

УДК 621.317

Г.И. Коробко, И.Г. Коробко

УСТРОЙСТВО ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЕ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Волжский государственный университет водного транспорта

Цель: Разработка и исследование устройства для измерения токов и мощностей, потребляемых нагрузкой от генераторных агрегатов с изменяемой частотой вращения.

Методы исследования: Аналитический расчет и моделирование в пакете Matlab Simulink.

Результаты: Разработана схема устройства для определения активных и реактивных токов при изменении частоты питающего напряжения на базе пассивных элементов, обеспечивающая высокую точность измерения базовых параметров для вычисления мощностей, отдаваемых или потребляемых источниками или потребителями соответственно.

Выводы: Предложенное устройство обеспечивает высокое быстродействие и точность измерения параметров в автономных электрических системах, обладает простотой и надежностью. Модель устройства измерения может быть применена при моделировании систем управления автономными электростанциями и другими электрическими объектами.

Ключевые слова: генераторный агрегат с изменяемой частотой вращения, параллельная работа генераторов, активная мощность, реактивная мощность, устройство измерения.

Режим параллельной работы генераторных агрегатов используется в автономных электростанциях в связи с тем, что потребность в электроэнергии меняется в зависимости от нагрузки автономных объектов. В каждом из режимов работы количество параллельно работающих генераторов устанавливается таким образом, чтобы нагрузка каждого из них составляла 70-90% от номинальной. При изменении суммарной нагрузки должно изменяться количество параллельно работающих генераторов [1].

Применение режима параллельной работы обеспечивает использование каждого агрегата при наивысших значениях КПД и не допускает эксплуатацию при нагрузках менее 30% от номинальной. Для обеспечения большей надежности электростанции при дроблении установленной мощности между несколькими генераторами уменьшается вероятность отказа всей системы электроснабжения в целом.

Подключение активной нагрузки параллельно работающих агрегатов принимается в соответствии с взаимным расположением их скоростных характеристик. Если они совпадут друг с другом, то активная нагрузка распределяется поровну, если же характеристики не совпадают, то возникает неравномерное распределение. Чтобы принудительно распределять активные нагрузки между параллельно работающими генераторами, необходимо увеличить уставку одного агрегата и уменьшить уставку другого.

Параллельно работающие синхронные генераторы отдают в нагрузку одинаковые реактивные мощности, если их ЭДС одинаковы. Увеличение возбуждения одной из машин приводит к увеличению её доли реактивной нагрузки и уменьшению доли второй машины. При параллельной работе генераторов их токи возбуждения (относительные величины) должны быть одинаковыми. Если этого равенства нет, то реактивные нагрузки распределяются неравномерно. Для распределения реактивной нагрузки создается статизм каждого из параллельно работающих генераторов по реактивному току. Устойчивое распределение реактивной нагрузки обеспечивается обычно с помощью датчиков реактивного тока для измерения разности выходных сигналов датчиков и подачи разности на вход регуляторов напряжения генераторов.

Чтобы определить активный I_a и реактивный I_p ток, необходимо сначала рассчитать

угол между напряжением и током – угол φ , а затем величины $\cos\varphi$ и $\sin\varphi$. Тогда $I_a = I_\Gamma \cos\varphi$, $I_p = I_\Gamma \sin\varphi$, где I_Γ – ток, потребляемый нагрузкой от генератора. Это достаточно сложная задача, особенно в случае работы дизель-генератора с изменяемой частотой вращения. Применение датчиков активного и реактивного тока на базе устройств модуляции-демодуляции напряжения генератора U_Γ и тока I_Γ не обеспечивает достаточную точность измерения токов I_a и I_p при отклонении частоты вращения дизель-генератора ω_Γ от номинальной величины на 5% и более.

