

УДК 621.314

Частотный спектр тока передающего устройства в системе автономного электроснабжения радиолокационной станции

В.Н. Долов¹, В.Ф. Стрелков¹, М.В. Андрияхин¹, В.В. Ваняев²

¹ ОАО Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

² ФГБОУВПО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

E-mail: STO@nniirt.ru, epa@nntu.nnov.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Увеличение мощности, потребляемой передающим устройством радиолокационной станции, делает актуальной проблему его электромагнитной совместимости с другими потребителями автономной системы электроснабжения, что требует определения спектра потребляемого им тока и его количественных характеристик.

Материалы и методы: Расчеты спектрального состава выполнены на основе быстрого преобразования Фурье в среде MATLAB Simulink.

Результаты: Предложена методика расчета частотного спектра фазного тока, потребляемого передающим устройством. Разработана математическая модель, позволяющая по зависимости тока передающего устройства от времени на одном цикле работы производить моделирование процессов энергопотребления в стационарном режиме работы радиолокационной станции и определять спектральный состав тока, потребляемого передающим устройством.

Выводы: Полученные результаты позволяют определить уровень электромагнитной совместимости передающего устройства, оценить его влияние на электромагнитную обстановку в системе автономного электроснабжения радиолокационной станции, обосновать выбор и расчет устройств коррекции гармонического состава токов и напряжений.

Ключевые слова: система автономного электроснабжения, радиолокационная станция, передающее устройство, полупроводниковый преобразователь, частотный спектр тока, имитационная модель.

Current Frequency Spectrum of Transmitting Device in Autonomous Power Supply System of Radar Station

V.N. Dolov¹, V.F. Strelkov¹, M.V. Andryukhin¹, V.V. Vanyaev²

¹ Joint Stock Company Federal Research and Industrial Centre «Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering», Nizhny Novgorod, Russian Federation

² Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

E-mail: STO@nniirt.ru, epa@nntu.nnov.ru

Abstract

Background: The increase in power consumption of the transmitter unit (TU) of the radar, makes actual the problem of the electromagnetic compatibility to other users of the Autonomous power supply system, which requires a definition of the spectrum quarters of its current and its quantitative characteristics.

Materials and methods: Calculations of the spectral composition of the met based on the fast Fourier transform in the MATLAB Simulink.

Results: The design procedure of a frequency spectrum of the phase current consumed TU is offered. A mathematical model was developed, allowing the dependence of the current TU from time to time on a single operating cycle, make the modeling of the processes of consumption of electric power in stationary mode of radar operation and determine the spectral composition of the current consumption of the EAS.

Conclusions: The received results allow to determine the level of electromagnetic compatibility of PU, assess the impact of the electromagnetic environment in the system of Autonomous power supply of the radar, justifying the selection and calculation devices correction of harmonic currents and voltages.

Keywords: autonomous systems of power supply, radar stations, transmitter device, semiconductor transformer, frequency spectrum of the current, simulation model.

Одной из основных нагрузок автономной системы электроснабжения радиолокационной станции (РЛС), включающей в себя первичный источник энергии – дизель (турбо) – генератор и автономную сеть РЛС с элементами коммутации и защиты, является передающее уст-

ройство (ПУ), которое формирует периодические импульсы тока с заданными характеристиками, определяющими параметры зондирующих импульсов антенны. Мощность, потребляемая ПУ, достигает 30 % и более мощности питающего генератора, и поэтому во-

просы, связанные с его влиянием на другие потребители, в частности на вычислительный комплекс РЛС, систему управления приводом вращения антенны и др., питающиеся от этой сети, имеют большое значение.

ПУ современных РЛС строятся на базе СВЧ-вакуумных или СВЧ-полупроводниковых приборов, все чаще в многомодульном варианте.

Структура автономной системы электропитания ПУ (рис.) содержит: трехфазный синхронный генератор Г с частотой выходного напряжения 50 (или 400) Гц, питающий автономную сеть, к фазам А, В, С которой присоединены различные потребители РЛС, в том числе сетевой выпрямитель В, L-C-фильтр Ф, к выходным шинам ±U_п которого подключены синхронно работающие модули ПУ (МПУ). Каждый МПУ, в свою очередь, содержит полупроводниковый преобразователь (П), емкостной накопитель С (ЕН) и передающий модуль (ПМ), представленный на схеме резистором R, подключаемым к ЕН коммутатором S.

