ВЛИЯНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ФОРМУ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

И.И. Золотов, А.А. Шевцов

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

Wiedzmin.64@mail.ru

Резюме: В данной статье представлены результаты проведенного исследования, посвященного оценке степени и характера влияния потребителей электроэнергии на форму питающего напряжения автономных систем электроснабжения, на примере бензогенератора БЭС-3000РМ. Представлены осциллограммы работы бензогенератора с нагрузкой активного, индуктивного и параметрического характера, а также для каждого из проведенных экспериментов рассчитаны и измерены основные электрические параметры системы бензогенератор–нагрузка. Выполнен расчёт внутренних индуктивности и активного сопротивления бензогенератора БЭС-3000РМ. Обозначены основные негативные, применительно к процессу питания чувствительной нагрузки, эффекты, связанные с наличием внутренних индуктивности и сопротивления бензогенератора.

Ключевые слова: система автономного электроснабжения, бензогенератор, качество электроэнергии, коэффициент нелинейных искажений, фильтрорегулирующее устройство, фильтрокомпенсирующее устройство.

DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-131-140.

Для цитирования: Золотов И.И., Шевцов А.А. Влияние потребителей электроэнергии на форму питающего напряжения автономных систем электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 131-140. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-131-140.

INFLUENCE OF ELECTRICITY CONSUMERS ON THE AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS VOLTAGE FORM

I.I. Zolotov, A.A. Shevcov

Togliatti state University, Togliatti Russia

Abstract: This article presents the results of a research concerning evaluation of the nature and influence degree of electricity consumers on the form of the autonomous power supply systems voltage, using the example of the BES-3000RM gasoline generator. Oscillograms of the work of a gasoline generator with active, inductive and parametric loads are presented, and for each of the experiments carried out, the main electrical parameters of the system inclusive gasoline generator and load were calculated and measured. The internal inductance and the active resistance of the BES-3000RM gasoline generator were calculated. The main negative influences for the sensitive load supplying process due presence of gasoline generator internal inductance and active resistance were indicated.

Key words: *autonomous power supply system, gasoline generator, power quality, nonlinear distortion factor, filter regulating device, filter compensating device.*

For citation: *I.I. Zolotov, A.A. Shevcov. Influence of electricity consumers on the autonomous power supply system's voltage form. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2019. vol. 21. № 1-2. pp. 131-140. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-131-140.*

Введение

В автономных электрических системах величины установленной мощности генератора и суммарная мощность потребителей электрической энергии находятся на соизмеримом уровне. В связи с этим оптимизация режимов работы потребителей и поддержание требуемого уровня качества электроэнергии, соответствующего ГОСТ Р 54149-2010 [1], представляются одними из ключевых задач при совместной работе потребителей электроэнергии с системами автономного электроснабжения (САЭ). В промышленных сетях одним из способов оптимизации с энергетической точки зрения является компенсация неактивных составляющих полной мощности с помощью тех или иных мероприятий [2–7]. Однако в САЭ, повсеместное применение устройств компенсации реактивной мощности, таких как фильтрорегулирующие и фильтрокомпенсирующие устройства, показывающих высокую эффективность в промышленных сетях, оказываются неспособными к выполнению возложенных на них функций [8, 9]. Таким образом, возникает необходимость разработки иных мероприятий по отношению к применяемым в промышленных сетях.

Методика исследования и основные результаты

Для понимания проблем, связанных с совместной работой САЭ с потребителями электроэнергии и дальнейшей разработки требуемых мероприятий, необходимо провести анализ влияния различного рода нагрузки на форму питающего напряжения автономных систем электроснабжения.

С этой целью рассмотрим электротехнический комплекс, состоящий из бензогенератора БЭС-3000РМ, номинальной паспортной электрической мощностью 2,3 кВт, генерирующего однофазное переменное напряжение 220 В частотой 50 Гц, и нагрузки, разделенной на три модуля: активную, реактивную и параметрическую нагрузки. Структурная схема экспериментального комплекса показана на рис. 1. Рассмотрим ее состав подробнее.

Активная нагрузка представляет собой набор параллельно соединенных и произвольно коммутируемых с помощью переключателей ламп накаливания с различными номинальными мощностями, суммарная номинальная мощность которых равняется 765 Вт.