Как показывает практика, реализация принципа фазного компаундирования в системах возбуждения синхронных генераторов использует суммирование векторов напряжения и тока нагрузки [2]. Этот способ основан на векторной диаграмме, представленной на рис. 1, а. Для питания обмотки возбуждения синхронного генератора используют выпрямленное линейное напряжение в виде треугольника, стороны которого зависят от величины тока и характера нагрузки. В режиме холостого хода линейное напряжение определяется треугольником ABC . При активной нагрузке появляются векторы тока i_{Aa} и $-i_{Ba}$ и треугольник линейных напряжений станет $A''B''C''$, а при индуктивной нагрузке векторы тока i_{Ap} и $-i_{Bp}$ изменят треугольник напряжений к виду $A'B'C'$. Как видно, стороны треугольников ABC и $A''B''C''$ практически равны, а величина выпрямленного напряжения будет одинаковой и не зависит от активного тока нагрузки. При появлении индуктивного тока нагрузки треугольник $A'B'C'$ будет больше треугольника ABC , и величина выпрямленного напряжения возрастет. Таким образом, приращение выпрямленного напряжения при постоянной величине векторов напряжения будет пропорционально величине реактивного тока нагрузки.

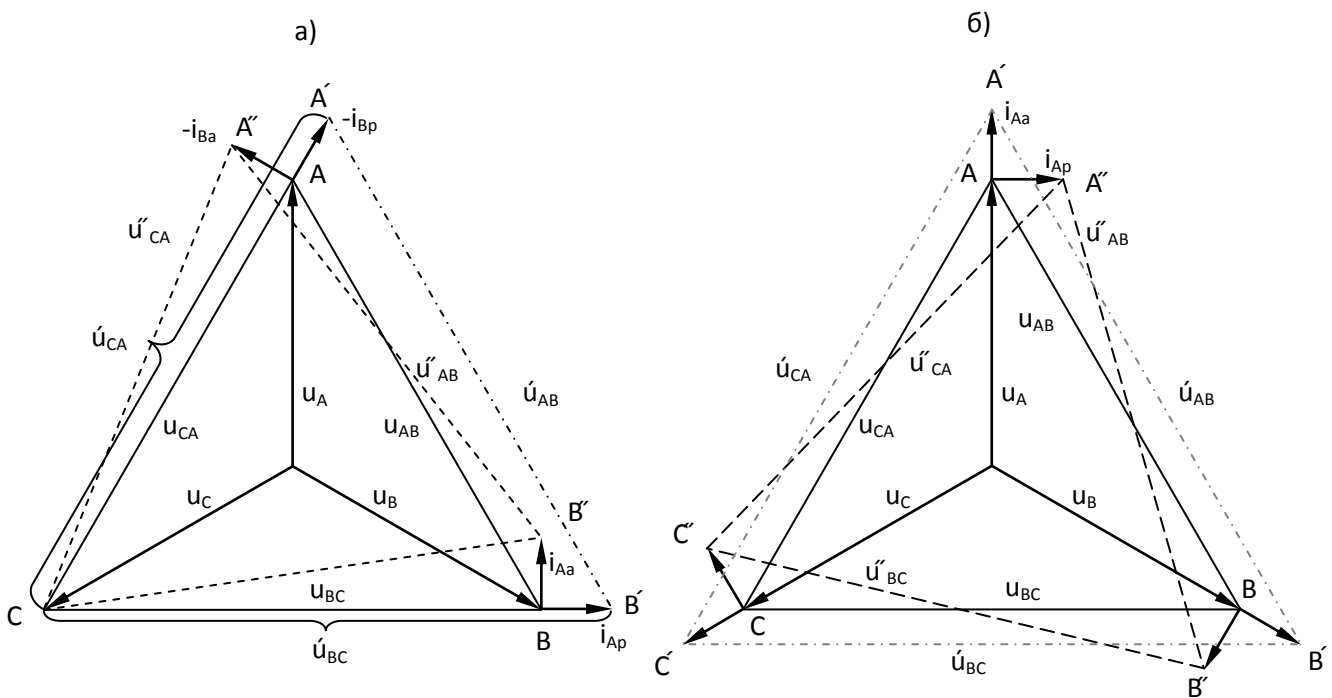


Рис. 1. Векторная диаграмма, поясняющая принцип измерения токов нагрузки:

