



ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет и выбор параметров синусных фильтров частотно-регулируемых приводов с ШИМ-инвертором напряжения

Сазонов А. С., канд. техн. наук, Лебедев Д. Ю., инж.

ОАО «СПИК СЗМА», Санкт-Петербург

Предложена методика расчета и выбора параметров синусного фильтра при условии минимальной суммарной относительной установленной мощности его элементов, заданных диапазонах изменения выходной частоты и нагрузки и коэффициенте гармоник выходного напряжения, соответствующем требованиям стандарта. Проведены испытания фильтра, рассчитанного и выбранного по этой методике. Даны осциллограммы входных и выходных токов и напряжений, а также спектры его входного и выходного напряжений при выходной частоте 50 Гц и токе нагрузки 400 А.

Ключевые слова: частотно-регулируемый привод (ЧРП), широтно-импульсная модуляция (ШИМ), ШИМ-инвертор напряжения, синусный фильтр, коэффициенты гармоник входного и выходного напряжения фильтра, основная, несущая и резонансная частоты.

Для регулирования частоты вращения многих механизмов, в частности электропогружных насосов с асинхронными двигателями (АД), используются частотно-регулируемые приводы на основе трехфазных ШИМ-инверторов напряжения с синусоидальным выходным напряжением. Это напряжение формируется с помощью различных фильтров, наиболее распространенным из которых является однозвенный трехфазный LC-фильтр. Из-за сложности аналитического расчета выбор его параметров обычно осуществляется либо экспериментально, что представляет собой трудоемкий и кропотливый процесс, либо путем компьютерного моделирования, что также вызывает определенные трудности.

В настоящей статье рассмотрены основные положения упрощенного расчета и выбора параметров синусного фильтра с требуемым качеством выходного напряжения, характеризваемым его коэффициентом гармоник. Для ЧРП конкретного типоразмера это осуществляется при наличии следующих исходных данных:

- напряжения питающей сети на входе ЧРП;
- спектра гармоник входного напряжения фильтра;
- кратности несущей и модулирующей частот инвертора;
- диапазона регулирования выходной частоты;
- характеристики нагрузки;

принятого критерия оптимальности для рассчитываемого фильтра.

Расчет и выбор выходного фильтра инвертора проводят при имеющемся частотном спектре напряжения на входе и коэффициенте гармоник выходного напряжения, регламентируемом ГОСТ Р 52776–2007 для электрических машин. В [1] предлагается использовать критерий подобия для однозвенного LC-фильтра нижних частот, связанный с определением минимума его суммарной относительной установленной мощности. По этому критерию можно выбрать параметры элементов фильтра при известном коэффициенте гармоник его входного напряжения, зависящего от диапазона регулирования амплитуды первой гармоники напряжения инвертора и значения нагрузки, при заданном качестве выходного напряжения фильтра.

При анализе фильтров инверторов на первом этапе и в практических приложениях учитывают только реактивную мощность по основной гармонике, так как она существенно больше суммарной реактивной мощности по высшим гармоникам в том же элементе фильтра.

При заданной выходной мощности ЧРП массогабаритные показатели однозвенного LC-фильтра определяются заданным коэффициентом гармоник выходного напряжения и

коэффициентом гармоник его входного напряжения.

Коэффициент подобия фильтра m^2 для однозвенного LC-фильтра нижних частот связан с коэффициентом гармоник входного и выходного напряжений $k_{г.вх}$, $k_{г.вых}$ и параметрами фильтра следующим соотношением [2]:

$$m^2 = \left(1 + \frac{k_{г.вых}}{k_{г.вх}} \right) \left/ \left(1 + N^2 \frac{k_{г.вых}}{k_{г.вх}} \right) \right. = \omega_1^2 LC, \quad (1)$$

где $N = \omega_0/\omega_1$ — кратность несущей и моделирующей частот.

Квадрат волнового сопротивления фильтра рассчитывается по формуле

$$L/C = Z_H^2 (1 + m^2), \quad (2)$$

где Z_H — полное сопротивление нагрузки.

Из соотношения (1) и формулы (2) находят параметры фильтра.

Резонансную частоту фильтра вычисляют по уравнению

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3)$$

Связь между выходным напряжением выпрямителя и трехфазной системой выходного напряжения инвертора с трехфазной нагрузкой можно установить с помощью обобщенного (результатирующего) вектора напряжения для трехфазных систем.

