

2. Бакаленко, В. И. Уменьшение погрешности средств измерений / В. И. Бакаленко, Т. А. Дейнека // Нефтехимия – 2021 : материалы IV Международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 22–24 ноября 2021 г. – Минск : БГТУ, 2021. – С. 243–244.

3. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977, 344 с. с ил.

УДК 621.316.7

КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ БЫТОВЫХ НАГРУЗОК

Вабищевич Л. И., Ярошевич А. В.

*Брестский государственный технический университет,
г. Брест, Республика Беларусь*

Потери в сетях электроснабжения анализируются давно, обстоятельно и системно. В полной мере это относится и к потерям из-за реактивных нагрузок. Однако, ситуация в бытовом потреблении электроэнергии анализируется в самом общем виде. Требования к компенсаторам реактивной мощности (КРМ) для бытовых нагрузок не сформулированы. Учитывая значительную долю бытового потребления электроэнергии, задача разработки КРМ является актуальной. Способ решения этой задачи и некоторые требования к устройствам предложены путём применения аналоговой схемы вычислителя для КРМ [1].

Для обеспечения экономической целесообразности применения решающим параметром должна быть стоимость устройства. Стоимость определяется построением электрических схем из простых и надёжных элементов, количество которых в схеме невелико. Такой подход позволит обеспечить и другое важнейшее требование – небольшие габариты – позволяющие встраивать КРМ в квартирные щиты энергоснабжения.

Распространение бытовых приборов с трансформаторами, электродвигателями и сложными электронными цепями привело к появлению реактивной (индуктивной) составляющей мощности (РМ), $\cos\varphi$ в таких цепях может составлять $\cos\varphi = 0,65 \dots 0,97$ [2]. Средневзвешенное значение $\cos\varphi = 0,85$.

Передача РМ к потребителю и ее потребление в сети приводят к дополнительным потерям активной мощности (АМ) в распределительных электрических сетях. При значении $\cos\varphi = 0,85$ РМ составляет 60 % от АМ. Вследствие этого возрастают и активные потери от передачи электроэнергии, которые при $\cos\varphi = 0,85$ составляют 15 % от полезной активной мощности у потребителя при 10% в случае чисто активной нагрузки.

При реализации схемы компенсации РМ необходимо решить следующие проблемы:

- измерение величины реактивных потерь в реальном времени;
- определение ёмкости компенсирующего конденсатора;
- коммутация к сети ёмкости из конденсаторной батареи.

Общая схема предлагаемого устройства для компенсации РМ бытового потребителя электрической энергии представлена на рисунке 1.

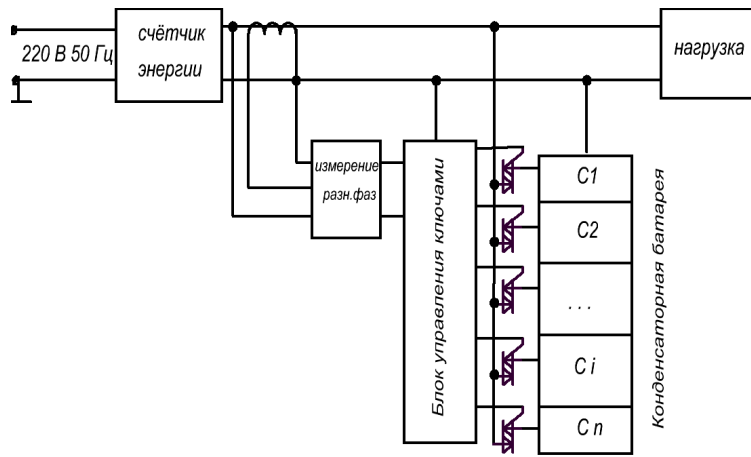


Рисунок 1 – Схема компенсатора

Наиболее эффективно можно реализовать схему компенсации РМ при использовании функции измерения разности фаз сетевого напряжения и тока нагрузки в электронном счётчике потребляемой электроэнергии. Для этого необходимо получить право доступа к соответствующим цепям счётчика.