a – реактивного; *б* – активного

Для определения величины активного тока воспользуемся векторной диаграммой на рис. 1, б. На ней показано суммирование векторов напряжений и токов соответствующих фаз ($\vec{u}_A + \vec{i}_A$, $\vec{u}_B + \vec{i}_B$ и $\vec{u}_C + \vec{i}_C$). Аналогично предыдущей диаграмме (рис. 1, а), в режиме холостого хода величина треугольника линейного напряжения ABC будет практически равна треугольнику $A''B''C''$, в котором добавлены векторы реактивного тока фаз $-i_{Ap}$, $-i_{Bp}$, $-i_{Cp}$. При чисто активной нагрузке за счет векторов тока i_{Aa} , i_{Ba} и i_{Ca} величина треугольника $A'B'C'$ станет

больше. Следовательно, приращение величины выпрямленного напряжения будет пропорционально значению активного тока нагрузки.

Анализ обеих диаграмм показывает, что точность оценки приращения реактивного и активного токов обеспечивается, если соотношение векторов номинального тока и фазного напряжения меньше, чем на порядок, при этом влияние противоположных воздействий (активного и реактивного тока соответственно) будет несущественным.

На рис. 2 показана блок-схема устройства измерения активных и реактивных токов и мощностей, потребляемых нагрузкой при переменной частоте питающего напряжения.