Амплитуда основной гармоники напряжения на выходе инвертора (на входе фильтра) U_{m1} зависит от коэффициента регулирования k_p , а на выходе фильтра она определяется из выражения

$$U_{вых} = U_{m1} W_1, \quad (4)$$

где

$$W_1 = \frac{1}{\sqrt{(1-m^2)[1+2\sin\varphi\sqrt{m^2(1+m^2)}]+2m^4}} \quad (5)$$

— коэффициент передачи фильтра по первой гармонике при работе на активно-индуктивную нагрузку, приведенный в [3].

При питании насосных установок мощность на валу приводного двигателя в зависимости от частоты вращения изменяется по закону

$$P_1 = P_{ном}(\omega_1/\omega_{ном})^3 = P_{ном}(k_p)^3, \quad (6)$$

где ω_1 и $\omega_{ном}$ — текущая и номинальная (базовая) частоты вращения; P_1 , $P_{ном}$ — текущая и номинальная (базовая) активные мощности нагрузки.

Тогда полная мощность нагрузки

$$S_H = P_{ном}(k_p)^3/\cos\varphi. \quad (7)$$

Для определения коэффициента гармоник входного напряжения фильтра необходимо учитывать спектральный состав напряжения на выходе инвертора, зависящий от способа формирования его многоимпульсного напряжения.

В [2] проанализированы различные алгоритмы работы инверторов напряжения и спектральный состав их выходного напряжения. Анализ показывает, что, например, спектральный состав напряжения с однополярной ШИМ, полученный путем синусоидальной модуляции длительности импульсов, при достаточно большой кратности несущей и модулирующей частот практически неизменен.

Установлено, что в типовой спектральный состав напряжения однополярной ШИМ с включением первой группы учитываемых гармонических составляющих, необходимых для расчета силового однозвенного LC-фильтра, входят четыре гармонических составляющих, имеющих кратности $N-3$, $N-1$, $N+1$, $N+3$. При этом амплитуды гармонических составляющих, практически не зависящие от кратности частот, определяются значением коэффициента регулирования k_p .

Приведены относительные значения учитываемых гармонических составляющих для различных кратностей частот в зависимости от коэффициента регулирования, которые можно использовать для практических расчетов при любых кратностях частот.

Анализ гармонического состава импульсного напряжения на выходе инвертора в заданных диапазонах регулирования амплитуды его первой гармоники и значения нагрузки при различных видах модуляции (ШИМ, ШИМ-КД) показывает, что гармоники выходного напряжения имеют наихудший состав при минимальном коэффициенте регулирования [1]. Поэтому коэффициент гармоник выходного напряжения фильтра в значительной части диапазона регулирования оказывается меньше соответствующего требованиям ГОСТ.

Следует иметь в виду, что для получения достоверных результатов при практических измерениях коэффициента гармоник напря-

