

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-40-50>

УДК 621.316

Расчет емкости для работы мини-энергокомплекса на основе асинхронного генератора в автономном режиме

С. В. Константинова¹⁾, А. Ю. Капустинский¹⁾, Т. М. Ярошевич¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В статье анализируется работа мини-энергокомплекса (МЭК) на базе альтернативных источников энергии. В качестве генерирующего устройства принят асинхронный генератор (АГ). МЭК работает в автономном режиме со стандартными параметрами электроэнергии без использования преобразователя частоты. Для работы в автономном режиме АГ необходим источник реактивного тока возбуждения. На основе проведенных расчетов и результатов, полученных с помощью экспериментальной установки, анализируются условия работы МЭК со стандартными параметрами электроэнергии при изменяющейся нагрузке. Характерной особенностью автономного МЭК является соизмеримость мощностей генерирующего устройства и потребителей. Включение и отключение любого потребителя существенно изменяют параметры локальной электрической системы и влияют на работу самого генератора. В данной статье основное внимание уделено влиянию трехфазной двигательной нагрузки на устойчивую работу АГ. При функционировании МЭК в автономном режиме должны быть обеспечены надежное самовозбуждение асинхронного генератора и запуск потребителей, мощность которых соизмерима с генерирующей установкой. Также необходимо обеспечить поддержку стабильности напряжения, возможность автоматической работы генерирующей установки, сохранение ее целостности в аварийных режимах. Таким образом, для устойчивой работы автономного МЭК на основе асинхронного генератора следует учитывать характер нагрузки, знать параметры локальной сети, точное наличие потребителей и их характеристики, параметры схем замещения асинхронных двигателей. Кроме того, необходим точный расчет емкости при изменении параметров электрической системы, чтобы не потерять самовозбуждение АГ, что равнозначно отключению всей нагрузки генератора и ведет к резкому увеличению скорости. Для решения данных проблем требуется создание быстродействующей системы управления МЭК.

Ключевые слова: мини-энергетика, альтернативные источники энергии, генерирующее устройство, магнитный ток, самовозбуждение асинхронного генератора, трехфазная двигательная нагрузка, схема замещения

Для цитирования: Константинова, С. В. Расчет емкости для работы мини-энергокомплекса на основе асинхронного генератора в автономном режиме / С. В. Константинова, А. Ю. Капустинский, Т. М. Ярошевич // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 40–50. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-40-50>

Адрес для переписки

Константинова Светлана Валерьевна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел. +375 17 292-65-52
svkon2000@gmail.com

Address for correspondence

Konstantinova Svetlana V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel. +375 17 292-65-52
svkon2000@gmail.com

Calculation of the Capacity for the Operation of a Mini-Energy Complex Based on an Independently Operating Asynchronous Generator

S. V. Konstantinova¹⁾, A. Yu. Kapustinskii¹⁾, T. M. Yaroshevich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the analysis of the operation of the mini-energy complex (MEC) based on alternative energy sources. An asynchronous generator (AG) was taken as energy source. The MEC operates independently with standard power parameters without the use of a frequency converter. To operate independently, AG needs a source of reactive excitation current. Based on the calculations carried out and the results obtained with the use of the experimental facility, the operating conditions of the MEC with standard parameters of electricity under varying load have been analyzed. A characteristic feature of the autonomous MEC is the commensurate capacity of the generating device and consumers. Therefore, any power consumer on/off leads both to significant changes of local electric system parameters and affects the operation of the generator itself. In this article, the main attention is paid to the influence of three-phase motor load on stable AG operation. When the MEC operates independently, reliable self-excitation of the asynchronous generator and the start-up of consumers whose power is commensurate with the generating unit must be ensured. It is also necessary to ensure the maintenance of voltage stability, the possibility of automatic operation of the generating unit, and the preservation of its integrity in emergency modes. Thus, for stable MEC-based AG operation the nature of the load should be taken into account, the parameters of the local grid should be known as well as the exact availability of consumers and their characteristics, and also equivalent circuit parameters of asynchronous motors. In addition, it is necessary to accurately calculate the capacity when changing the parameters of the electrical system, so as not to lose the self-excitation of the asynchronous generator, which is equivalent to disconnecting the entire load of the generator and causes a sharp increase in speed. To solve these problems, it is necessary to create a high-speed MEC control system.

