

Липовцев А.П.

Научный руководитель: доцент Ярошевич А.В.

КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

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, составляющую 20% от общего, задача разработки КРМ является актуальной. Способ решения этой задачи и некоторые требования к устройствам предложены путём применения аналоговой схемы вычислителя для КРМ.

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.

Электрические цепи бытового потребителя питаются, как правило, одной фазой трёхфазной цепи переменного тока с нулевым проводом. Традиционно нагрузка в таких цепях считается резистивной и учёт потреблённой электроэнергии производится однофазным индукционным счётчиком, учитывающим потребляемую энергию активной мощности (АМ) нагрузки. Распространение бытовых приборов с трансформаторами, электродвигателями и сложными электронными цепями привело к появлению реактивной (индуктивной) составляющей мощности, $\cos \varphi$ в таких цепях может составлять $\cos \varphi = 0,65 \dots 0,97$. Средневзвешенное значение $\cos \varphi = 0,85$.

Передача РМ к потребителю и ее потребление в сети приводят к дополнительным потерям 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 *рис. 1*.

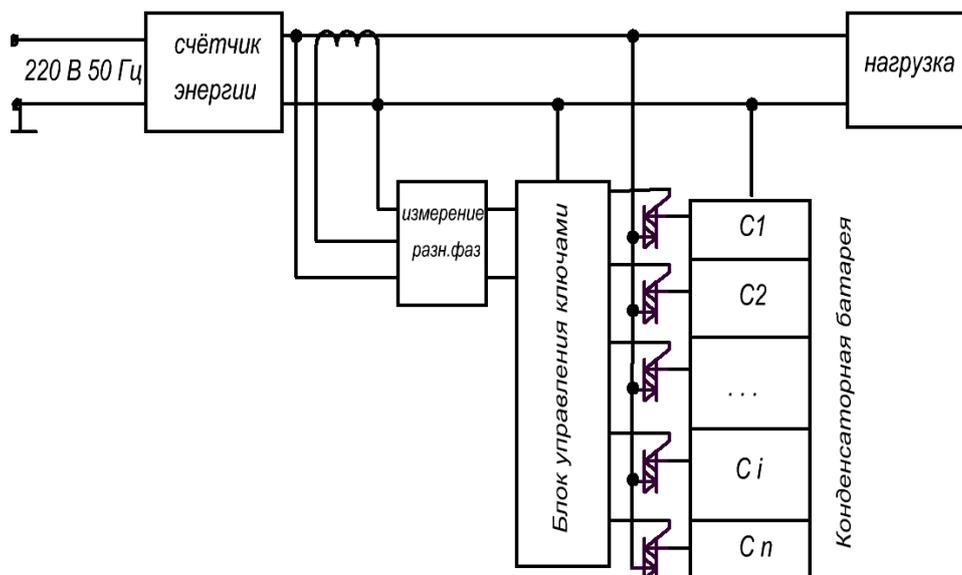


Рисунок 1

Наиболее эффективно можно реализовать схему компенсации СКРМ 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.

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_p , 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 в таблице 1 ($U_{ввых3}$) и на графике в рис. 2 (ряд 3). Анализ результатов позволяет отметить два основных недостатка этой схемы. Первый – чувствительность невысокая, составляет около 5 мВ/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 *рис. 2* (ряд 2). По сравнению с предыдущей схемой чувствительность прибора значительно выше и составляет около 25м В/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 *рис. 2* (ряд 1). По сравнению с предыдущей схемой чувствительность прибора ниже и составляет около 15 м В/град. График представляет обратно пропорциональную практически линейную зависимость.