Реактивная нагрузка представляет собой два дросселя с обмотками, имеющими несколько отводов и сердечник с воздушным зазором, позволяющим рассматривать дроссели как линейные ненасыщающиеся. Последовательно с дросселями включены два параллельно соединенных реостата, выполняющие функцию ограничения тока и позволяющие управлять постоянством выделяемой в реактивной нагрузке активной мощности.

Параметрическая нагрузка представляет собой набор ламп накаливания, разделенных на две группы, каждая из которых последовательно соединяется с регулятором напряжения на симисторах, которые позволяют изменять угол проводимости от 0 до π . Таким способом реализуется режим работы нагрузки с прерывистым током. Таким образом, подключая параллельно модули активной, реактивной и параметрической нагрузок, можно управлять величиной и формой потребляемого от бензогенератора тока, а следовательно, и величинами составляющих полной мощности.

Рис. 1. Структурная схема экспериментального комплекса

Поскольку мощности нагрузок и электрического генератора в составе бензогенераторной станции соизмеримы, необходимо также проверить влияние значения суммарной потребляемой мощности и формы потребляемого тока на кривую напряжения, вырабатываемого генератором.

Для выполнения измерений необходим набор инструментария, позволяющий в оперативном порядке записывать кривые потребляемого от генератора тока и вырабатываемого им напряжения, оперативно вычислять величины полной мощности и ее составляющих, а также измерять основные параметры кривой напряжения, вырабатываемого генератором.

Визуализация и запись кривых напряжения генератора и потребляемого от генератора тока производилась цифровым запоминающим осциллографом *Tektronix TPS 2014* (100 MHz, 1 GS/s). Запись велась одновременно на два канала с синхронизацией по каналу питающего напряжения, снимаемого с генератора. Осциллограммы записывались для каждого типа и номинала нагрузки.

Активный контроль параметров составляющих полной мощности, действующего значения потребляемого тока и действующего значения напряжения, снимаемого с генератора, производился измерительным модулем, разработанным на базе *Altium Designer NanoBoard 3000*. Устройство содержит в своем составе центральное процессорное устройство на основе ПЛИС и модуль бесконтактных датчиков тока и напряжения, подключаемых в цепи нагрузки. Вычисление составляющих полной мощности осуществляется в соответствии с выражениями профессора М.В. Агунова [10] для полной мощности S , активной мощности P , реактивной мощности Q и мощности искажения D :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} ;$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt ;$$

$$Q = \left[\sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{n\omega}{T} \int_0^T i_n(t) \left(\int_0^t u_n(\tau)d\tau \right) dt \right)^2 \right]^{1/2} ;$$

$$D = \left[\frac{1}{2T} \int_0^T \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (u_m(t)i_n(t) - i_m(t)u_n(t))^2 dt \right]^{1/2} .$$

$m \neq n$

Эксперимент выстроим следующим образом. Будем изменять в значительных пределах величину одной из составляющих полной мощности, поддерживая неизменными или колеблющимися в узких пределах другие составляющие. Этому будет способствовать возможность ступенчатого изменения величины мощности в модуле активной нагрузки и индуктивностей дросселей в модуле реактивной нагрузки, а также плавные регулировки в модуле параметрической нагрузки. При каждом шаге изменения одной из составляющих полной мощности будем проводить замер времени, необходимого для расходования фиксированного количества топлива. Полученные результаты будем сводить в таблицы для последующего графического отображения и анализа.

Величина активной мощности изменяется ступенчато, с помощью модуля активной нагрузки. В табл. 1 сведены рассчитанные и измеренные электрические параметры для различных значений активной нагрузки.

Таблица 1

Электрические параметры, измеренные и рассчитанные в ходе эксперимента с активной нагрузкой

№	Номинальный режим	S, ВА	P, Вт	Q, ВАр	D, ВАи	U, В	I, А	Расход бензина, мл/сек	Частота, Гц
1	0	0	0	0	0	233	0	0,111	52
2	100Вт	128,5	108,5	12,495	67,12	233,5	0,53	0,122	52,045
3	200 Вт	227	209,5	12,755	91,5	231,5	0,975	0,128	52
4	300 Вт	326,5	317	14,75	90,85	233,5	1,37	0,134	52
5	400 Вт	434	424	16	87	231,7	1,84	0,143	51,95
6	500 Вт	532,5	524,5	17,3	91,2	232,95	2,28	0,152	52,1
7	600 Вт	623	617	18,96	84,23	231,75	2,695	0,158	52,3
8	765 Вт	792	784,5	19,8	110,5	231	3,42	0,17	51,7

Осциллограммы тока и напряжения для экспериментов с активной нагрузкой № 1 и № 8 показаны на рис. 2 и на рис. 3 соответственно.