Keywords: mini-energy, alternative energy sources, generating device, magnetic current, self-excitation of an asynchronous generator, three-phase motor load, equivalent circuit

For citation: Konstantinova S. V., Kapustinskii A. Yu., Yaroshevich T. M. (2021) Calculation of the Capacity for the Operation of a Mini-Energy Complex Based on an Independently Operating Asynchronous Generator. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (1), 40–50. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-40-50> (in Russian)

Введение

Асинхронные машины с короткозамкнутым ротором благодаря простоте изготовления, отсутствию скользящих контактов, преимуществам по массогабаритным и стоимостным показателям по сравнению с классическими синхронными генераторами и генераторами постоянного тока не перестают использоваться в качестве генерирующего устройства в мини-энергокомплексах (МЭК).

Как известно, асинхронному генератору (АГ) необходим реактивный намагничивающий ток для создания магнитного потока, в связи с чем асинхронная машина может работать в генераторном режиме или параллельно с сетью, с частотой вращения ротора выше синхронной, либо в автономном режиме с самовозбуждением, получая реактивный ток возбуждения от внешнего источника, например от конденсаторов, подключенных к зажимам АГ [1, 2].

В данной статье в контексте нужд мини-энергетики, в частности автономных МЭК, использующих альтернативные источники энергии в каче-

стве первичных энергоресурсов, рассматривается работа асинхронной машины в генераторном режиме с конденсаторным возбуждением. Основной нагрузкой МЭК являются трехфазные асинхронные двигатели (АД).

Основная часть

На рис. 1 представлена Т-образная схема замещения асинхронного генератора с подключенным к статорной обмотке конденсатором емкостью C .

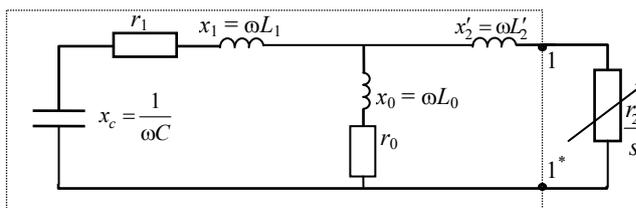


Рис. 1. Т-образная схема замещения асинхронного генератора с подключенным к статорной обмотке конденсатором

Fig. 1. Equivalent T-circuit of an asynchronous generator with capacitor connected to its stator winding

Вопросам самовозбуждения асинхронного генератора в течение длительного времени разными авторами уделяется достаточно пристальное внимание [3–8]. Процессы самовозбуждения асинхронного генератора и генератора постоянного тока во многом аналогичны. Таким образом, автономный асинхронный генератор представляет собой автоколебательную систему, в которой связь между ротором и статором является исключительно электромагнитной. Чтобы энергия первичного двигателя, находящегося на валу ротора, поступала в колебательный контур, необходимо, чтобы скольжение s асинхронной машины было отрицательным: $s = \frac{\omega - \omega_p}{\omega} < 0$, т. е. угловая скорость

ротора ω_p должна быть больше, чем резонансная частота контура, которой соответствует угловая скорость ω : $\omega < \omega_p$.

Для возникновения колебаний система должна находиться в резонансе и входное сопротивление асинхронной машины (двухполюсника) при резонансной частоте полученного контура должно быть чисто активным (рис. 1). Это значит, что векторы тока и напряжения на входе двухполюсника должны совпадать. Сопротивление двухполюсника Z можно рассчитать, свернув Т-образную схему замещения к зажимам 1–1* [3–8]:

$$Z = j\omega L'_2 + \frac{j\omega L_0 \left(r_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C} \right)}{r_1 + j\omega(L_1 + L_0) + \frac{1}{j\omega C}}, \quad (1)$$

где L_0 – индуктивность контура намагничивания Т-образной схемы замещения; L_1 – то же фазы обмотки статора; L'_2 – то же фазы ротора, при-

веденная к статору; r_1 – активное сопротивление фазы статора; C – емкость, подключенная к статору.

Условием резонанса является соблюдение равенства $\text{Im}(Z) = 0$.