Таблица 1

$\Delta\varphi$, град	$u_{вых1}$, В	$u_{вых2}$, В	$u_{вых3}$, В
0	0	0	-1,89
1	-0,012	0,02	-1,9
2	-0,02	0,04	-1,9
5	-0,06	0,14	-1,92
8	-0,1	0,22	-1,94
10	-0,12	0,25	-1,95
20	-0,2	0,52	-1,98
40	-0,52	1,1	-1,94
60	-0,83	1,6	-1,71
80	-1,1	2,25	-1,55
90	-1,25	2,5	-1,45
100	-1,4	2,63	-1,33

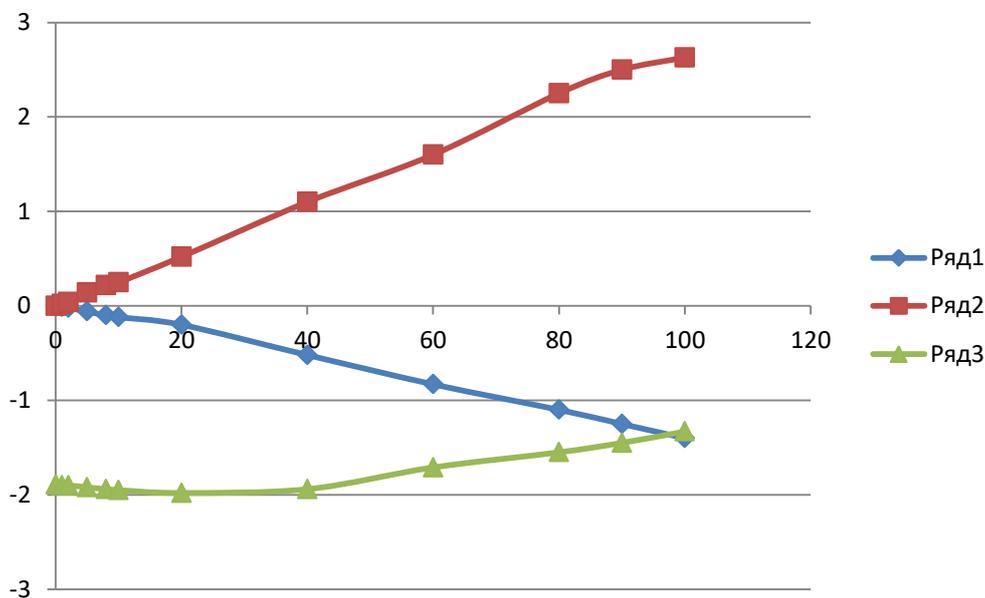


Рисунок 2

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.

Полная мощность нагрузки

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

где P – активная, Q – реактивная мощности.

$$Q/P = \operatorname{tg} \varphi \quad (2)$$

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

$$Q/P \approx \varphi \quad (3)$$

Погрешность от представления $\cos \varphi \approx 1 - \varphi$ не превысит 0,12 значения $\cos \varphi$, тогда активную мощность можно представить формулой

$$P \approx UI(1 - \varphi) \quad (4)$$

реактивную мощность

$$Q \approx UI(1 - \varphi)\varphi \quad (5)$$

Индуктивная мощность нагрузки, подлежащая компенсации

$$Q_L \approx U I_H (1 - \varphi)\varphi,$$

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

С другой стороны ёмкостная

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

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

$$C \approx \frac{I_H \varphi}{2\pi f U (1 - \varphi)} \quad (\Phi) \quad (7)$$

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

$$C \approx k I_H \varphi \quad (\Phi) \quad (8)$$

где $k \approx 0,000015$.

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

$$C \approx 15 I_H \varphi \quad (\text{МкФ}). \quad (9)$$

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 ОУ можно выполнять арифметическую операцию

$$X \cdot Y = e^{(\ln X + \ln Y)} \quad (11).$$

Логарифмические схемы изготавливаются на основе диода, включенного в петлю обратной связи ОУ.

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU_{VD}}{kT}} - 1 \right); \ln \left(\frac{I}{I_0 + 1} \right) = \frac{qU_{VD}}{kT}; \text{ поскольку } \frac{I}{I_0} \gg 1$$

$$\ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right) \approx \ln \frac{I}{I_0}; U_{VD} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right); U_{\text{вх.}} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{U_{\text{вх.}}}{R_{\text{вх.}} I_0} \right). \quad (12) \quad (11)$$

Реализация антилогарифмического усилителя производится аналогично, только в его структуре переставлены местами входные резистор и логарифмический элемент.

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 $U_{он}$, 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 $U(t) = (1 - \frac{1}{2^n})U_{он}$.