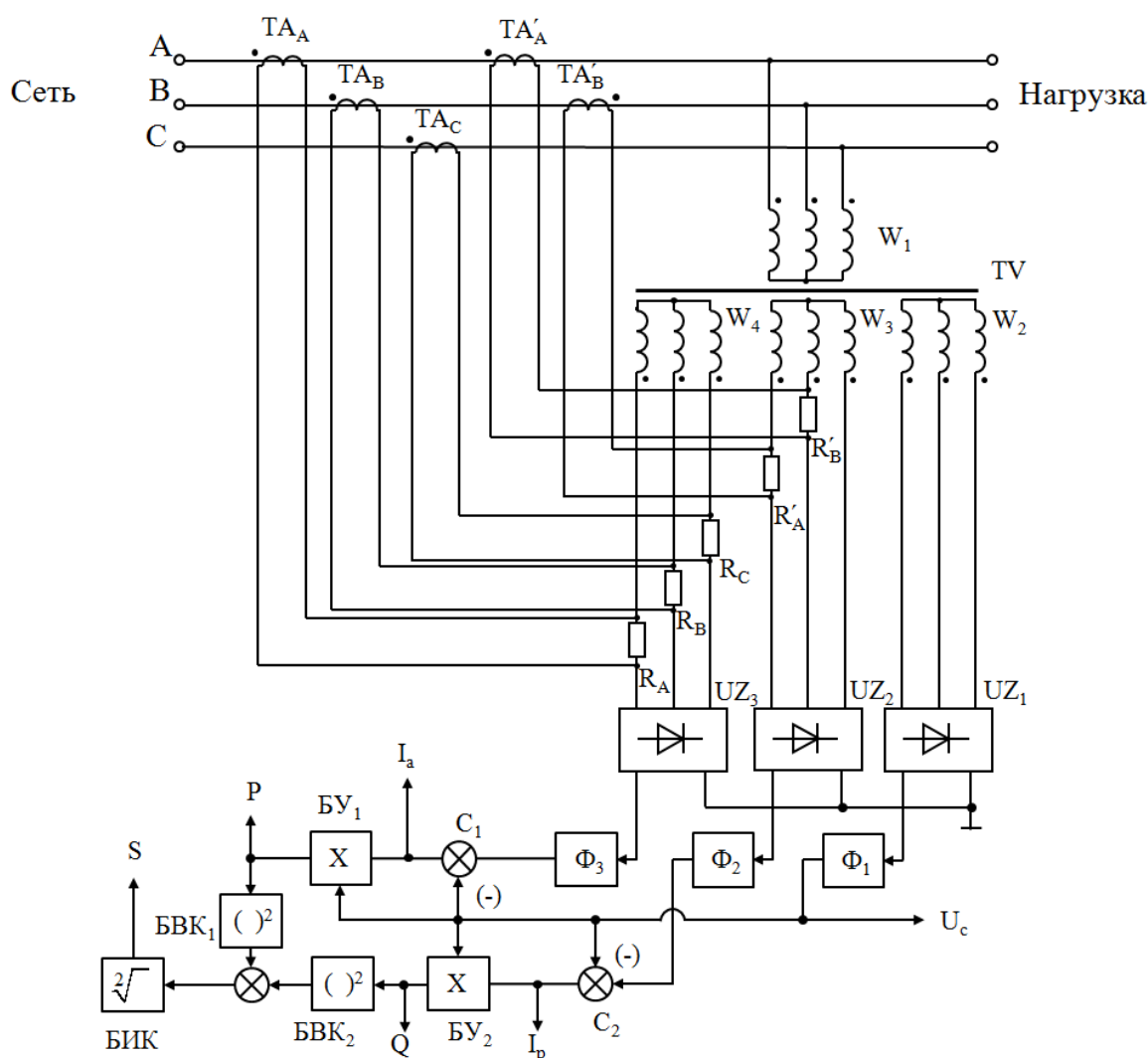


Рис. 2. Блок-схема устройства измерения токов и мощностей при переменной частоте напряжения

В состав схемы входят пять трансформаторов тока (по два трансформатора в фазах *A* и *B*, и один в фазе *C*) – TA_A , TA_B , TA_C и TA'_A , TA'_B , трехфазный трансформатор напряжения – *TV* с тремя одинаковыми вторичными обмотками, соединенными звездой. Обмотка W_2 подключена к трехфазному мостовому выпрямителю UZ_1 , на выходе которого будет получено выпрямленное напряжение, пропорциональное сетевому. Два вывода обмотки W_3 присоединены к нагрузочным сопротивлениям R'_A и R'_B , к которым подключены вторичные обмотки трансформаторов тока TA'_A и TA'_B соответственно. В результате на входах трехфазного мостового выпрямителя UZ_2 будет получен вид векторной диаграммы, представленной на рис. 1, *a*, а на выходе UZ_2 будет выпрямленное напряжение, пропорциональное сумме напряжения сети и реактивного тока. Обмотка W_4 через нагрузочные сопротивления R_A , R_B и R_C подключе-

на к выводам трехфазного мостового выпрямителя UZ_3 . К нагрузочным сопротивлениям подключены вторичные обмотки соответствующих трансформаторов тока – TA_A , TA_B и TA_C . Аналогично предыдущему случаю, на входах выпрямителя UZ_3 будет получен вид векторной диаграммы, представленной на рис. 1, б, а на выходе выпрямителя будет выпрямленное напряжение, пропорциональное сумме напряжения сети и активного тока.

К выходам выпрямителей подключены фильтры низкой частоты Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 второго порядка. В результате сравнения сигналов с выходов фильтров Φ_3 и Φ_1 на выходе сумматора S_1 будет получен сигнал, пропорциональный активному току нагрузки I_a , а на выходе сумматора S_2 , после сравнения выходных сигналов фильтров Φ_2 и Φ_1 , будет сигнал, пропорциональный реактивному току I_p . Для получения сигналов, пропорциональных активной P и реактивной Q мощности в блоки умножения – $БУ_1$ и $БУ_2$ поданы сигналы, пропорциональные напряжению сети (с выхода фильтра Φ_1) U_c и токам I_a и I_p (соответственно). При формировании сигнала, пропорционального полной мощности S , используется выражение $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$. Для этого требуется установка двух блоков возведения в квадрат – $БВК_1$ и $БВК_2$ – одного блока извлечения квадратного корня $БИК$.

Как видно из схемы устройства измерения на рис. 2, его простота объясняется применением минимального количества пассивных элементов, а именно трансформаторов тока, одного трансформатора напряжения, резисторов, диодных выпрямителей и фильтров. В качестве активных элементов могут быть использованы аналоговые и аналогово-цифровые элементы [3] или программируемый логический контроллер (ПЛК). Достоинством предложенного устройства является максимально возможное быстродействие, которое объясняется частотой возобновления информации 300 Гц.