Процесс самовозбуждения АГ наиболее наглядно виден из годографа $\text{Im}(Z) = f(\omega)$, где Z – полное сопротивление фазы асинхронной машины из Т-образной схемы замещения (рис. 1), на зажимы которой подключен конденсатор. Годограф представляет собой график зависимости полного сопротивления (при заданной емкости), рассчитанного по формуле (1), при изменении угловой скорости ω от 0 до $+\infty$; строится в действительной и мнимой осях.

Рассчитав и построив годограф, можно наглядно оценить условия процесса самовозбуждения АГ: необходимую величину емкости, угловую скорость, при которой возможно возбуждение, частоту электродвижущей силы (ЭДС). Вид годографа представлен на рис. 2.

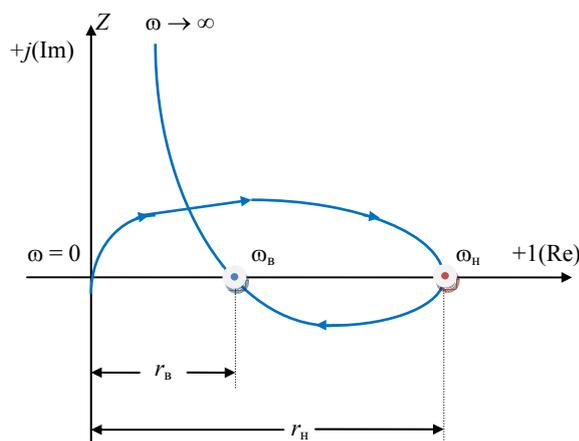


Рис. 2. Годограф $Z(j\omega)$

Fig. 2. The hodograph $Z(j\omega)$

Если годограф $Z(j\omega)$ при изменении угловой скорости пересекает вещественную ось, то в двухполюснике при значениях $\text{Re}(Z) = r_n$, $\text{Re}(Z) = r_b$ наблюдается резонанс токов и резонанс напряжений. Параметры r_n и ω_n соответствуют нижней частоте, при которой в контуре наступает резонанс токов; параметры r_b и ω_b – верхней частоте, при которой в контуре наступает резонанс напряжений. В этом случае действительная часть входного сопротивления двухполюсника численно будет равна $\text{Re}(Z) = -\frac{r'_2}{s}$, на основании чего можно рассчитать значения скольжения АГ, соответствующие резонансу токов и резонансу напряжений: $s_n = -\frac{r'_2}{r_n}$; $s_b = -\frac{r'_2}{r_b}$ [2, 4]. Зона частот, при которых мнимая часть полного сопротивления двухпо-

люсника $\text{Im}[Z(\omega)]$ при заданной емкости будет отрицательна, является зоной устойчивого возбуждения АГ. Таким образом, область самовозбуждения АГ соответствует условию $\omega_b < \omega < \omega_n$ [3–8].

Исходя из вышеизложенного, алгоритм определения емкости батареи конденсаторов для работы АГ в автономном режиме в упрощенной форме можно представить следующим образом. Задается предварительное значение емкости C , затем на основании Т-образной схемы замещения (рис. 1) определяется сопротивление двухполюсника Z относительно зажимов 1–1*:

рассчитывается значение $ZC + Z_1 = ZC_1$, где $ZC = \frac{1}{j\omega C}$; $Z_1 = r_1 + jx_1 =$
 $= r_1 + j\omega L_1$;

определяется сопротивление двухполюсника Z : $Z = \frac{ZC \cdot Z_0}{ZC + Z_0} + Z_2 S$,

где $Z_0 = r_0 + jx_0$; $Z_2 S = jx'_2 = j\omega L'_2$;

для изменяющейся величины ω рассчитываются соответствующие значения $\text{Re}(Z)$ и $\text{Im}(Z)$;

для заданной величины C строится изображение годографа $Z(j\omega)$;

результаты расчета анализируются, определяются условия самовозбуждения генератора при заданной величине емкости; при необходимости значение емкости C корректируется и расчет повторяется до получения требуемого результата.

Для определения параметров Т-образной схемы замещения использован метод, изложенный в [9].