АЦП имеет выходной трехразрядный двоичный код $a_0 a_1 a_2$, делитель состоит из восьми резисторов, и универсальный код имеет семь разрядов ($X_1 - X_7$). Таблица функционирования позволяет определить связь между унитарным и двоичным кодами:

$$a_0 = X_1 X_2 + X_3 X_4 + X_5 X_6 + X_7; a_1 = X_2 X_4 + X_6; a_2 = X_4. \quad (12)$$

Таблица 2

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	a_0	a_1	a_2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	0	1	1	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
1	1	1	1	1	0	0	1	0	1
1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Конденсаторная батарея может быть построена на специальных компенсирующих конденсаторах. Расчёт ёмкости батареи конденсаторов при токе нагрузки $I_H = 25$ А и средневзвешенном значении $\cos\varphi = 0,85$ даёт величину $C = 320$ 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.

Список цитированных источников

1. Шишкин, С.А. Реактивная мощность потребителей и сетевые потери электроэнергии // Энергосбережение. – 2004. – № 4.
2. Овсейчук В., Компенсация реактивной мощности. К вопросу о технико-экономической целесообразности / В. Овсейчук, Г. Трофимов, А. Кац [и др.] // Новости электротехники. – 2008. – №4(52).

3. Поляков, А.В. Компенсация реактивной мощности // Самарский государственный технический университет. – 2004.
4. Бутев В. Электронный фазометр // Радио. – 1990. – №5.
5. Железко, Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. – М.: Энергоиздат, 1981. – 200 с.
6. Сульжиц, А. Тарифные системы на электрическую энергию для населения // А. Сульжиц, А. Сульжиц Энергетика и ТЭК. – 2008. – № 12 (69). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.energetika.by/arch>
7. Ярошевич, А.В. Схема компенсации реактивной мощности в квартирных электрических сетях // Вестник Брестского государственного технического университета / редкол.: А.А. Гладыщук [и др.] – Брест: БрГТУ. – № 5 (71): физика, математика, информатика. – 2011. – С. 66-67.
8. Чуйко, В.Г. Радиоизмерения. – М.: МИЭТ, 2001.
9. Воронов, А.С. Измерение разности фаз сигналов / Алтайский государственный технический университет // Горизонты образования. – 2007. – №9.
10. Клаассен, К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. – Москва: Постмаркет, 2000. – 352 с.
11. Бутев, В. Электронный фазометр // Радио. – 1990. – №5.
12. Горошков, Б.И. Радиоэлектронные устройства: Справочник. – М.: Радио и связь, 1984. – 400 с.
13. Быстров, Ю.А. Электронные приборы и устройства на их основе: Справочная книга / Ю.А. Быстров, С.А. Гамкрелидзе, Е.Б. Иссерлин, В.П. Черепанов. – М.: ИП «РадиоСофт». – 2002. – 656 с.

УДК 621.91.002

Муха В.В.

Научный руководитель: к.т.н., доцент Медведев О.А.

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ ДЕТАЛЕЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Оценка приемлемости разработанной технологии мехобработки для обеспечения заданной точности размеров детали выполняется путем выявления и решения технологических размерных цепей. Методики выявления и расчета линейных технологических размерных цепей достаточно подробно описаны в учебной и специальной технической литературе [1, 2], в отличие от угловых размерных цепей, несмотря на их важность для оценки годности получаемых деталей, учитывая более высокий уровень точности угловых отклонений элементов деталей и отсутствие регулировки угловых положений рабочих органов. Таким образом, усовершенствование методики оценки приемлемости техпроцессов с учетом специфики угловых размерных связей, возникающих между размерами получаемых деталей и технологическими системами, является актуальной задачей.

Комплексно и формализованно выявить технологические размерные цепи для всех чертежных размеров детали можно путем построения графов размерных связей техпроцесса [1, 2]. Такой граф является моделью размерных связей в отдельном координатном направлении, представленной парой структурированных множеств: 1) множество объектов детали, объектов промежуточных полуфабрикатов и заготовки (вершины графа); 2) множество размеров между этими объектами, формирующихся в ходе мехобработки и при получении заготовки (ребра графа). Схематично граф принято изображать плоской фигурой, состоящей из конечного числа пронумерованных окружностей (символизируют вершины) и линий с обозначениями размеров между объектами (символизи-