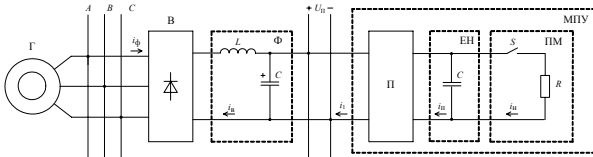


Рис. 1. Структурная схема системы электропитания ПУ

Для каждого цикла работы преобразователя П характерны следующие интервалы [1]:

- токовой «отсечки» (при формировании импульса и заряде ЕН);
- стабилизации напряжения (при токе заряда меньше тока «отсечки»);
- холостого хода (при токе заряда, равном нулю).

Входной ток i_1 МПУ (рис. 1) представляет собой последовательность импульсов, форма и частота которых зависит от выбранного схемного решения преобразователя (в однотактных схемах частота равна частоте коммутации его ключевых элементов, а в двухтактных – двойному значению этой частоты) и лежит в диапазоне десятков – сотен килогерц. Высокочастотная переменная составляющая тока i_1 эффективно блокируется неполярными конденсаторами относительно небольшой емкости, имеющимися на входе каждого модуля.

Гладкая составляющая $i_{1гн}$ входного тока (среднее значение тока на периоде повторяемости его кривой), учитывая, что ЕН работает в режиме частичной разрядки с незначительной (единицы процентов) величиной пульсаций напряжения, повторяет по форме кривую тока i_n , который на интервалах токовой отсечки изменяется незначительно. Она может быть представлена последовательностью импульсов, близких по форме к трапецеидальной, [1]

с частотой $f = 1/T$, равной частоте следования зондирующих импульсов РЛС ($f = 130\text{--}400$ Гц).

Разложение гладкой составляющей $i_{1гн}$ в ряд Фурье имеет вид

$$i_{1гн} = i_{1гн=} + i_{1гн\approx} = I_{гн0} + \sum_{k=1}^{\infty} I_{кгн} \sin(k\omega t + \alpha_k), \quad (1)$$

где $i_{1гн=} = I_{гн0}$, $i_{1гн\approx} = \sum_{k=1}^{\infty} I_{кгн} (\sin k\omega t + \alpha_k)$ – постоянная и переменная составляющие тока $i_{1гн}$ соответственно; $I_{кгн}$ – амплитуда k -й гармоники гладкой составляющей тока; α_k – фазовый сдвиг k -й гармоники; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота следования зондирующих импульсов.

Выходной ток i_B выпрямителя определяется из выражения

$$i_B = N \cdot i_{1гн=} + \frac{N \cdot X_C}{X_L - X_C} \cdot i_{1гн\approx} + \frac{U_{B\approx}}{X_L - X_C}, \quad (2)$$

где N – число МПУ; $U_{B\approx}$ – переменная составляющая выходного напряжения выпрямителя; X_L , X_C – индуктивное и емкостное сопротивление элементов фильтра.

Входной L-C-фильтр, выполняющий функции сглаживания пульсаций выходного напряжения выпрямителя, снижает переменную составляющую тока $i_{1гн\approx}$ тем больше, чем меньше отношение частоты напряжения сети к частоте f .

Ток фазы i_ϕ выпрямителя может быть представлен [2] произведением тока выпрямителя i_B и коммутационной функции $F_k(t)$, содержащей нечетные гармоники кроме кратных трем, определяемой по формуле

$$F_k(t) = \sum_{m=0}^{\infty} A_n \sin(n\omega_c t + \beta_n), \quad (3)$$

$$n = 3(2m + 1) \pm 2, \quad (4)$$

где A_n – амплитуда n -й гармоники функции $F_k(t)$; β_n – фазовый сдвиг n -й гармоники; ω_c – круговая частота напряжения генератора и сети.