Рис. 2. Осциллограмма тока и напряжения для эксперимента с активной нагрузкой №1

Рис. 3. Осциллограмма тока и напряжения для эксперимента с активной нагрузкой №8

Анализируя полученные осциллограммы можно сделать вывод о безусловном наличии нелинейных искажений в токе и напряжении питаемой нагрузки. Учитывая тот факт, что визуально на осциллограмме становятся заметны глазу нелинейные искажения, начиная со значения 5 %, а предельное допустимое значения суммарного коэффициента нелинейных искажения ($K_{ни}$), согласно ГОСТ Р 54149-2010 – 8 %, а также то, что характер нагрузки чисто активный (не учитывая внутренние параметры генератора), а нагрузка составляет всего 4 % от заявленной номинальной, возникает необходимость применения мероприятий по повышению качества электроэнергии САЭ.

В частности, результат имитационного моделирования аналогичного генератора, собранного в пакете *Matlab Simulink* с нагрузкой, представляющей собой последовательную ветвь RL с параметрами: $R = 700$ Ом, $L = 0,1$ мГн и параллельную ей ветвь содержащую параметрическую нагрузку, состоящую из сопротивления $R = 400$ Ом, коммутируемого идеальным ключом с частотой $f = 50$ Гц показывает, что для напряжения нагрузки $K_{ни} = 14\%$ в 1,75 раза превышает допустимое значение [11]. Разумно предположить, что точность и бесперебойность работы чувствительной нагрузки, при такой степени наличия нелинейных

искажения, стремится к нулю.

На следующем этапе эксперимента изменяется индуктивная нагрузка путем подключения различных обмоток дросселя. Измеренные и рассчитанные параметры сведены в табл. 2.

Таблица 2

Электрические параметры, измеренные и рассчитанные в ходе эксперимента с реактивной нагрузкой

№	Описание режима	S , ВА	P , Вт	Q , ВАр	D , ВАи	U , В	I , А	Расход бензина, мл/сек	частота, Гц
1	Обмотка 1	693,3	189,5	651,4	142,9	215,61	3,216	0,129	52,438
2	Обмотка 1-2	386,2	81,53	373,2	56,9	217,122	1,779	0,123	52,38
3	Обмотка 1-3	242,06	43,94	236,14	30,03	218,04	1,11	0,121	52,52

Осциллограммы тока и напряжения для экспериментов с реактивной нагрузкой № 1 и № 3 показаны на рис. 4 и на рис. 5 соответственно.

Рис. 4. Осциллограмма тока и напряжения для эксперимента с реактивной нагрузкой №1

Рис. 5. Осциллограмма тока и напряжения для эксперимента с реактивной нагрузкой №3

На заключительном этапе эксперимента изменяется активная, реактивная нагрузка и

параметрическая, путем подключения и отключения различных обмоток дросселя, ламп накаливания, выполняющих роль активной нагрузки, а также путем изменения угла проводимости симисторов. Измеренные и рассчитанные параметры сведены в табл. 3.

Осциллограммы тока и напряжения для экспериментов со смешанной нагрузкой № 1, № 2 и № 3 показаны на рис. 6–8 соответственно.

Для последующего построения электрической модели автономного генератора (АГ) в среде инженерного программирования и моделирования *Matlab Simulink*, с целью поиска необходимых мероприятий по повышению качества питающего напряжения бензогенератора, необходимо рассчитать внутренние: индуктивность и активное сопротивление АГ.

Выполним расчет необходимых величин, используя измеренные и рассчитанные электрические параметры для активной нагрузки мощностью 100 Вт. Искомые величины можно найти, используя нижеприведенные соотношения.