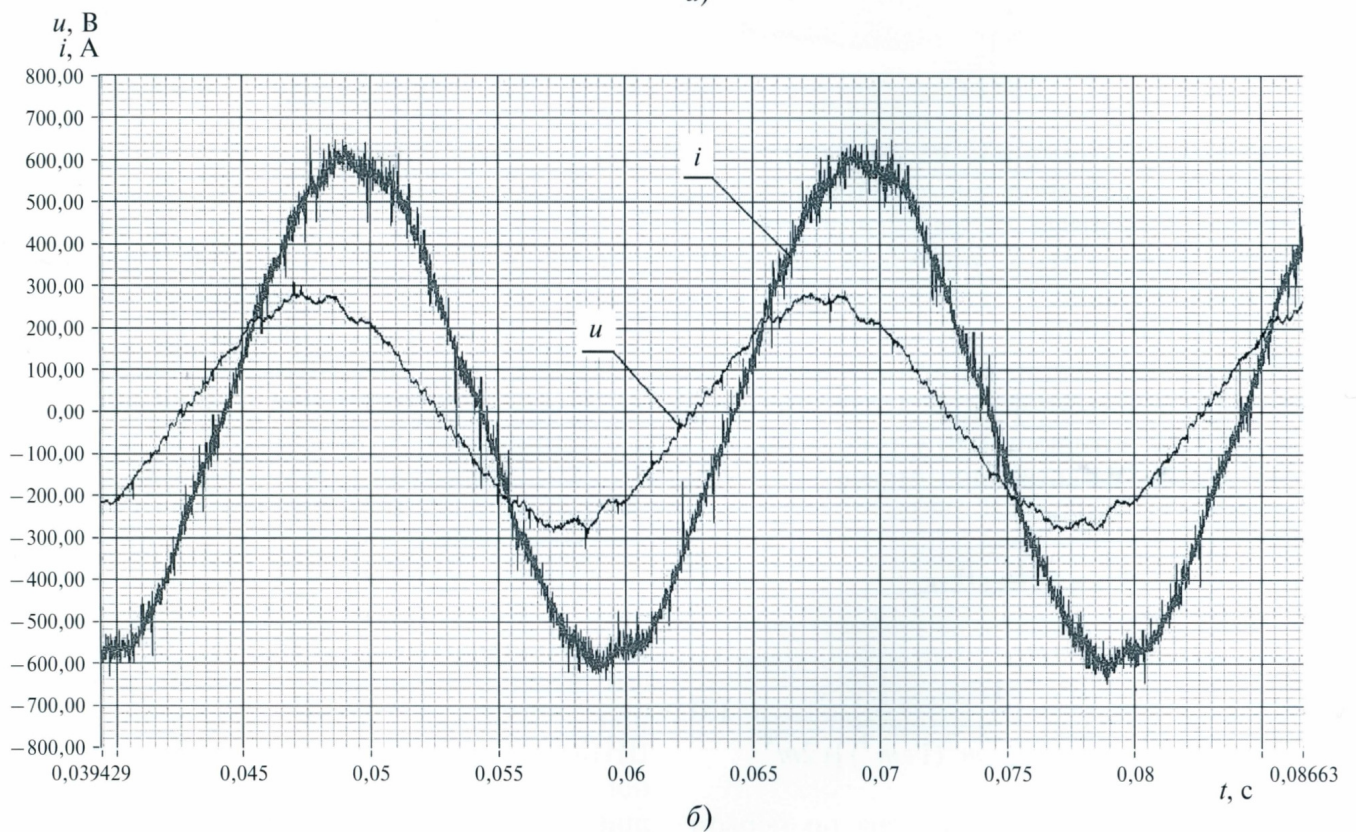
