

УДК 621.332

**Л. В. Вишнеvский, А. М. Веретенник**, д-ра техн. наук,  
**А. П. Тумольский**

### УЛУЧШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Аннотация.** Рассмотрена возможность использования конденсаторного устройства компенсации реактивной мощности для управления напряжением автономного синхронного генератора. Регулирование напряжения синхронного генератора путем одновременного изменения емкостного тока конденсаторного блока и тока в обмотке возбуждения позволяет существенно снизить время переходного процесса при коммутации нагрузки генератора.

**Ключевые слова:** регулирование напряжения, синхронный генератор, ёмкость конденсаторов, коммутация нагрузки, переходной процесс, время регулирования

**L. Vyshnevsky, ScD., A. Veretennik, ScD.,  
A. Tumolsky**

### IMPROVED DYNAMIC VOLTAGE CONTROL SYSTEM OF A SYNCHRONOUS GENERATOR

**Abstract.** The possibility of using a capacitor reactive power compensation devices for voltage control of autonomous synchronous generator. Voltage regulation of synchronous generator by simultaneous changes in the capacitive current of the capacitor unit and the current in the field winding can significantly reduce the time of switching transients generator load.

**Keywords:** voltage regulation, synchronous generator, capacitance, switching load transition process, time regulation

**Л. В. Вишнеvський, О. М. Веретенник**, д-ри техн. наук,  
**О. П. Тумольський**

### ПОЛІПШЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Анотація.** Розглянуто можливість використання конденсаторного пристрою компенсації реактивної потужності для керування напругою автономного синхронного генератора. Регулювання напруги синхронного генератора шляхом одночасної зміни ємнісного струму конденсаторного блоку і струму в обмотці збудження дозволяє істотно знизити час перехідного процесу при комутації навантаження генератора.

**Ключові слова:** регулювання напруги, синхронний генератор, ємність конденсаторів, комутація навантаження, перехідний процес, час регулювання

**Введение.** Современные системы электроснабжения предприятий, транспортных средств и других автономных потребителей содержат конденсаторные установки компенсации реактивной мощности (УКРМ) нагрузки [1, 2]. Это позволяет снизить величину потребляемого тока и полную мощность генераторов, а также потери в линиях электропередач и затраты на оплату реактивной электроэнергии [3, 4].

Например, на судах транспортного флота дополнительные конденсаторы используются для компенсации индуктивной нагрузки судовой электростанции во время стоянки, так как необходимо платить за реактивную энергию при питании с берега [5].

Высокая стоимость органического топлива, идущего на получение электроэнергии, прогресс производства конденсаторов переменного тока делают эффективным установку на автономных объектах компенсирующих конденсаторных устройств (рис.1) [6, 7].

В состав энергетической установки автономного объекта в дополнение к генераторным агрегатам основного и резервного электропитания устанавливаются блоки конденсаторов, которые коммутируются полупроводниковыми ключами.

Количество подключенных блоков конденсаторов (БК) определяется регулятором компенсирующей емкости (РКЕ) в зависимости от величины индуктивности нагрузки, которая измеряется датчиком реактивной мощности (ДРМ).

Известно, что напряжение синхронного генератора (СГ) зависит как от тока в обмот-

© Вишнеvский Л.В., Веретенник А.М.,  
Тумольский А.П., 2014

ке возбуждения, так и от емкости его нагрузки [9], однако эксплуатация конденсаторных устройств в составе автономных электростанций непосредственно не связана с управлением синхронным генератором. Традиционная система управления генератором не использует емкость конденсаторов для регулирования напряжения и содержит только датчик (ДН) и регулятор напряжения (РН), управляющий током в обмотке возбуждения СГ (рис. 1).

