

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА БАЗЕ SIMINTECH АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН

С. В. Оськин, Н. С. Баракин, М. С. Христофоров

Многие ученые рассматривают режимы работы асинхронного генератора и предлагают математические модели для описания физических процессов, протекающих во время его работы. В большинстве своем рассматривается эквивалентная Т-образная или Г-образная схема замещения с подключенной активно-индуктивной нагрузкой. В основе расчета лежит определение баланса активных и реактивных проводимостей с учетом нелинейности характеристики намагничивания машины. Сам расчет без применения прикладного программного обеспечения отличается значительной трудоемкостью. Существующие графо-аналитические методы на основе круговых диаграмм на сегодняшний момент применяются редко в связи со сложностью реализации автоматизации расчетов. Все чаще появляются и используются специальные программы или программные комплексы, имитирующие работу электрооборудования в различных режимах, внешний вид блок-схемы имитационной модели представляется в виде принципиальной электрической схемы. В статье приведена проблема создания простой и наглядной блок-схемы имитационной модели асинхронного генератора для питания дождевальной машины. Предложена блок-схема имитационной модели в программном комплексе SimInTech, которая наглядно отражает основные особенности работы асинхронного генератора – наличие остаточной ЭДС, источника реактивной мощности, необходимого приводного момента и т.д. В результате моделирования получены зависимости частоты вращения, напряжения и тока от времени. Даны рекомендации по настройке блоков полученной модели и пояснения к полученным результатам. Полученные в ходе моделирования результаты сравнивались с экспериментально полученными данными, сходимость результатов находится в пределах 9%, измеренный ток нагрузки 0,8 А при напряжении 310 В.

*Ключевые слова:* асинхронный генератор, моделирование, осциллограмма, напряжение, дождевальная машина.

В статье [3] рассмотрено моделирование дождевальной машины кругового действия для равномерного орошения земель, где предлагалось равномерно распределить конденсаторы для уменьшения электрических потерь в линии и генераторе. Блок-схема имитационной модели (БСИМ) выполнена в отечественном программном комплексе SimInTech, который позволяет наглядно выполнить ее в виде блоков. Преимуществом использования такой программы является наличие библиотеки блоков, графически выполненных по ГОСТам, таким образом модель, выполненная в программе, выглядит как электрическая схема с возможностью настройки каждого элемента. Для предлагаемой модели предлагалось в качестве автономного источника использовать асинхронный генератор (АГ), так как конденсаторы, которые использовались для снижения

электрических потерь, одновременно будут являться конденсаторами возбуждения. Таким образом, данное техническое решение будет являться комплексным. Однако в предлагаемой БСИМ подробно не отражено математическое описание АГ, который представлен в модели блоком источника питания. В статье [3] не рассматривались основные режимы асинхронного генератора – самовозбуждение, наброс активной нагрузки, поэтому предлагается наиболее простой вариант исполнения БСИМ как доработка существующего блока «асинхронный электродвигатель», выполненный в программе SimInTech.

**Цель исследований** – разработать упрощенную блок-схему имитационной модели асинхронного генератора дождевальной машины для расчета основных режимов работы (процесс самовозбуждения и наброс нагрузки).



### Материал и методы исследования

Уравнения блока асинхронного двигателя (АД) библиотеки «ЭЦ-Динамика» программы SimInTech соответствуют Т-образной схеме замещения АД по осям q и d и основана на следующих уравнениях [2].

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega \Psi_{qs}; \\ u_{ds} = R_d i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega \Psi_{qs}; \\ u_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r Z_p) \Psi_{dr}; \\ u_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r Z_p) \Psi_{qr}; \\ M_e = 1,5 Z_p (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}); \\ \Psi_{qs} = (L_{\sigma s} + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr}; \\ \Psi_{ds} = (L_{\sigma s} + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr}; \\ \Psi_{qr} = (L_{\sigma r} + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs}; \\ \Psi_{dr} = (L_{\sigma r} + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds}; \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - M_c - \omega_r). \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $R_s, R_r$  – активные сопротивления статора и ротора;

$L_{\sigma s}, L_{\sigma r}, L_m$  – индуктивности рассеяния статора, ротора и цепи намагничивания соответственно;

$U_{ds}, i_{ds}, \Psi_{ds}, U_{dr}, i_{dr}, \Psi_{dr}$  – проекции напряжения, тока и потокосцепления статора и ротора на ось d соответственно;

$U_{qs}, i_{qs}, \Psi_{qs}, U_{qr}, i_{qr}, \Psi_{qr}$  – проекции напряжения, тока и потокосцепления статора и ротора на ось q соответственно;

$\omega_r$  – угловая частота вращения ротора;

$Z_p$  – число пар полюсов;

$M_e$  – электромагнитный момент;

$M_c$  – момент сопротивления;

$J$  – момент инерции;

$F$  – коэффициент вязкого трения.