Следует отметить, что при работе в автономном режиме могут наблюдаться два принципиально разных случая работы генераторов: с постоянной и переменной частотой вращения. В первом случае проблема работы МЭЖ с постоянными параметрами электроэнергии решается на стороне первичного двигателя. Во втором – решение этой проблемы переносится на сторону электроэнергии, тогда электрический преобразователь становится сложным и включает в себя электрический генератор, вырабатывающий электроэнергию с переменными параметрами напряжения и частоты, а также статический преобразователь, выдающий стандартные параметры электроэнергии.

В настоящей статье рассматривается работа автономного мини-энергокомплекса со стандартными параметрами электроэнергии на основе асинхронного генератора без использования статического преобразователя.

В соответствии с вышеприведенным алгоритмом были проведены расчеты по выбору необходимой емкости для работы АГ в режиме холостого хода со стандартными параметрами электроэнергии: $U = 1,05U_n$; $f = f_n = 50$ Гц.

Натурные исследования проводились на экспериментальной установке, где в качестве асинхронных генераторов использовались следующие асинхронные двигатели: АД1 серии АОЛ-41–6 ($P_n = 1$ кВт, Δ/Y , $U_n = 220/380$ В, $n_n = 930$ об/мин); АД2 серии 4АА63А4У3 ($P_n = 0,25$ кВт, Δ/Y , $U_n = 220/380$ В,

$n_n = 1400$ об/мин) [4]. Обработка и сравнение результатов, полученных в ходе расчета и исследований на экспериментальной установке, показывают их большое совпадение. Следует отметить, что в случае недостаточной емкости генератор развозбуждается, а если подключается избыточная емкость, АГ начинает работать в режиме перенасыщения с увеличенными потерями. Проведенные эксперименты также показали, что емкость, рассчитанная на основании параметров схемы замещения АГ и обеспечивающая резонанс контура при $f = f_n = 50$ Гц, не является оптимальной для получения номинального режима холостого хода АГ ($U = 1,05U_n, f = f_n = 50$ Гц, $n = 1,005n_1$, где n_1 – синхронная частота вращения). Целесообразнее подключение емкости, при которой полученному резонансному контуру соответствует частота $f = 47\text{--}48$ Гц (для асинхронных генераторов экспериментальной установки эта емкость составила: для АГ1 $C_{xx1} = 30$ мкФ; для АГ2 $C_{xx2} = 16$ мкФ). На рис. 3 приведено изображение годографа для АГ2.

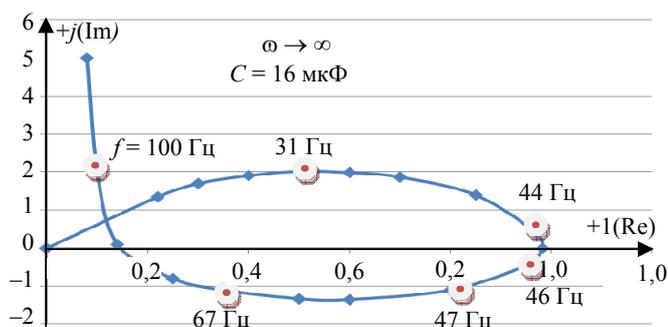


Рис. 3. Годограф асинхронного генератора 0,25 кВт, $C = 16$ мкФ

Fig. 3. The 0.25 kW asynchronous generator's hodograph, $C = 16$ μ F

Величины рассчитанных емкостей достаточны для самовозбуждения каждого из АГ. При подключении указанных величин емкости асинхронные машины экспериментальной установки начинали работать в генераторном режиме. С увеличением частоты вращения ротора с помощью приводного двигателя установки до $n = 1,005n_1$ частота ЭДС достигала значения $f = 50$ Гц, напряжение генераторов автоматически устанавливалось равным 400 В.

Проведенные расчеты и натурные эксперименты показывают, что знание достоверных параметров схемы замещения является необходимым условием при расчете и выборе конденсаторной батареи для работы автономного АГ.