Фазометр предназначен для измерения углов сдвига фаз между двумя изменяющимися периодически электрическими колебаниями. Предлагаемый электронный фазометр дает одновременно информацию о знаке и величине угла сдвига фаз.

Наиболее простые схемы реализуют метод, основанный на преобразовании интервала времени в напряжение [3].

Погрешности, присущие этому методу, обусловлены следующими характеристиками схем, реализующих фазометр. Частотный диапазон метода со стороны низких частот ограничен фильтром низких частот. Ограничение со стороны высоких частот определяется быстродействием логических микросхем. Точность измерения зависит от точности задания напряжения V_r , разности задержек во входных блоках фазового детектора и погрешности, с которой компараторы реагируют на пересечение входными сигналами нуля. Эта погрешность является результатом различия напряжений смещения у компараторов. Момент срабатывания компаратора зависит от скорости изменения входного сигнала.

В рассмотренном методе фактически измеряется время между моментами пересечения входными сигналами нуля. Форма входного сигнала не будет оказывать существенного влияния на результат измерения.

Предложено несколько схем реализации фазового детектора с компараторами входных сигналов. Рассмотрим детекторы с наиболее простой схемной реализацией. Самой простой схемой представлен детектор на ограничителях. Моделирование производилось при различных значениях входного напряжения в диапазоне $\Delta\varphi$ от 0 до 100 угловых градусов.

Результаты моделирования представлены на графике в рисунке 2 (ряд 3). Анализ результатов позволяет отметить два основных недостатка этой схемы. Первый – чувствительность невысокая, составляет около 5м В/град. Второй –

на углах до 30 градусов схема фактически не реагирует на разность фаз, это конструктивный недостаток схемы, не позволяющий применять её в вычислителе КРМ.

Небольшим по количеству элементов является фазометр на компараторах с транзисторными ключами. Результаты моделирования представлены в Таблице 1 ($u_{вых2}$) и на графике в рисунке 2 (ряд 2). По сравнению с предыдущей схемой чувствительность прибора значительно выше и составляет около 25 мВ/град. График представляет прямо пропорциональную практически линейную зависимость.

Несколько меньшее число элементов требуется для реализации схемы фазометра на компараторах с D – триггером. Результаты моделирования представлены в Таблице 1 ($u_{вых1}$) и на графике в рисунке 2 (ряд 1). По сравнению с предыдущей схемой чувствительность прибора ниже и составляет около 15мВ/град. График представляет обратно пропорциональную практически линейную зависимость.