После преобразований из (1)–(4) определяем ток фазы i_ϕ :

$$i_\phi = i_B F_k(t) = I_{гн0} \sum_{m=0}^{\infty} A_n \sin(n\omega_c t + \beta_n) + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_n I_{кгн}}{LC(k\omega)^2 - 1} \left\{ \cos[(k\omega - n\omega_c)t + \alpha_k - \beta_n] - \cos[(k\omega + n\omega_c)t + \alpha_k + \beta_n] \right\} + 3C\omega_c \sum_{m=0}^{\infty} \frac{jU_j A_n}{LC(6j\omega_c)^2 - 1} \times \left\{ \cos[(6j - n)\omega_c t + \gamma_j - \beta_n] - \cos[(6j + n)\omega_c t + \gamma_j + \beta_n] \right\},$$

где U_j – амплитуда j -й гармоники выходного напряжения выпрямителя; L , C – индуктивность и емкость входного фильтра; α_k , β_n , γ_j – фазовые сдвиги гармоник.

Из полученного выражения следует, что ток фазы содержит:

– канонические составляющие с частотами, кратными частоте сетевого напряжения, исключая четные и кратные трем;

– неканонические составляющие с частотами, кратными частоте сетевого напряжения и интергармоники с комбинационными частотами.

Интергармонические составляющие могут иметь произвольные и меняющиеся в процессе работы РЛС фазовые сдвиги и частоты, которые, теоретически, охватывают диапазон значений от нуля до бесконечности.

Генерируемые ПУ гармоники тока вызывают искажения кривой сетевого напряжения и увеличивают коэффициент пульсаций выходных напряжений вторичных источников электропитания приемной аппаратуры РЛС, вычислительного комплекса, системы управления электроприводом вращения антенны, что может вызывать возникновение нештатных режимов их работы.

Для оценки уровня электромагнитной совместимости ПУ и его влияния на электромагнитную обстановку в системе автономного электроснабжения РЛС необходимо рассчитывать частотный спектр тока, потребляемого ПУ, параметры которого зависят от алгоритмов работы ПМ и преобразователей.

Точный аналитический расчет частотного спектра представляет собой достаточно сложную задачу из-за высокого порядка системы дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в структурной схеме (рис. 1) на указанных выше интервалах работы преобразователя.

В этих условиях представляется целесообразным применение численных методов расчета, например, с использованием имитационных моделей пакета *MATLAB Simulink*, обладающего широкими функциональными возможностями [3].

Вместе с тем имитационное моделирование процессов в системе электропитания РЛС (рис. 1) требует значительного времени и объема оперативной памяти, прежде всего, из-за значительного различия величин рабочей частоты преобразователя и частоты следования зондирующих импульсов f .

Время моделирования можно существенно уменьшить, если определить функцию регрессии $i_{1rn}(t)$ для массива значений, формируемого в процессе моделирования одного цикла работы. Вид и параметры этой функции выбирают опытным путем, исходя из наименьшего среднеквадратичного отклонения ее значений от данных массива, используя приложение *cftool*.

Выбранную функцию $i_{1rn}(t)$ реализуют набором стандартных блоков в среде *Simulink* и периодически повторяют с частотой f . Полученный таким образом сигнал вводят в имита-

ционную модель системы, что позволяет исследовать характер протекания в ней электромагнитных процессов в стационарном режиме работы РЛС и, используя быстрое преобразование Фурье (блок *Powergui*), рассчитывать частотные спектры тока, потребляемого ПУ.

На рис. 2, 3 в качестве примера приведены диаграммы фазного тока, потребляемого ПУ РЛС, и его частотный спектр при следующих значениях параметров системы: $P_{\text{ПУ}} = 13$ кВт; $f = 133$ Гц; $L_S = 100$ мкГн; $L = 2$ мГн; $C = 3$ мФ; $Q = 1,67$. Здесь $P_{\text{ПУ}}$, Q , L_S – мощность, скважность тока, потребляемого ПУ, и индуктивность фазы бортовой сети РЛС соответственно.

