Δ" обмотками статора, приведена в [5]. Она была взята за основу и преобразована для включения АМ по схеме "Y" путем изменения уравнений, описывающих потокоцепления фаз А и В статора

$$\frac{d\Psi_A}{dt} = u_{AB} + u_{BC} + u_C - i_A r_1, \quad \frac{d\Psi_B}{dt} = u_{BC} + u_C - i_B r_1.$$

#### Уравнения емкостной части СВ

Система ДУ, описывающая напряжения на БК начального возбуждения, имеет вид [6]:

$$\frac{dU_{AB}}{dt} = \frac{C_{BC} i_{C1} - C_{CA} i_{C2}}{C_{AB} C_{CA} + C_{AB} C_{BC} + C_{BC} C_{CA}}, \quad \frac{dU_{BC}}{dt} = \frac{C_{AB} i_{C1} + (C_{AB} + C_{CA}) i_{C2}}{C_{AB} C_{CA} + C_{AB} C_{BC} + C_{BC} C_{CA}},$$

где

$$i_{C1} = i_A - i_{AI} - i_{b1} - i_{HAB} + i_{HCA}, \quad i_{C2} = i_B - i_{BI} - i_{b2} + i_{HAB} - i_{HBC}.$$

#### Уравнения нагрузки и вспомогательных элементов $C_C$ , $Z_C$ .

Закономерность изменения токов трехфазной активно-индуктивной балластной нагрузки АГ определяется системой ДУ

$$\frac{di_{HAB}}{dt} = (u_{AB} - r_B i_{HAB}) \frac{1}{L_B}, \quad \frac{di_{HBC}}{dt} = (u_{BC} - r_B i_{HBC}) \frac{1}{L_B}, \quad \frac{di_{HCA}}{dt} = (-u_{AB} - u_{BC} - r_B i_{HCA}) \frac{1}{L_B},$$

а тока и напряжения активно-индуктивного сопротивления  $Z_C$

$$\frac{di_{Zc}}{dt} = (u_C - r_{Zc} i_{Zc}) \frac{1}{L_{Zc}}, \quad \frac{dU_C}{dt} = \frac{i_{Cc}}{C_C} = \frac{-i_A - i_B - i_C - i_{Zc}}{C_C},$$

где  $r_B$ ,  $L_B$  - активное сопротивление и индуктивность балластной нагрузки,

$r_{Zc}$ ,  $L_{Zc}$  - активное сопротивление и индуктивность  $Z_C$ .

#### Модель вентиляльной части СВ

Если рассматривать каждую пару полупроводниковых элементов транзистор-обратный диод трехфазного ВП как единые идеальные ключи  $S_1 \div S_6$ , то его математическая модель сводится к системе трех ДУ [6]

$$\frac{di_{AI}}{dt} = \frac{u_{C\Phi}(k_5 + k_3 - 2k_1) - 3r_L i_{AI} + 2u_{AB} + u_{BC}}{3L}, \quad \frac{di_{BI}}{dt} = \frac{u_{C\Phi}(k_5 - 2k_3 + k_1) - 3r_L i_{BI} - u_{AB} + u_{BC}}{3L},$$

$$\frac{du_{C\Phi}}{dt} = \frac{k_1 i_{AI} + k_3 i_{BI} - k_5 (i_{BI} + i_{AI})}{C_\Phi},$$

где  $k_1, k_3, k_5$  - коммутационные функции, принимающие значения 0 или 1 в зависимости от того, закрыт либо открыт соответствующий ключ ( $S_1, S_3, S_5$ ).

#### Модель выпрямителя.

Для получения ММ выпрямителя в виде системы уравнений в форме Коши воспользуемся известной схемой замещения диода (рис. 2). Когда диод находится в проводящем состоянии, ключ Sw замкнут и активное сопротивление диода равно  $r_{од}$ , иначе -  $r_{од} + r_{зд}$ , где  $r_{зд}$  - сопротивление утечки ( $r_{зд} \gg r_{од}$ ).