Для реализации генераторного режима на выводы АД библиотеки «ЭЦ-Динамика» программы SimInTech подключим блоки конденсаторов  $C_b$  и нагрузку  $R_n$ , добавим измерительные блоки-амперметры и вольтметр (рис. 1).

В уравнениях не учтена остаточная намагниченность, поэтому в БСИМ добавлен источник напряжения с уставкой напряжения 10 В (блок  $U$ ). Как видно на рисунке 2 (до зоны № 1), процесс возбуждения АГ не происходит, так как наличие остаточной намагниченности является необходимым условием для его самовозбуждения [4]. Вторым необходимым условием является наличие на выводах АГ конденсаторов

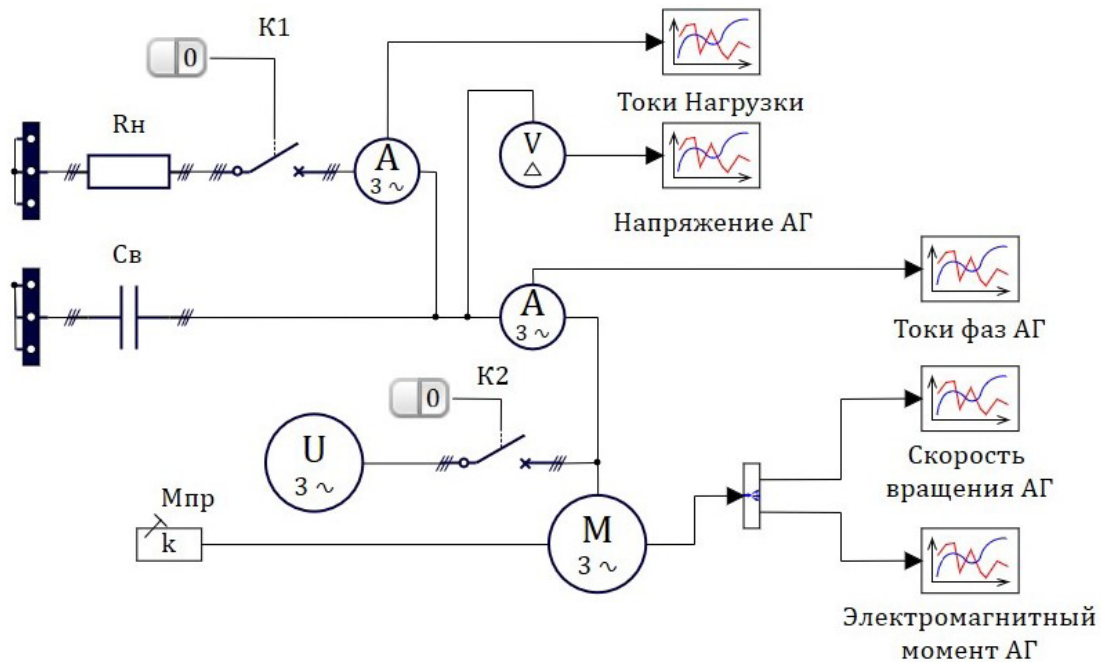


Рис. 1. Блок-схема имитационной модели АГ, выполненная в программе SimInTech

возбуждения [1], для исследуемого АД необходимая емкость конденсаторов, соединенных в звезду, является 60 мкФ. Третьим условием является наличие необходимого приводного момента для вращения АГ с частотой вращения равной скорости идеального холостого хода [5]. Подробный расчет и параметры АГ, выполненного на базе серийного АД мощностью 3 кВт, номинальная частота вращения 1410 об/мин произведен в [3].

Кратковременно включив источник (блок  $U$ ) ключом К2 (зона № 1), на рисунке 2 появляется напряжение в 10 В на выводах АГ, после отключения ключа К2 происходит процесс самовозбуждения (зона 2). Так как в библиотеке АД выставляется момент сопротивления, то для генераторного режима это значение должно быть отрицательным. Особенностью данной БСИМ является уставка постоянного приводного момента, поэтому на рисунке 2 (зона 2)

процесс самовозбуждения происходит ступенчато с переключением значения приводного момента и заканчивается при установившемся напряжении 380 В на выводах генератора. Далее в моделировании происходит наброс нагрузки  $R_n = 200$  Ом включением ключа К1 (активные сопротивления, соединенные звездой, рис. 3 зона № 3).

При этом происходит размагничивание АГ, и на рисунке 2 отчетливо виден переходный процесс – резкое падение напряжения до 163 В, ток нагрузки согласно рисунку 3 – 0,42 А. Такого значительного падения напряжения при проведении эксперимента не происходит, так как приводной электродвигатель уравнивает момент сопротивления генератора. Нарастим приводной момент на валу АГ (зона № 4), при этом напряжение согласно рисунку 2 поднимется до 310 В, а ток нагрузки согласно рисунку 3 – с 0,42 до 0,85 А.