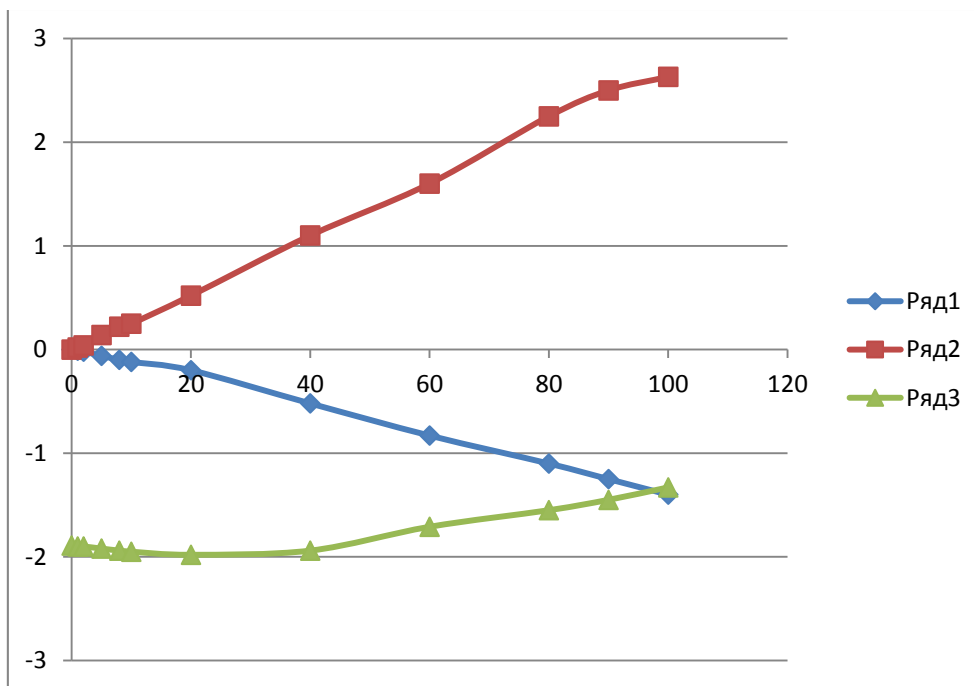


Рисунок 2 – Характеристики фазометров

Анализ результатов моделирования позволяет выделить схему фазометра на компараторах с транзисторными ключами. Эта схема имеет максимальную чувствительность и линейную прямо пропорциональную зависимость выходного напряжения от разности фаз входных сигналов. Такой сигнал на выходе схемы может использоваться для управления ключами коммутации конденсаторных батарей с минимальной корректировкой.

Схему управления ключами предлагается реализовать на основе асимптотических формул для расчёта ёмкости компенсирующего конденсатора [1].

Полная мощность нагрузки

$$\tilde{S} = UI\cos\varphi + jUI\sin\varphi = P + jQ, \quad (1),$$

где P – активная;
 Q – реактивная мощности.
 $Q/P = \operatorname{tg}\varphi$.

При средневзвешенном значении $\cos\varphi = 0,85$ погрешность от представления $\operatorname{tg}\varphi \approx \varphi$ (рад) не превысит 0,1 от значения $\operatorname{tg}\varphi$. Тогда соотношение активной и реактивной мощности можно представить формулой $Q/P \approx \varphi$.

Погрешность от представления $\cos\varphi \approx 1 - \varphi$ не превысит 0,12 значения $\cos\varphi$, тогда активную мощность можно представить формулой $P \approx UI(1 - \varphi)$, реактивную мощность $Q \approx UI(1 - \varphi)\varphi$.

Индуктивная мощность нагрузки, подлежащая компенсации

$$Q_L \approx UI_H(1 - \varphi)\varphi,$$

где U – напряжение сети; I_H – ток в нагрузке.

С другой стороны – ёмкостная РМ

$$Q_C = I_C^2 / (2\pi f C), \quad (6)$$

где f – частота сети; C – ёмкость компенсирующего конденсатора; $I_C = I_H \sin\varphi \approx I_H \varphi$ – ток ёмкости. Отсюда можно получить соотношение

$$C \approx \frac{I_H \varphi}{2\pi f U (1 - \varphi)} \text{ (Ф)},$$

а с учётом значений $f = 50$ Гц, $U = 220$ В

$$C \approx k I_H \varphi \text{ (Ф)} \quad (9),$$

где $k \approx 0,000015$.

Для вычисления значения ёмкости в МкФ коэффициент $k = 15$, тогда

$$C \approx 15 I_H \varphi \text{ (МкФ)}.$$

Эта асимптотическая формула может быть основой для построения схемы управления ключами.

Перемножение аналоговых сигналов I_H на $\frac{\varphi}{1 - \varphi}$ выполняется схемами с операционными усилителями.

С помощью логарифмических схем и операционных усилителей (ОУ) можно выполнять арифметическую операцию $X \cdot Y = e^{(\ln X + \ln Y)}$.

Логарифмические схемы изготавливаются на основе диода, включенного в петлю обратной связи ОУ. $I = I_0(e^{\frac{qU_{VD}}{kT}} - 1)$; $\ln\left(\frac{I}{I_0 + 1}\right) = \frac{qU_{VD}}{kT}$; поскольку $\frac{I}{I_0} \gg 1$

$$\ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right) \approx \ln\frac{I}{I_0}; \quad U_{VD} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right); \quad U_{\text{вых.}} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{U_{\text{вх.}}}{R_{\text{вх.}} I_0}\right).$$

Выход схемы управления ключами реализуется на аналогово – цифровом преобразователе, выходы которого управляют тиристорными ключами коммутации компенсаторной батареи.