Следует отметить, что автономный режим работы МЭЖ характеризуется соизмеримостью мощностей нагрузки и генератора. Включение и отключение любого потребителя существенно изменяет параметры локальной электрической системы и соответственно существенно влияет на работу самого генератора. При проведении исследований на экспериментальной установке наброс активной нагрузки, соизмеримой с мощностью АГ,

сопровождался снижением напряжения, частоты вращения первичного двигателя и частоты ЭДС. Увеличивая частоту вращения первичного двигателя АГ, генератор устойчиво приходил к своим номинальным параметрам по напряжению и частоте, набирал активную нагрузку. Таким образом, согласно экспериментам наброс нагрузки должен быть точно рассчитан, а первичный двигатель АГ оснащен быстродействующим регулятором, реагирующим на величину напряжения и частоту ЭДС с учетом возможностей генератора по перегрузке [4, 10, 11].

Наиболее характерной нагрузкой МЭК является двигательная (активно-реактивная). Подключение асинхронного двигателя на шины АГ изменяет параметры резонансного контура, в связи с чем появляется необходимость анализа схемы замещения АГ с подключенной к ней схемой замещения АД (рис. 4).

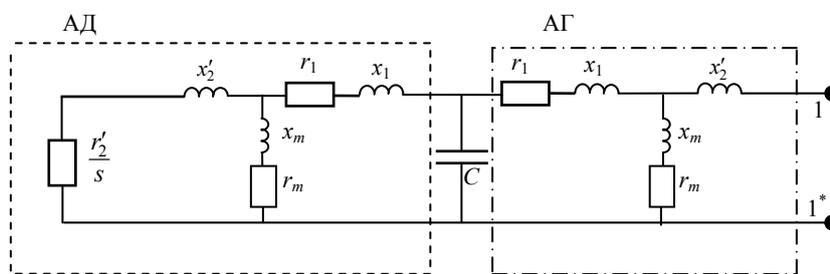
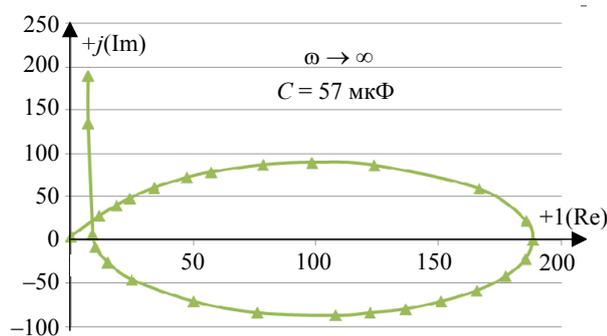


Рис. 4. Схема замещения системы «асинхронный генератор – асинхронный двигатель»
 Fig. 4. The equivalent circuit of the system of “asynchronous generator – asynchronous motor”

В представленной схеме замещения (рис. 4) переменными величинами являются частота ЭДС генератора и нагрузка двигателя $\left(\frac{r'_2}{s}\right)$. Годограф данного контура можно построить, свернув схему к зажимам 1–1*. Это позволяет проанализировать резонансные частоты и величину емкости полученного контура, для чего необходимо знать параметры схем замещения АГ и АД. Нагрузка двигателя учитывается величиной скольжения.

Для выполнения соответствующих расчетов в качестве параметров схемы замещения генератора приняты характеристики АД1, а в качестве параметров схемы замещения двигателя – характеристики АД2. В результате расчетов была определена необходимая величина емкости $C = 60$ мкФ, при которой в представленном контуре (рис. 4) в момент пуска АД ($s = 1$) появляется резонанс токов при частоте $f = 47–48$ Гц. Также была рассчитана необходимая емкость $C = 46$ мкФ для обеспечения номинального режима работы двигателя ($s = 0,05$), при которой в контуре наступает резонанс токов при частоте $f = 47–48$ Гц. Годограф системы «асинхронный генератор – асинхронный двигатель» с подключенной емкостью 57 мкФ приведен на рис. 5.

Эксперименты проводились на опытной установке, состоящей из асинхронного генератора АГ1 серии АОЛ-41–6 ($P_n = 1$ кВт) и асинхронного двигателя АД2 серии 4АА63А4У3 ($P_n = 0,25$ кВт), на вал которого был подсоединен двигатель постоянного тока в качестве нагрузки.