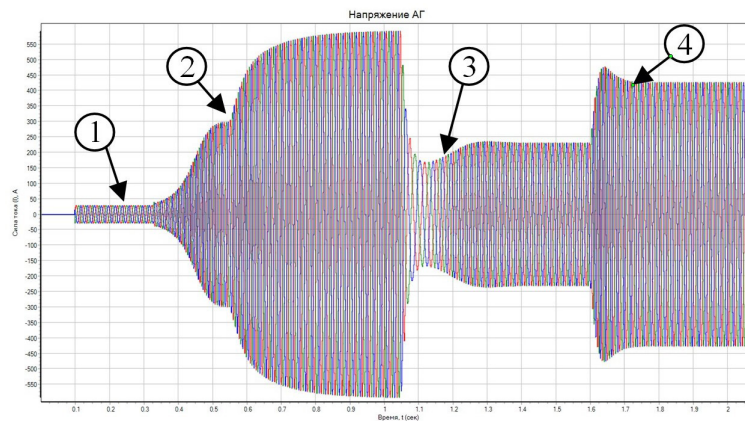


Рис. 2. График изменения напряжения на выводах АГ, выполненного в программе SimInTech во времени

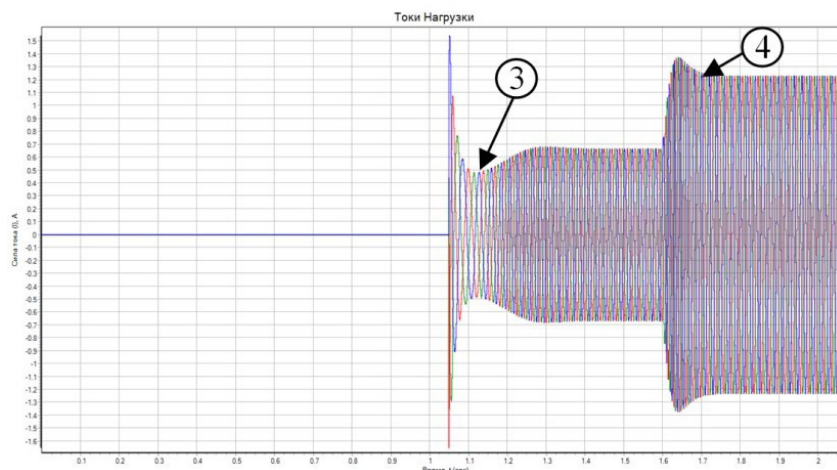


Рис. 3. График изменения тока нагрузки АГ, выполненного в программе SimInTech во времени



## Результаты и обсуждение

Для подтверждения полученных результатов проведены контрольные испытания, которые проводились на специализированном испытательном стенде (рис. 4). В качестве асинхронного генератора использовался серийный асинхронный электродвигатель АИР100S4 АУЗ (G1) мощностью 3 кВт, к которому подключен блок регулируемых конденсаторов К78-36 (С1-С3) и активная нагрузка в виде реостатов РПШ -1 200 Ом (R1-R3), соединенных звездой. Измерения напряжения и токов производились токовыми клещами типа АТК, осциллограммы записывались пишущим осциллографом DSO-5200 (на рисунке не показаны). Параметры сети снимались анализатором МЭ110-220 (АА1).

Расчетный намагничивающий ток асинхронного генератора равен 4,17 А.

С учетом напряжения на конденсаторах при соединении в звезду сопротивление и необходимая емкость конденсаторов определяется как [2]:

$$x_c = \frac{U_c}{I_{\mu 0}} = \frac{220}{4,17} = 52,75 \text{ Ом};$$

$$C = \frac{10^6}{\omega x_c} = \frac{10^6}{314 \cdot 52,75} \approx 60 \text{ мкФ}.$$

Произвели возбуждение АГ с конденсаторами емкостью 60 мкФ, напряжение на выво-

дах составило 386 В после включения нагрузки в 200 Ом произошло падение напряжения до 264 В (рис. 5, зона № 3), причина которого не только размагничивание генератора, но и снижение частоты вращения вследствие возросшей механической нагрузки на вал двигателя постоянного тока, ток нагрузки составил 0,6 А.

Повысив частоту вращения ДПТ путем увеличения напряжения на обмотке якоря, стабилизировав одновременно частоту выходного тока АГ в 50 Гц, ток нагрузки стал 0,8 А при напряжении 310 В (рис. 5, зона 4), что совпадает со значением тока, полученного с помощью БСИМ (расхождение находится в районе погрешности измерительных приборов и составляет 9%).