На основании законов Кирхгофа после ряда преобразований приходим к следующей системе уравнений:

$$\frac{di_{b1}}{dt} = \frac{i_{b1}(6r_b + 3r_{од}) + r_{зд}(2k_{д1}(i_2 + i_{b1}) - 2k_{д2}i_2 - k_{д3}(i_4 + i_{b2}) + k_{д4}i_4 + k_{д5}(i_{b1} + i_{b2} - i_6) + k_{д6}i_6) - 2(u_{AB} + u_{BC})}{-3(L_d + 2L_b)},$$

$$\frac{di_{b2}}{dt} = \frac{i_{b2}(6r_b + 3r_{од}) + r_{зд}(-k_{д1}(i_2 + i_{b1}) + k_{д2}i_2 + 2k_{д3}(i_4 + i_{b2}) - 2k_{д4}i_4 + k_{д5}(i_{b1} + i_{b2} - i_6) + k_{д6}i_6) + 2(u_{AB} - u_{BC})}{-3(L_d + 2L_b)},$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{-1}{L_d(L_d + 2L_b)} \left( r_{од}i_2(L_d + 2L_b) + i_{b1}(r_{од}L_b - r_bL_d) + \frac{r_{зд}L_d b_1}{6} + \frac{u_d(L_d + 2L_b)}{2} + \frac{L_d(2u_{AB} + u_{BC})}{3} \right),$$

$$\frac{di_4}{dt} = \frac{-1}{L_d(L_d + 2L_b)} \left( r_{од}i_4(L_d + 2L_b) + i_{b2}(r_{од}L_b - r_bL_d) + \frac{r_{зд}L_d b_2}{6} + \frac{u_d(L_d + 2L_b)}{2} + \frac{L_d(u_{BC} - u_{AB})}{3} \right),$$

$$\frac{di_6}{dt} = \frac{1}{L_d(L_d + 2L_b)} \left( -r_{од}i_6(L_d + 2L_b) + i_{b1}(r_{од}L_b - r_bL_d) + \frac{r_{зд}L_d b_3}{6} - \frac{u_d(L_d + 2L_b)}{2} + \frac{L_d(u_{AB} + 2u_{BC})}{3} \right),$$

$$\frac{du_d}{dt} = \frac{i_2 + i_4 + i_2 - i_W - i_{W1}}{C_d}, \quad \frac{di_W}{dt} = (u_d - R_W i_W) \frac{1}{L_W},$$



$$E_S = I_S Z_{BX}.$$

Переходя к мгновенным значениям, получаем

$$\frac{di_S}{dt} = \frac{e_S - i_S r_\phi - (k_9 - k_7) u_d}{L_\phi}. \quad (1)$$

Уравнение (1) определяет расчетный ток, к которому следует приближать выходной ток ОИ  $i_{ИО}$  для получения выходного напряжения  $u_{ОН}$ , форма которого приближена к  $e_S$ . При определении  $i_S$  значения  $k_7$  и  $k_9$  берутся с предыдущего шага.

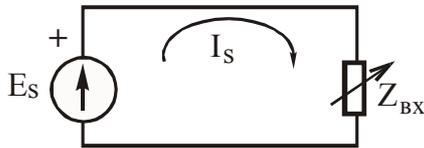


Рис.4. Схема замещения ОИ при работе на источник ЭДС

Для контроля адекватности ММ были проведены численные расчеты АГ, выполненного на базе АМ 4А100S2У3 мощностью 4 кВт при следующих параметрах:  $\omega_{РОЕ} = 1$ ,  $C_{AB} = C_{BC} = C_{CA} = 20\text{мкФ}$ ,  $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} = \infty$ ,  $Z_{ОН} = 21\text{Ом}$ ,  $C_0 = 5\text{мкФ}$ ,  $L_\phi = 0.004\text{Гн}$ ,  $r_\phi = 0.25\text{Ом}$ . Результаты расчетов приведены на рис. 5.