Таблица 3

Электрические параметры, измеренные и рассчитанные в ходе эксперимента со смешанной нагрузкой (параметрическая, активная и реактивная)

№	Описание режима	S , ВА	P , Вт	Q , ВАр	D , ВАи	U , В	I , А	Расход бензина, мл/сек	Частота, Гц
1	Обмотка 1-2 и, активная нагрузка – максимальная (все лампы вкл.), параметрическая – угол $\frac{\pi}{4}$.	981,2	300,2	880	312,6	218,12	4,5	0,138	52,66
2	Обмотка 1-2, активная нагрузка 60 Вт, параметрическая нагрузка – угол $\frac{\pi}{3}$.	756,2	255,76	629,44	332	218,58	3,46	0,145	52,47
3	Параметрическая нагрузка – $\frac{\pi}{2}$.	787,57	458	411,5	491,1	217,25	3,63	0,152	52,19

Рис. 6. Осциллограмма тока и напряжения для эксперимента со смешанной нагрузкой №1

$$P_{\text{общ}} = I_{\text{eff}}^2 R_{\text{общ}} ; \quad (1)$$

$$P_{\text{вн}} = P_{\text{общ}} - P_{\text{н}} ; \quad (2)$$

$$R_{\text{вн}} = (P_{\text{общ}} - P_{\text{н}}) / (I_{\text{eff}}^2) ; \quad (3)$$

$$\varphi = \arccos(P_{\text{общ}} / S) ; \quad (4)$$

$$\text{tg}(\varphi) = \omega L / R_{\text{общ}} = \text{tg}(\arccos(P_{\text{общ}} / S)) ; \quad (5)$$

$$L = P_{\text{общ}} \text{tg}(\arccos(P_{\text{общ}} / S)) / (\omega I_{\text{eff}}^2) . \quad (6)$$

где $P_{\text{общ}}$ – полная активная мощность цепи; I_{eff} – действующее значение тока в цепи; $R_{\text{общ}}$ – общее активное сопротивление цепи; S – полная мощность в цепи; $R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление цепи; $P_{\text{вн}}$ – мощность, выделяемая на внутреннем сопротивлении цепи; $P_{\text{н}}$ – мощность, выделяемая на нагрузке; ω – циклическая частота; L – внутренняя индуктивность АГ; φ – угол между фазами тока и напряжения.

Рис. 7. Осциллограмма тока и напряжения для эксперимента со смешанной нагрузкой №2

Рис. 8. Осциллограмма тока и напряжения для эксперимента со смешанной нагрузкой №3

Подставляя электрические параметры из табл. 1 в соотношения (3) и (6), получаем для внутренней индуктивности и внутреннего сопротивления АГ, соответственно: $L = 155 \text{ мГн}$, $R_{\text{вн}} = 40,56 \text{ Ом}$.

Выводы

Наличие вышеуказанных внутренних параметров и конструктивных особенностей АГ приводит к нежелательным, применительно к процессу питания чувствительной нагрузки, эффектам:

- 1) даже в случае чисто активной нагрузки присутствует угол сдвига между фазами тока и напряжения (наибольший угол соответствует наименьшей активной нагрузке: $\varphi = 32,4^\circ$ при активной нагрузке, потребляющей 100 Вт);
- 2) уже на холостом ходу имеет место быть искажение формы напряжения АГ (значение коэффициента нелинейных искажений $> 8\%$);
- 3) наличие отклонения частоты от 50 Гц выдаваемой АГ (среднее отклонение частоты напряжения $+2,2$ Гц);
- 4) инертность к изменению нагрузки, как ввиду наличия внутренней индуктивности, так и ввиду того, что для увеличения оборотов двигателя при увеличении нагрузки требуется определенное время;
- 5) увеличение имеющихся нелинейных искажений напряжения, присутствующих при холостом ходе АГ, при подключении нагрузки и при ее увеличении.

Анализ данных, полученных в ходе опытов по питанию нагрузки различного характера от источника автономного электроснабжения, на примере бензогенератора, показал необходимость повышения качества поставляемой автономным источником электроэнергии. Однако наличие внутренней индуктивности и сопротивления, а также отличие фундаментальной частоты от 50 Гц влекут за собой определенные проблемы совместимости устройств коррективной и компенсации нелинейных искажений тока и напряжения с САЭ, ввиду того, что предполагаемые устройства для повышения качества электроэнергии автономных генераторов должны в динамическом режиме компенсировать негативные эффекты, характерные для питания нагрузки от АГ, а также адаптироваться к изменению нагрузки.

Для построения математических моделей АГ в программах имитационного моделирования были рассчитаны внутреннее сопротивление и внутренняя индуктивность – параметры, моделирующие индуктивность и сопротивление обмоток АГ.