Для оценки работоспособности и быстродействия разработана модель в среде Matlab Simulink [4], представленная на рис. 3.

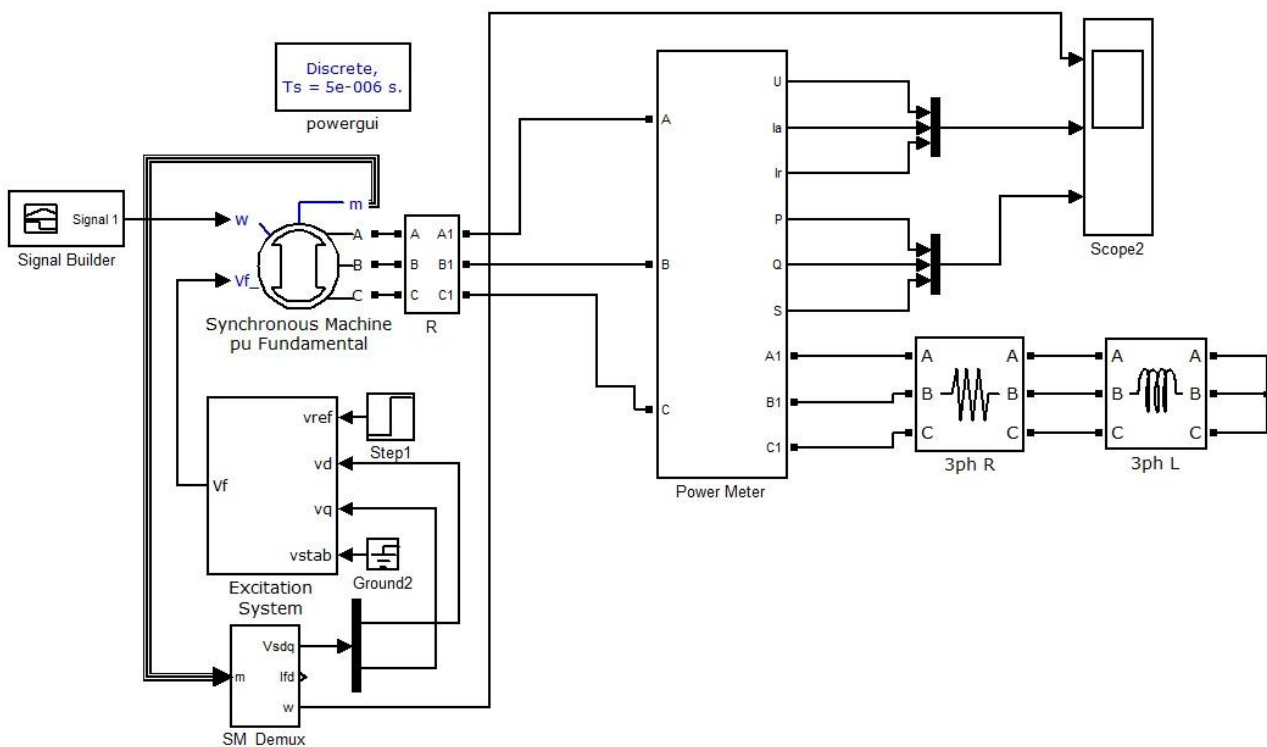


Рис. 3. Модель устройства измерения токов и мощностей, потребляемых нагрузкой при переменной частоте питающего напряжения

В модели использованы стандартные блоки библиотеки SimPowerSystem. Генератор представлен эквивалентной явнополюсной фундаментальной синхронной машиной Syn-

сynchronous Machine pu Fundamental мощностью 200 кВт с номинальным выходным напряжением 415В частотой 50 Гц. Задание частоты вращения генератора осуществляется с помощью блока построения сигнала Signal Builder. Регулятор возбуждения генератора представлен блоком Excitation System, который формирует напряжение возбуждения V_f в соответствии с величиной выходного напряжения на зажимах генератора и заданием, поступающим на вход v_{ref} . Блок SM_Debug предназначен для разбивки текущих параметров генератора с выхода m (напряжения V_d и V_q , которые поступают на вход регулятора возбуждения, и частоты вращения генератора ω). К выходу генератора через блок Power Meter подключена активная (блок 3ph R) и индуктивная (блок 3ph L) нагрузка. Блок Power Meter измеряет значения активного и реактивного тока, потребляемого нагрузкой, выходного выпрямленного напряжения, пропорционального сети, а также вычисляет активную, реактивную и полную мощность. Для отображения результатов измерений используется осциллограф с мультиплексорами Scope 2.