Полученная форма напряжений генератора с уплощенными вершинами (рис. 5 а) хорошо соответствует реальным кривым напряжений, имеющим место при работе автономных АГ на выпрямительную нагрузку.

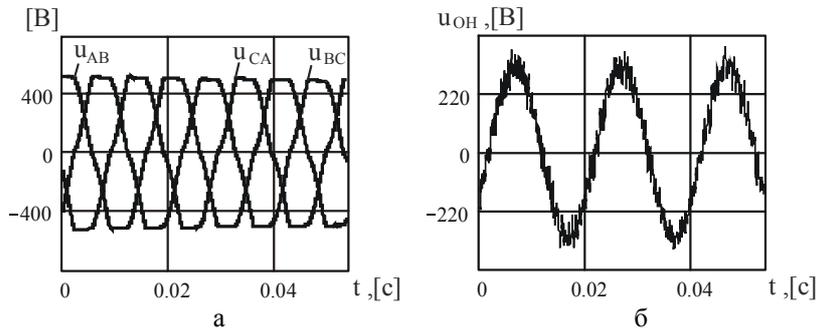


Рис.5. Линейные (а) и выходное (б) напряжения АГ

Качество выходного напряжения (рис. 5 б) при выбранном законе управления зависит от нагрузки и улучшается с ее ростом. Путем оптимизации структуры и параметров фильтра, что не было основной целью данной работы, форма  $u_{ОН}$  может быть улучшена.

**Выводы.** Рассмотренное схемное решение АГ позволяет создавать генераторы с постоянной частотой и плавно регулируемой величиной выходного напряжения, работающие от гидротурбин с переменной скоростью вращения. Нижняя граница допустимого диапазона скоростей вращения турбины для данного АГ составляет около 70% от номинальной паспортной скорости вращения АМ. Поскольку стабилизация механического момента в рабочем диапазоне частот вращения вала не требуется, то балластная нагрузка в рассмотренном АГ может быть значительно уменьшена либо исключена. Разработанная модель АГ позволяет с хорошей степенью адекватности выполнять моделирование установившихся и переходных процессов.

#### Литература.

1. E. G. Marra, J. A. Pomilio, "Self-excited induction generator controlled by a VS-PWM bidirectional converter for rural applications", IEEE Trans. On Ind. Appl., Vol. 35, No. 4, July/August 1999, pp. 877-883.
2. T. F. Chan, L. L. Lai, "Steady-state analysis and performance of a stand-alone three-phase induction generator with asymmetrically connected load impedances and excitation capacitances" IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 16, no. 4, pp. 327-333, December, 2001.
3. B. Singh, S.S. Murthy, S. Gupta, "Analysis and design of electronic load controller for self-excited induction generators", IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 21, No. 1, March 2006, pp. 285-293.
4. J. B. Ekanayake, "Induction generators for small hydro schemes", Power eng. journal, April 2002, pp. 61-67.
5. Лесник В.А., Мазуренко Л.И., Джура А.В., Дынник Л.Н. Математическая модель и алгоритм расчета режимов однофазного асинхронного генератора с вентильно-емкостным возбуждением //Технічна електродинаміка-2005.-№3.- С.44-48.
6. Мазуренко Л.И., Лесник В.А., Джура А.В., Дынник Л. Н. Моделирование и анализ трехфазного асинхронного генератора с вентильно-емкостным возбуждением и амплитудно-фазовым регулированием реактивного тока// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ (Матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації".- Кременчук, 2006). Вип.3/2006 (38) - Ч.1, С. 116-119.
7. Дослідження процесів електромеханічного перетворення енергії та розробка наукових основ енергоефективних електромашин з подовженням строком експлуатації: Звіт про НДР (Заключний)/ Інститут електродинаміки НАН України, № ДР 0102U005047. – Київ, 2006р.
8. J. Holtz, "Pulsewidth modulation for electronic power conversion", proceedings of the IEEE, Vol. 8, August 1994, pp. 1194-1214.