Литература

1. ГОСТ Р 54149-2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2013.
2. Kusko Alex, Marc Thompson (2007). Power Quality in Electrical Systems. McGraw Hill. ISBN 978-0-07-147075-9.
3. Пупин В.М. Устройства защиты от провалов напряжения. М.: НТФ "Энергопрогресс", 2001. 100с.
4. Power Supply Cookbook second Edition. Marty Brown. Newnes, Boston 2001.
5. Recent classic HVDC development, Lennart Carlsson, ABB. 2010.
6. Герман-Галкин С.Г., Дмитриев Б.Ф. Исследование спектральных характеристик многоуровневых полупроводниковых преобразователей // Электротехника. 2014. № 3. С. 45–53.
7. Агунов А.В. Последовательный силовой активный фильтр напряжения с цифровым управлением // Электроника и электрооборудование транспорта. 2014. № 1. С. 27–28.
8. А.А. Шевцов, И.И. Золотов. Проблема совместимости фильтрокомпенсирующих устройств с системами автономного электроснабжения. Технологии XXI века: проблемы и перспективы развития. // Сборник научных статей. Труды Международной научной конференции «Технологии XXI века: проблемы и перспективы развития» (10 октября 2015г. г.Челябинск). 144. 147 с.
9. И.И. Золотов. Совместимость фильтрорегулирующих устройств с автономными генераторами. Молодёжный форум: технические и математические науки. // Сборник научных статей. Труды Международной научной конференции «Молодёжный форум: технические и математические

науки» (9-12 ноября 2015 года г. Воронеж). 407. 410 с.

10. М.В. Агунов. Энергетически процессы в электрических цепях с несинусоидальными режимами и их эффективность. Кишинев-Тольятти: МолдНИИТЭИ, 1997. 84 с.

11. И.И. Золотов. Гармонический анализ выходного напряжения динамического стабилизатора для систем автономного электроснабжения. Актуальные вопросы и перспективы развития современной науки: материалы IV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (2–6 октября 2017 г., г. Санкт-Петербург). 2017. 76-82 с.

Авторы публикации

Золотов Игорь Игоревич – аспирант Тольяттинского государственного университета (ТГУ).

Шевцов Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная электроника» Тольяттинского государственного университета (ТГУ).

References

1 GOST R 54149-2010. «Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Standards of quality of electrical energy in general-purpose power supply systems». Introduced, 2013.

2 Kusko Alex; Marc Thompson (2007). Power Quality in Electrical Systems. McGraw Hill. ISBN 978-0-07-147075-9.

3 Pupin V.M. Voltage dips protection devices. М.: NTF «Energoprogress», 2001. 100p.

4. Power Supply Cookbook second Edition. Marty Brown. Newnes, Boston 2001.

5. Recent classic HVDC development, Lennart Carlsson, ABB. 2010.

6. German-Galkin S.G, Dmitriev B.F. Study of the spectral characteristics of multi-level semiconductor converters // Electrotechnics. 2014. № 3. P. 45–53.

7. Agunov A.V. «Serial power active voltage filter with digital control» // Electronics and electrical equipment of transport. 2014. № 1. P. 27–28.

8. A.A. Shevtsov, I.I. Zolotov, «The problem of compatibility of filter-compensating devices with autonomous power supply systems». Technologies of the XXI century: problems and development prospects. Collection of scientific articles. Proceedings of the International Scientific Conference «Technologies of the XXI Century: Problems and Prospects for Development» (October 10, 2015, Chelyabinsk). P. 144–147.

9. I.I. Zolotov «Compatibility of filter regulating devices with autonomous generators». Youth forum: Technical and mathematical sciences. Collection of scientific articles. Proceedings of the international scientific conference «Youth forum: Technical and mathematical sciences» (November 9-12, 2015, Voronezh). P. 407–410.

10. M.V Agunov. Energetically processes in electric circuits with non-sinusoidal modes and their efficiency. Kishinev-Tolyatti: MoldNIITEI, 1997. 84 p.

11. I.I. Zolotov. «Harmonic analysis of the autonomous power supply systems dynamic stabilizer output voltage». Current issues and prospects for the development of modern science: materials of the IV International scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists (2-6 October 2017, St. Petersburg), 2017. P. 76–82.

Authors of the publication

Igor I. Zolotov — Togliatti state University, Togliatti Russia.

Aleksandr A. Shevtsov — Togliatti state University, Togliatti Russia.

Поступила в редакцию

30 ноября 2018 г.