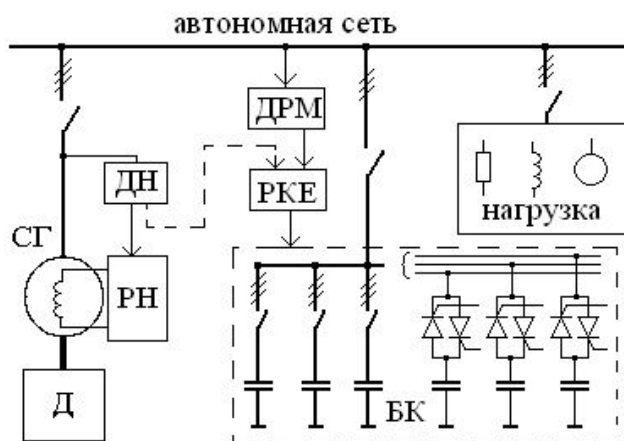


Рис. 1. Схема энергетической установки, содержащая синхронный генератор и установку компенсации реактивной мощности: СГ – синхронный генератор; Д – приводной двигатель с регулятором частоты вращения; БК – блок конденсаторов; ДН – датчик напряжения; ДРМ – датчик реактивной мощности; РН – регулятор напряжения с возбудителем; РКЕ – регулятор компенсирующей емкости

### Основная часть

Наличие в автономной электроэнергетической системе с синхронным генератором компенсирующих конденсаторов делает технически возможным использовать их емкость не только для компенсации индуктивной нагрузки, но и для управления напряжением электростанции. Для этого информацию от датчика напряжения (ДН) генератора можно использовать для управления регулятором компенсирующей емкости (РКЕ), (см. пункт на рис. 1).

Функциональная схема такой системы управления показана на рис. 2.

Управляющими воздействиями на напряжение синхронного генератора  $U_m$  в предлагаемой системе стабилизации являются два сигнала:  $U_f$  – напряжение на обмотке

возбуждения и  $C_n$  – емкость компенсирующих конденсаторов (рис. 2).

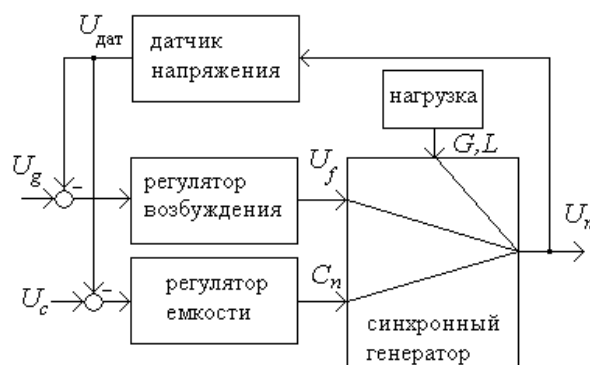


Рис. 2. Схема согласованного управления напряжением синхронного генератора:  $U_m$  – модуль вектора напряжения генератора;  $U_f$  – напряжение на обмотке возбуждения;  $C_n$  – емкость конденсаторов;  $G, L$  – проводимость и индуктивность нагрузки;  $U_{дат}$  – сигнал датчика напряжения в сети;  $U_g$  – задание на регулятор возбуждения;  $U_c$  – задание на регулятор емкости

В качестве регулятора возбуждения рассмотрим использование традиционного пропорционально-интегрального регулятора:

$$U_f(p) = K_n \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) \cdot (U_g - U_{дат}), \quad (1)$$

где  $K_n$ ,  $T_i$  – коэффициент пропорциональности и постоянная интегрирования регулятора напряжения.

Как известно [8], безударная коммутация блоков конденсаторов может быть реализована один раз за период переменного тока, поэтому регулятор компенсирующей емкости должен рассматриваться как дискретно-импульсный с периодом коммутации, равным периоду тока.

Емкость подключенных конденсаторов для регулирования напряжения будем изменять один раз за период переменного тока на величину, пропорциональную отклонению напряжения  $U_{дат}$  от заданного  $U_c$ :

$$C_n = C_{n-1} + K_c \cdot (U_c - U_{дат}), \quad (2)$$

где  $C_n, C_{n-1}$  – емкость конденсаторов в текущем и предыдущем периодах тока;  $K_c$  – коэффициент передачи регулятора.

Суммирование емкости в каждый период тока в выражении (2) реализует дискретный интегральный закон управления.

Одновременное использование двух управляющих воздействий  $U_f$  и  $C_n$  предполагает учет совместной работы двух интегрирующих (астатических) каналов регулятора: по возбуждению и по емкости.