Результаты моделирования представлены на диаграмме на рис. 4.

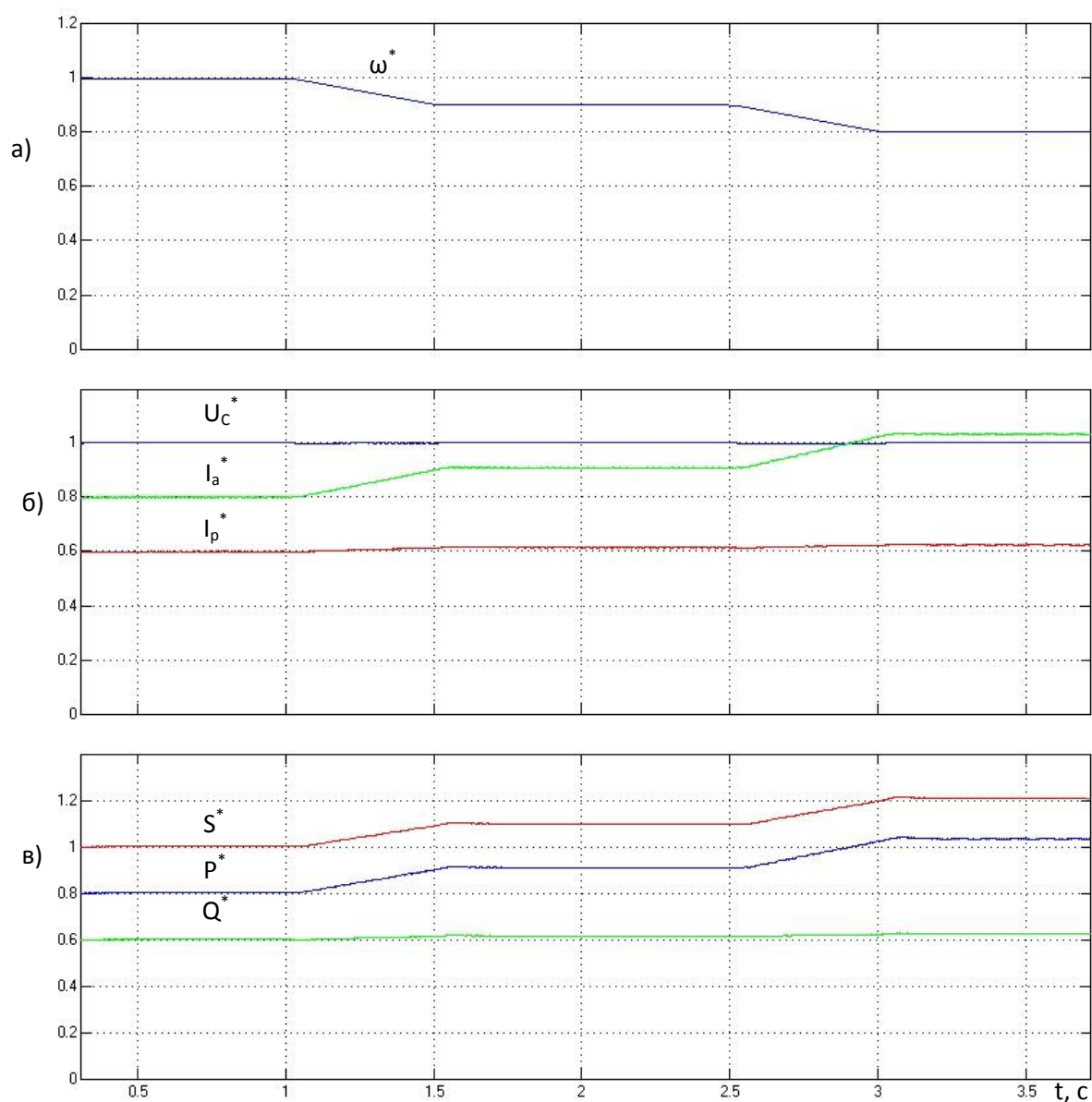


Рис.4. Диаграммы измерения для нагрузки с параметрами $U_C=400\text{В}$, $S_H=150\text{кВА}$, $\cos \varphi_H=0,8$:
 а – изменение частоты вращения; б – токов; в – мощностей

При номинальной частоте вращения синхронного генератора (относительно величины $\omega_H^* = 1$) до момента времени 1 с имеют место номинальные значения активных и реактивных токов и мощностей, полной мощности и напряжения сети при нагрузке с $\cos\varphi = 0,8$. На интервале от 1 до 1,5 с частота вращения генератора, а следовательно, и частота сетевого напряжения снижается по линейному закону до 0,9 ω_H . При этом реактивная составляющая нагрузки L будет уменьшаться, а общий ток нагрузки увеличиваться. В результате реактивный ток незначительно увеличивается до значения 0,63, а активный ток составляет величину 0,92. Установившийся режим на участке от 1,5 до 2,5 с соответствует постоянным значениям реактивной – 0,63, активной – 0,92 и полной – 1,1 мощности. На интервале от 2,5 с до 3 с частота сетевого напряжения вновь снижается до значения 0,8 от номинальной величины и, аналогично, реактивный и активный ток растут до значения 0,66 и 1,04 соответственно. При этом активная, реактивная и полная мощности составляют величины 0,66, 1,04 и 1,22 соответственно. При отклонении частоты напряжения сети его амплитуда, а следовательно, и величина выпрямленного напряжения, остаются номинальными за счет автоматической системы стабилизации напряжения генератора.

Анализ представленных диаграмм показывает, что точность измерения активных и реактивных токов и мощностей оценивается ошибкой 2-3%. Запаздывание измеряемых параметров составляет 0,05 с за счет использования в устройстве фильтров с достаточно большой постоянной времени, при этом пульсации в диаграмме практически отсутствуют.