Im(Z)	11,65	24,0	47,3	78,4	166,5	188,4	185,4	177,3	108	50	25	15	10
Re(Z)	28,49	48,6	72,5	86,9	59,6	0,8	-21,0	-41,2	-86	-70	-45	-25	-7
f, Гц	15	26	35	40	47	50	51	52	57	54	55	85	113

Рис. 5. Годограф системы «асинхронный генератор – асинхронный двигатель», $C = 57 \text{ мкФ}$

Fig. 5. The hodograph of the system of “asynchronous generator – asynchronous motor”, $C = 57 \text{ }\mu\text{F}$

Асинхронный генератор АГ1 с подключенной емкостью $C_{\text{xx1}} = 30 \text{ мкФ}$ (имеющий номинальные параметры холостого хода) уверенно разворачивает АД2, если параллельно обмотке статора АД дополнительно подключается емкость $C_{\text{д}} = 34 \text{ мкФ}$. Далее параметры системы резко изменялись: частота ЭДС полученной системы становилась ниже 45 Гц, напряжение снижалось до 300 В, частота вращения первичного двигателя АГ1 снижалась с 1000 до 826 об/мин. Как показали эксперименты, номинальные параметры системы ($U = 385 \text{ В}$; $f = 50 \text{ Гц}$) восстанавливаются только при отключении части батарей конденсаторов и увеличении частоты вращения первичного двигателя. Для данной системы величина отключенной емкости составила $C = 14 \text{ мкФ}$, частота вращения первичного двигателя была увеличена до $n = 1013 \text{ об/мин}$. Таким образом, проведенные опыты показывают, что величина емкости, необходимая для работы системы «асинхронный генератор – асинхронный двигатель» в установившемся номинальном режиме, численно равна сумме емкостей, требуемых для обеспечения работы на холостом ходу с номинальными параметрами этих асинхронных машин при их работе в генераторном режиме; $C_{\text{АГ-АД}} = C_{\text{xx1}} + C_{\text{xx2}}$ [4].

При нагрузке автономного МЭЖ на основе АГ, состоящей из нескольких (N) приводных асинхронных двигателей, схема замещения полученной системы приобретает вид, представленный на рис. 6.

Соответственно включение в работу любого из N двигателей, а также последовательность их включения изменяет параметры результирующего электрического контура. Подобное изменение происходит и в процессе пуска АД. Поэтому при расчете и уточнении требуемой величины емкости для устойчивой работы АГ необходимо учитывать параметры схем замещения асинхронных машин, значение нагрузки как работающих, так и запускаемого АД. Изменение нагрузки двигателей и их параметров в процессе пуска реализуется с учетом величины скольжения.

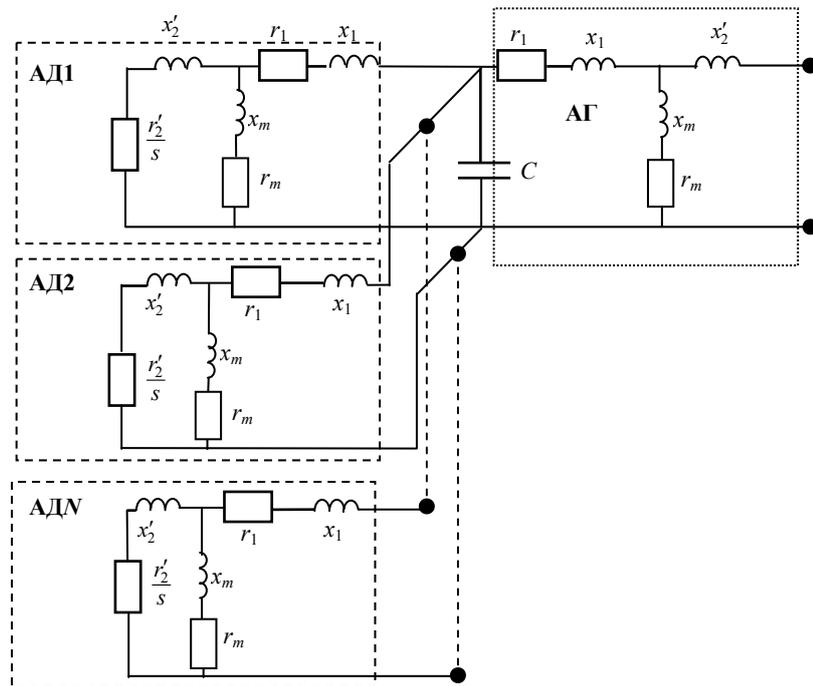


Рис. 6. Схема замещения системы «асинхронный генератор – асинхронные двигатели»