## Выводы

Таким образом, блок-схема имитационной модели позволяет достаточно точно рассматривать статические режимы асинхронного генератора, для корректного рассмотрения переходных процессов необходимо смоделировать приводную машину в программе SimInTech. БСИМ имеет существенный недостаток – постоянный момент на валу, который вручную необходимо корректировать. Тем не менее полученная блок-схема имитационной модели адекватна, сходимость результатов находится в пределах 9% – ток нагрузки 0,8 А при напряжении 310 В, что обусловлено погрешностью измерительных приборов и расчетов. Положительной особенностью модели является ее наглядность,

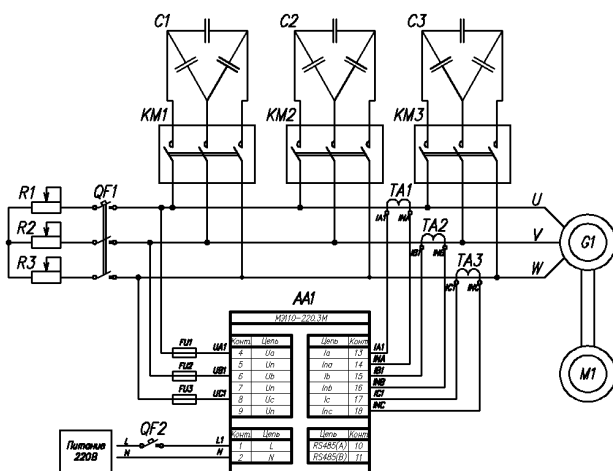


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментального стенда для исследования АГ

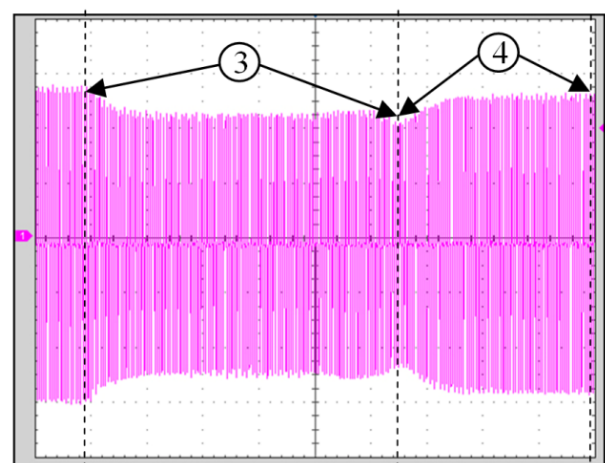


Рис. 5. Осциллограмма токов при включении активной нагрузки к АГ (настройки осциллографа 200 В/кл, 100 мс/кл)

переключения в схеме отражают физические в принципиальной схеме асинхронного генератора. БСИМ показывает необходимые условия для самовозбуждения непосредственно на схеме управления. Такая БСИМ удобна для использования в целях обучения или в электроустановках, где асинхронный генератор является источником для объекта исследования.

#### **Список литературы**

1. Богдан, А. В. Информационные признаки повреждения обмотки статора для построения релейной защиты автономного асинхронного генератора / А. В. Богдан, А. Н. Соболев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 6. – С. 72–76. – DOI: 10.17213/0136-3360-2017-6-72-76.
2. Калачев, Ю. Н. Моделирование в электроприводе / Ю. Н. Калачев. – Москва : ДМКПресс, 2021. – 106 с., ил.
3. Oskin, S. V. Determining the electrical losses in the electrical supply line of a sprin-

kler using autonomous asynchronous generator / S. V. Oskin, N. S. Barakin, A. A. Kumeiko // Journal of Physics: Conference Series. – Vladivostok, 2021. – P. 012191. – DOI: 10.1088/1742-6596/2096/1/012191.

4. Charafeddine, K. Automatic voltage regulation and stability analysis of three-phase self-excited induction generator for wind energy / K. Charafeddine, K. Sangov, S. Tsyruk // Proceedings of 2nd International Conference on the Applications of Information Technology in Developing Renewable Energy Processes and Systems, IT-DREPS 2017. – Amman, 2018. – Vol. 2018-January. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/IT-DREPS.2017.8277824.

5. Stabilization of the Rotor Speed of an Asynchronous Generator of a Wind Power Plant / G. V. Nikitenko, E. V. Konoplev, A. Sergienko, G. V. Masyutina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Veliky Novgorod, 2021. – P. 012073. – DOI: 10.1088/1755-1315/852/1/012073.

---

**Оськин Сергей Владимирович**, д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина.  
E-mail: kgauem@yandex.ru.

**Баракин Николай Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина.  
E-mail: barakin85@mail.ru.

**Христофоров Михаил Сергеевич**, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры внутризаводского электрооборудования и автоматики, Армавирский механико-технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кубанский государственный технологический университет».  
E-mail: mkhristoforov87@mail.ru.

\* \* \*