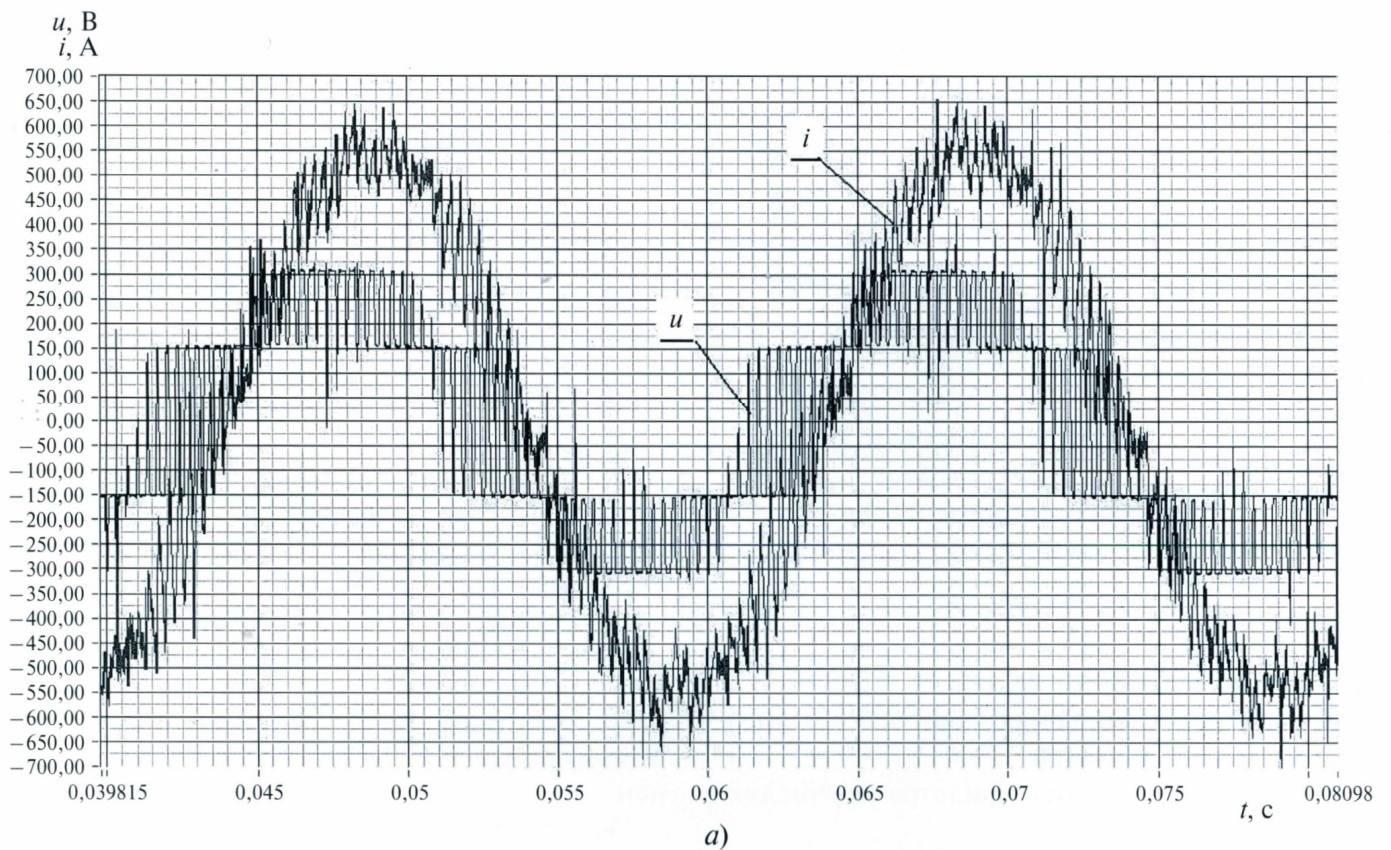