Fig. 6. The equivalent circuit of the system of “asynchronous generator asynchronous motors”

В настоящее время с развитием МЭК на основе альтернативных источников энергии [12, 13] появляется необходимость решения большого числа вопросов (совместимость потребителя и источника электрической энергии, влияние параметров и мощности потребителя на генерирующее устройство, повышение энергоэффективности комплексов, обеспечение надежного подключения потребителей, мощность которых соизмерима с генерирующей установкой). Также следует обеспечить поддержку стабильности напряжения и частоты ЭДС генератора, возможность автоматической работы генерирующей установки, включая сохранение ее целостности в аварийных режимах.

Для решения данных проблем и обеспечения нормального функционирования МЭК необходимо создать быстродействующую систему управления МЭК [14–16].

ВЫВОДЫ

1. Важнейшее условие надежной и безопасной работы автономного мини-энергокомплекса на основе асинхронного генератора – обеспечение надежного самовозбуждения асинхронного генератора. Для этого необходимо знать количество потребителей и их точные характеристики, параметры схем замещения асинхронных двигателей и образованной электрической сети, учитывать характер нагрузки.

2. Для определения величины емкости, необходимой для нормальной работы асинхронного генератора, требуется оперативный расчет изменяющихся параметров локальной электрической системы и возможность регулирования частоты вращения первичного двигателя асинхронного генератора.

3. Точный расчет емкости требуется при любом изменении параметров электрической системы, чтобы не потерять самовозбуждение асинхронного генератора, что эквивалентно отключению всей нагрузки генератора и ведет к резкому увеличению его скорости. Для предотвращения такой аварийной ситуации необходимо создание быстродействующей и надежной системы управления мини-энергокомплексом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
2. Бояр-Сазонович, С. П. Асинхронный генератор. Свойства и перспективы / С. П. Бояр-Сазонович // Электротехника. 1990. № 10. С. 55–57.
3. Китаев, А. В. О физическом механизме самовозбуждения асинхронной машины / А. В. Китаев, И. Н. Орлов // Электричество. 1978. № 4. С. 47–51.
4. Кунцевич, П. А. Асинхронный генератор как автоперестраиваемая автоколебательная система / П. А. Кунцевич // Электричество. 1988. № 6. С. 38–48.
5. Teissier, M. Auto-Amorçage D'une Génératrice Asynchrone Triphase Autonome En Charge Équilibrée Ou Non. Génie Électrique / M. Teissier. SPI-EE Ade Lyon, 1997.
6. Константинова, С. В. Электромеханические системы в мини-энергетике на основе асинхронного генератора / С. В. Константинова; Бел. гос. политех. акад. Минск, 2000. 21 с.
7. Джендубаев, А.-З. Р. Особенности самовозбуждения автономных генераторов. Ч. 2. Асинхронный генератор / А.-З. Р. Джендубаев // Электричество. 2006. № 12. С. 25–32.
8. Марков, В. С. Обзор и анализ современных гипотез возбуждения автономных асинхронных генераторов / В. С. Марков // Інтегровані технології та енергозбереження. 2017. № 1. С. 73–94.
9. Константинова, С. В. Упрощенный метод определения параметров асинхронных машин / С. В. Константинова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1998. № 6. С. 24–29.
10. Щетинин, О. В. Система возбуждения и стабилизации напряжения автономного асинхронного генератора / О. В. Щетинин; Нижегородский гос. техн. ун-т. Н. Новгород, 1994. 16 с.
11. Сергиенко, С. А. Метод расчета статических характеристик асинхронного генератора с емкостным возбуждением / С. А. Сергиенко, Ю. В. Зачепа // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 5. С. 57–66.
12. Etude Statique D'une Génératrice Asynchrone Autonome Alimentant Un Moteur À Induction / M. Ouali [et al.] // International Renewable Energy Congress IREC 2009, Nov. 5–7, 2009. Sousse Tunisia, 2009.
13. Sidki, M. Identification des Parameters D'une Generatrice Asynchrone Pour Eolienne / M. Sidki // International Journal of Scientific Research and Engineering Technology (IJSET). 2015. Vol. 4. P. 199–204.
14. Кузьмин, М. А. Система управления асинхронным генератором автономной энергоустановки в рабочих и аварийных режимах / М. А. Кузьмин; Нижегородский гос. техн. ун-т. Н. Новгород, 1994. 17 с.
15. Программно-информационное обеспечение комплексов для функциональных испытаний цифровых токовых защит электроустановок в системе динамического моделирования MatLab-Simulink / И. В. Новаш [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 4. С. 291–308. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-291-308>.