Разработанное устройство, как показало моделирование, обеспечивает хорошую точность, динамические показатели и простоту, и, как следствие, высокую надежность.

Библиографический список

1. **Баранов, А.П.** Судовые автоматизированные электроэнергетические системы: учебник для вузов / А.П. Баранов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Судостроение, 2005.
2. **Соловьев, Н.Н.** Судовые электроэнергетические системы: учебник для вузов / Н.Н. Соловьев, В.И. Самулеев. – М.: Транспорт, 1991.
3. **Волович, Г.И.** Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г.И. Волович. – М.: Додэка-XXI, 2005.
4. **Дьяконов, В.П.** MATLAB и Simulink в электроэнергетике: справочник / В.П. Дьяконов, А.А. Пеньков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009.

*Дата поступления
в редакцию 27.06.2016*

G.I. Korobko, I.G. Korobko

THE MEASURING DEVICE OF ACTIVE AND REACTIVE POWER AT A VARIOUS FREQUENCY POWER SUPPLY

Volga state university of water transport

Purpose: Designing and analysis of the measuring device of currents and power, consumed by load from generator plants with various frequency of rotation.

Design/methodology/approach: Analytical computation and simulation in Matlab Simulink.

Findings: The schematic of the measuring device of active and reactive currents at a various frequency power supply is developed. The device based on passive elements, and it provides high accuracy of measuring of basic parameters for calculating the power, generated or consumed by sources or consumers.

Originality/value: The device provides high performance and measuring accuracy of parameters in autonomous electrical systems, is simple and reliability. The model of measuring device can be used in designing of control systems of autonomous electric plants and other electric objects.

Key words: generator plant with variable speed of rotation, parallel operation of generators, active power, reactive power, measuring device.