Рис. 1

жения на выходе фильтра необходимо использовать измерительный прибор, фиксирующий максимальные гармоники с кратностью не менее $N + 3$.

Порядок выбора параметров элементов синусного фильтра

Для определения расчетных значений индуктивности и емкости фильтра предвари-

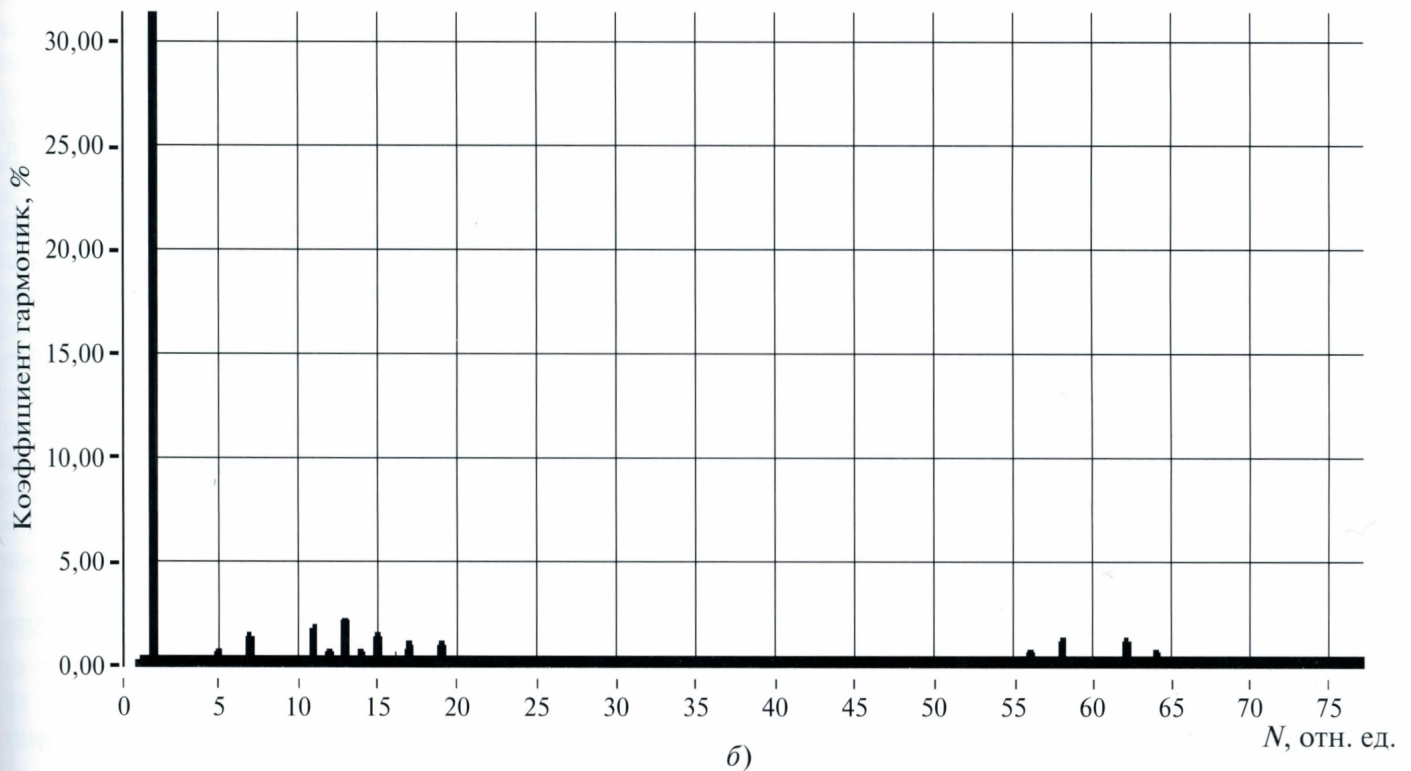
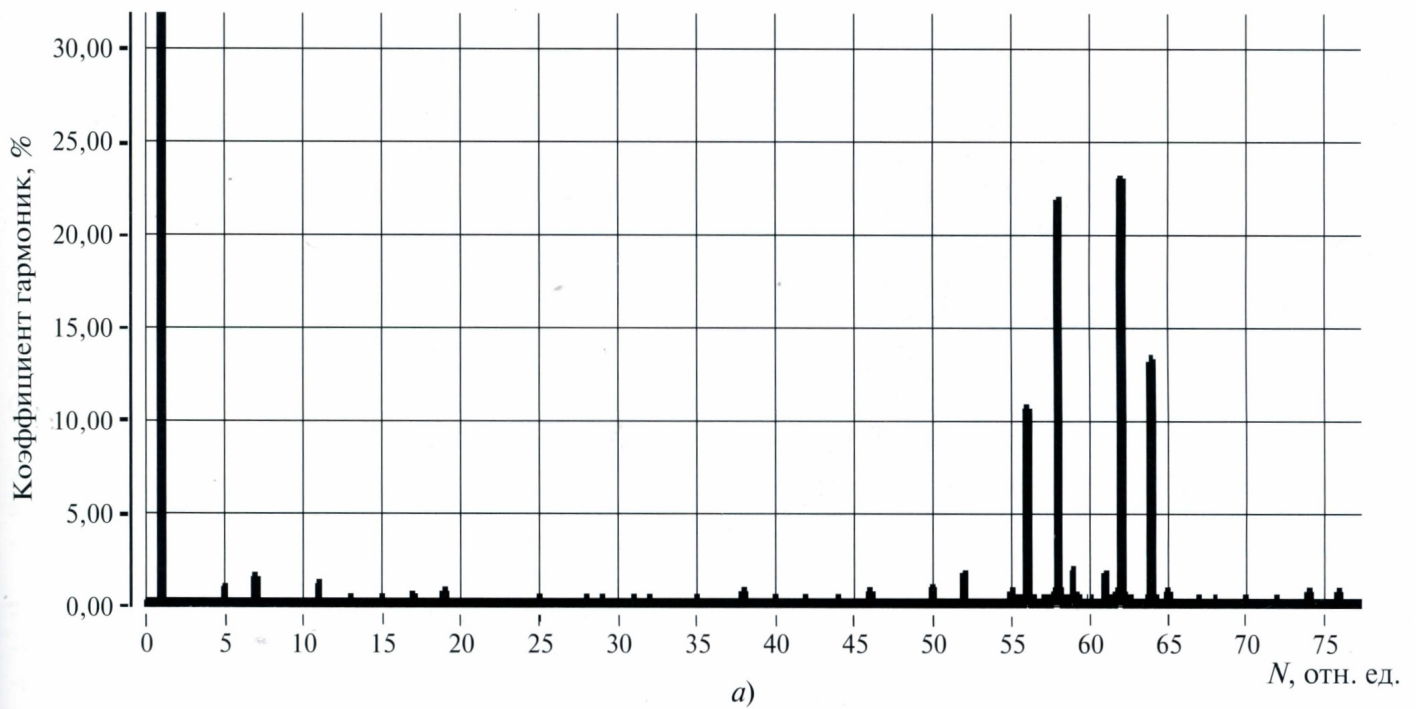