16. Петруша, Ю. С. Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь / Ю. С. Петруша, Н. А. Попкова // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134>.

Поступила 14.10.2020 Подписана в печать 15.12.2020 Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Vol'dek A. I. (1978) *Electrical Machinery*. Leningrad, Energiya Publ. 832 (in Russian).
2. Boyar-Sazonovich S. P. (1990) Asynchronous Generator. Properties and Prospects. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*, (10), 55–57 (in Russian).
3. Kitaev A. V., Orlov I. N. (1978) On the Physical Mechanism of Self-Excitation of an Asynchronous Machine. *Elektrichestvo*, (4), 47–51 (in Russian).
4. Kuntsevich P. A. (1988) Asynchronous Generator as a Self-Reconfiguring Self-Oscillating System. *Elektrichestvo*, (6), 38–48 (in Russian).
5. Teissier M. (1997) *Auto-Amorçage D'une Génératrice Asynchrone Triphase Autonome En Charge Équilibrée Ou Non*. Génie Électrique. SPI-EE Ade Lyon (in French).
6. Konstantinova S. V. (2000) *Electromechanical Systems in Mini-Power Based on an Asynchronous Generator*. Minsk, Belarusian State Polytechnic Academy. 21 (in Russian).
7. Dzhdubayev A.-Z. R. (2006) Specific Features of Self-Excitation of Autonomous Generators. Part 2. Asynchronous Generator. *Elektrichestvo*, (12), 25–32 (in Russian).
8. Markov V. S. (2017) Overview and Analysis of Modern Hypotheses for the Excitation of Autonomous Asynchronous. *Intehrovani Tekhnologii ta Enerhozberezhennya = Integrated Technologies and Energy Conservation*, (1), 73–94 (in Russian).
9. Konstantinova S. V. (1998) Simplified Method for Determining Simplified method for Determining Parameters of Asynchronous Machines, *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 24–29 (in Russian).
10. Shchetinin O. V. (1994) *System of Excitation and Voltage Stabilization of an Autonomous Asynchronous Generator*. Nizhnii Novgorod, Nizhnii Novgorod State Technical University. 16 (in Russian).
11. Sergienko S. A., Zachepa Yu. V. (2012) Calculation Method for Static Characteristics of Asynchronous Generator with Capacitive Excitation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 57–66 (in Russian).
12. Ouali M., Bahloul W., Chaabene M., Kamoun M. B. A. (2009) Etude Statique d'une Génératrice Asynchrone Autonome Alimentant Un Moteur À Induction. *International Renewable Energy Congress IREC 2009, Nov. 5–7, 2009. Sousse Tunisia*.
13. Sidki M. (2015) Identification des Parametres D'une Génératrice Asynchrone Pour Eolienne. *International Journal of Scientific Research and Engineering Technology (IJSET)*, 4, 199–204.
14. Kuz'min M. A. (1994) *Control System of an Asynchronous Generator of an Autonomous Power Plant in Operating and Emergency Modes*. Nizhnii Novgorod, Nizhnii Novgorod State Technical University. 17 (in Russian).
15. Novash I. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu. (2017) MatLab-Simulink Based Information Support for Digital Overcurrent Protection Test Sets. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (4), 291–308. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-291-308> (in Russian).
16. Petrusha U. S., Papkova N. A. (2019) The Prospects for Wind Energy Development in the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134> (in Russian).

Received: 14 October 2020 Accepted: 15 December 2020 Published online: 29 January 2021