Структурная схема АЦП включает в себя источник опорного напряжения $U_{\text{оп}}$, резистивный делитель $R_1 - R_{N+1}$, компараторы КН, преобразователь кодов, генератор тактовых импульсов ГТИ.

Для преобразования аналогового сигнала в n -разрядный двоичный код требуется $N = 2^n - 1$ компараторов. При таком числе компараторов максимальное значение преобразуемого аналогового сигнала определяется соотношением

$$U(t) = \left(1 - \frac{1}{2^n}\right) U_{\text{оп}}.$$

АЦП имеет выходной трехразрядный двоичный код $a_0 a_1 a_2$, делитель состоит из восьми резисторов и универсальный код имеет семь разрядов

($X_1 - X_7$). Конденсаторная батарея может быть построена на специальных компенсирующих конденсаторах. Расчёт ёмкости батареи конденсаторов при токе нагрузки $I_H = 25\text{А}$ и средневзвешенном значении $\cos\varphi = 0,85$ даёт величину $C = 320\text{ МкФ}$.

Существующие схемы и устройства компенсации РМ созданы для мощных промышленных потребителей и не могут использоваться в квартирных распределительных сетях.

Для эффективной компенсации РМ ёмкость конденсаторной батареи должна регулироваться в зависимости от фактического значения реактивной составляющей нагрузки.

Использование простых асимптотических соотношений для расчёта ёмкости позволяет построить простую надёжную схему управления ключами для коммутации конденсаторов.

Использование простой и недорогой схемы в цепях бытовой нагрузки позволяет получить существенную экономию потребителю и сократить потери при передаче электроэнергии.

Потребление электроэнергии в жилищном секторе Беларуси [4] постоянно растёт и составляет около 20 % от общего количества потребленной электроэнергии. Поэтому бытовое потребление электроэнергии существенно влияет на форму графика нагрузки белорусской энергосистемы. В целом потребителями электроэнергии белорусской энергосистемы является около 4 млн бытовых абонентов (семей). Жилищный сектор имеет наибольшие технологические и коммерческие потери электрической энергии по сравнению с другими группами потребителей электрической энергии (например, промышленными потребителями).

Следует отметить, что, по данным VDEW [5] (Association of German Power Supply Companies), в распределительных электросетях Германии, благодаря КРМ до средневзвешенного значения $\cos\varphi = 0,9$, только в 1999 году было сэкономлено порядка 9 млрд кВт·ч активной энергии, что составило более 20 % от суммарного (36,4 млрд кВт·ч) объема транзитных потерь (PowerFactorCorrection. Power Quality Solutions. Published by Epcos AG. Edition 04/2006. Ordering No. EPC: 26017-7600. Printed in Germany. 79).

Опыт использования компенсаторов реактивной мощности показывает возможность сокращения потерь электроэнергии до 5 % от потребляемой мощности. Применение простых и недорогих компенсаторов, устанавливаемых в непосредственной близости от потребителей энергии с индуктивным характером нагрузки, может решить проблему сокращения потерь.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ярошевич А. В. Схема компенсации реактивной мощности в квартирных электрических сетях / А. В. Ярошевич // Вестник Брестского государственного технического университета – 2011. – № 5 (71) : Физика, математика, информатика. С. 66–67.
2. Шишкин, С. А. Реактивная мощность потребителей и сетевые потери электроэнергии / С. А. Шишкин // Энергосбережение. – 2004. № 4.
3. Бутев, В. Электронный фазометр / В. Бутев // Радио. – 1990. № 5.
4. PoleCap PFC Capacitors for Outdoor Low-Voltage PFC Applications. Published by EPCOS AG. 03/2005. Ordering No. EPC: 26015