Рис. 2

тельно вычисляют на максимальной и минимальной частотах следующие параметры:

коэффициент гармоник входного напряжения $k_{Г.ВХ1}$ для заданных значений k_p и N ;

критерий подобия при требуемом и вычисленном коэффициентах гармоник соответственно выходного $k_{Г.ВЫХ}$ и входного $k_{Г.ВХ1}$ напряжений;

коэффициент передачи фильтра по первой гармонике при активно-индуктивной нагрузке;

амплитуду напряжения на выходе фильтра.

Далее по критерию подобия и полному сопротивлению нагрузки, исходя из полной мощности нагрузки, находят емкость и индуктивность фильтра. Из рассчитанных в двух режимах работы значений отбираем наибольшие для удовлетворения качества выходного напряжения во всем диапазоне регулирования частоты. Затем выбираем значения емкости и индуктивности фильтра из

стандартного ряда и для них проверяем коэффициент гармоник выходного напряжения фильтра. После этого определяем резонансную частоту фильтра.

Все вычисления можно проводить на персональном компьютере с использованием пакета математических вычислений Mathcad.

Практическая реализация синусных фильтров

Синусные фильтры конструктивно размещаются в шкафу ЧРП или в отдельном шкафу, причем элемент индуктивности может быть выполнен в виде дросселя с магнитопроводом или в виде воздушного реактора. Использование воздушного реактора в отдельном стоящем шкафу с экономической точки зрения выгоднее, чем дросселя с магнитопроводом. Завод ОАО “СПИК СЗМА” выпускает синусные фильтры серии SWF обоих типоразмеров на токи до 630 А.

По разработанной методике был рассчитан и изготовлен синусный фильтр для работы совместно с ЧРП с диапазоном регулирования выходной частоты 30 – 70 Гц и несущей частотой ШИМ-инвертора напряжения 3 кГц при требуемом коэффициенте гармоник выходного напряжения не более 5% в заданном диапазоне регулирования при квадратичной зависимости момента на валу АД от частоты вращения.

На рис. 1 приведены осциллограммы фазных токов и напряжений на входе (а) и выходе (б) синусного фильтра с воздушным реактором при частоте 50 Гц и токе 400 А,

подключенного на выход ЧРП типа SCD-439КСВ, работающего на АД с короткозамкнутым ротором 200 кВт, 380 В, 1500 об/мин (синхронная частота вращения) с нагрузочной машиной постоянного тока. Испытания проведены на испытательном стенде ФГУП “ЦНИИСЭТ” (Санкт-Петербург).

Коэффициент гармоник выходного напряжения фильтра во всем диапазоне заданных частот не превышал 5%. Измерения проведены электроизмерительным регистрирующим прибором “След” и обработаны с помощью программы LabVIEW.

На рис. 2 показаны спектры гармоник фазных напряжений на входе (а) и выходе (б) синусного фильтра на номинальной частоте 50 Гц при выходном токе 400 А.

Подтверждено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, полученных в режиме реальных нагрузок при квадратичной зависимости момента от частоты вращения.

Список литературы

1. **Выбор** параметров фильтров инверторов — ЭТВА / Г. М. Малышков, В. В. Крючков, И. Н. Соловьев и др. Под ред. Ю. И. Конева. — М.: Радио и связь, 1986, вып. 17.
2. **Крючков В. В., Малышков Г. М., Соловьев И. Н.** Кодовое широтно-импульсное регулирование для инверторов. — Практическая силовая электроника, 2001, № 1.
3. **Бедфорд Б., Хофт Р.** Теория автономных инверторов / Пер. с англ. под ред. И. В. Антика. — М.: Энергия, 1969.

Arefiy_Sazonov@szma.com

Уважаемые подписчики!

Редколлегия журнала “Промышленная энергетика” обращается к вам с просьбой сообщить о себе некоторые данные. Сообщения просим отправлять в редакцию по электронной почте prom_energy@rambler.ru

Фамилия, имя, отчество _____

Электронный адрес _____

Город (поселок) _____

Название организации _____

Вид организации (монтажная, эксплуатационная, проектная, научно-исследовательская, учебная, и др.) _____