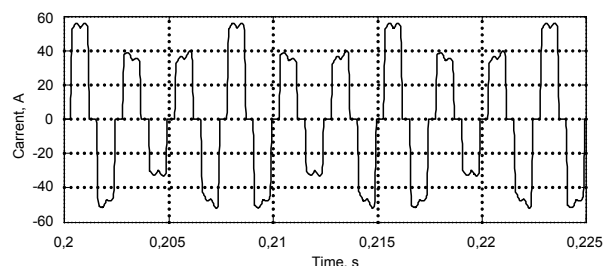


Рис. 2. Диаграмма фазного тока, потребляемого ПУ РЛС

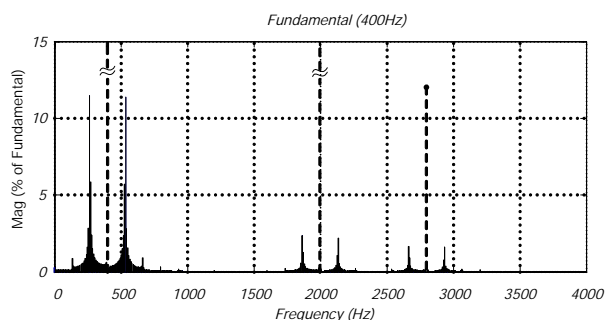


Рис. 3. Частотный спектр фазного тока, потребляемого ПУ РЛС: - - - - канонические гармоники; – неканонические и интергармоники

Анализ полученных результатов (рис. 3) показывает, что частотный спектр потребляемого тока дискретный, содержит составляющие, кратные частоте сети, и «боковые» интергармонические составляющие. Среди последних также можно выделить «центральные» с частотами $k\omega_C \pm \omega$, которые имеют наибольшие амплитуды, и «боковые» составляющие, амплитуды которых убывают по мере удаления их частот от указанных значений.

При изменении режима работы ПУ, например при повышении частоты следования зондирующих импульсов, «боковые» составляющие будут перемещаться по оси частот вправо и влево относительно частот $k\omega_C$. Изменение скважности зондирующих импульсов, длительностей интервалов работы преобразователя и характера изменения тока на них вызывает изменение амплитуд составляющих спектра.

Заключение

Установлено, что в периодическом режиме работы ПУ в системе электроснабжения РЛС появляются неканонические гармоники с частотами, кратными частоте сетевого напряжения, и интергармоники с частотами, имеющими значения как выше, так и ниже частоты автономной сети.

Разработанная математическая модель позволяет по зависимости тока ПУ от времени на одном цикле работы производить моделирование процессов энергопотребления в стационарном режиме работы РЛС и определить спектральный состав тока, потребляемого ПУ.

Полученные результаты дают возможность определить уровень электромагнитной совместимости ПУ, оценить его влияние на электромагнитную обстановку в системе автономного электроснабжения РЛС, а также обосновать расчет входных фильтров цепей электроснабжения ПУ и выбор, при необходимости, типа и параметров устройств коррекции гармонического состава потребляемого тока.

Долов Василий Николаевич,
Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники,
начальник отдела,
телефон (831) 4-650-216,
e-mail: STO@nniirt.ru

Стрелков Владимир Федорович,
Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
телефон (831) 4-650-216,
e-mail: STO@nniirt.ru

Андрюхин Максим Владимирович,
Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники,
инженер, аспирант,
телефон (831) 4-695-907,
e-mail: STO@nniirt.ru

Ваняев Валерий Владимирович,
Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е.Алексеева,
кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок,
телефон (831) 4-369-359,
e-mail: era@nntu.nnov.ru

Список литературы

1. **Хватов С.В., Ваняев В.В., Стрелков В.Ф.** Электромагнитные процессы в системе питания передающих устройств РЛС // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 3. – С. 32–37.
2. **Мерабишвили П.Ф., Ярошенко Е.Н.** Нестационарные электромагнитные процессы в системах с вентилями. – Кишинев: Штиинца, 1980.
3. **Дьяконов В.П.** MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 в. Основы применения: Полное руководство пользователя. – М.: Солон-Р, 2002.

References

1. Khvatov, S.V., Vanyaev, V.V., Strelkov, V.F. Elektromagnitnye protsessy v sisteme pitaniya peredayushchikh ustroystv RLS [Electromagnetic Processes In Power Supply System of Transmitting Devices of Radar Stations]. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 3, pp. 32–37.
2. Merabishvili, P.F., Yaroshenko, E.N. *Nestatsionarnye elektromagnitnye protsessy v sistemakh s ventilyami* [Non-stationary Electromagnetic Processes in Systems with Valves]. Kishinev, Shtiintsa, 1980.
3. D'yakonov, V.P. *MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 in. Osnovy primeneniya: Polnoe rukovodstvo pol'zovatelya* [Foundations of Application: Complete User's Manual]. Moscow, Solon-R, 2002.