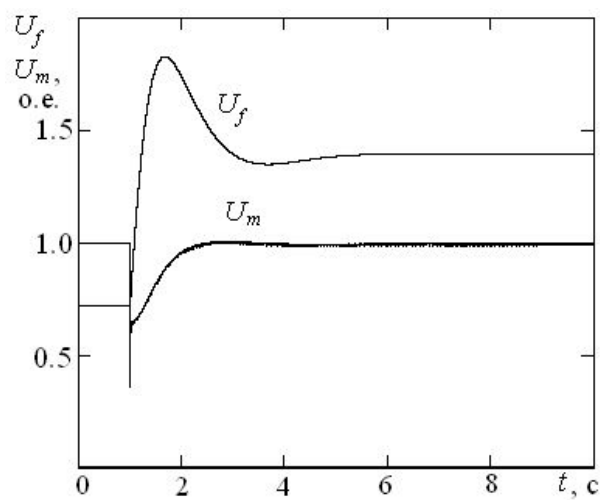
Один из каналов регулятора напряжения выбирается в качестве ведущего, например, канал возбуждения. Для этого его задающее воздействие устанавливается несколько большим, чем в канале емкости:  $U_c = (0,97...0,99)U_g$ . В этом случае емкостной канал регулятора напряжения будет работать только в переходном процессе, т.е. при установлении нового значения напряжения дополнительная емкость УКРМ становится равной нулю.

Исследование предложенного способа регулирования напряжения в электроэнергетической системе, содержащей синхронный генератор и коммутируемые конденсаторы, приведенной на рис. 1, выполнено на разработанной авторами математической модели дизель-генераторной установки с пропорциональным регулятором частоты вращения мощностью 500 кВт. Более подробное описание модели приведено в работах [9, 10]. При коммутации активно-индуктивной нагрузки генератора его напряжение регулируется в соответствии с законами управления (1) и (2).

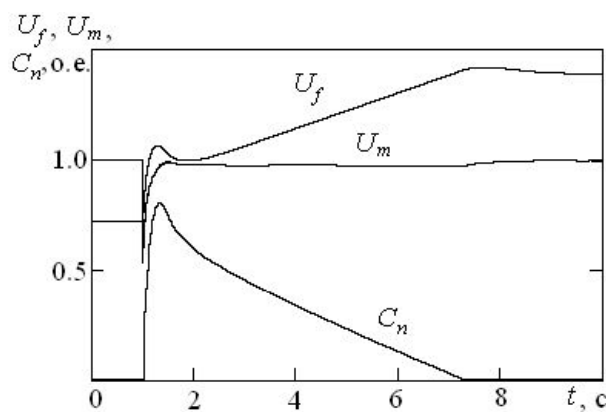
На рис. 3 приведены переходные процессы включения нагрузки с коэффициентом мощности  $\cos\phi = 0,8$  в традиционной схеме регулирования тока возбуждения (рис. 3, а) и в системе, использующей емкость УКРМ (рис. 3, б). Такой же эффект увеличения быстродействия системы регулирования напряжения наблюдается и при пуске асинхронных двигателей мощностью до 20...30 % от мощности генератора.

Основным недостатком системы регулирования напряжения путем изменения тока в обмотке возбуждения является инерционность этого канала управления.

Постоянная времени цепи роторного возбуждения синхронного генератора на порядок больше, чем постоянная времени его статорной обмотки. Коммутация тока нагрузки генератора происходит в цепи статора за доли периода, что приводит к практически мгновенному изменению напряжения. Реакция регулятора по инерционному каналу возбуждения не позволяет быстро ликвидировать динамическое отклонение даже при использовании форсировки тока возбуждения (рис. 3, а).



а



б

Рис. 3. Процессы включения 50 % активно-индуктивной нагрузки с  $\cos\phi = 0,8$ :  
 а – регулирование напряжения только в обмотке возбуждения;  
 б – регулирование напряжения по двум каналам: тока возбуждения и статорной емкости

Использование конденсаторов для регулирования напряжения СГ позволяет преодолеть отмеченный недостаток, так

как емкостной ток протекает по той же цепи, что и нагрузка, поэтому реакция на него имеет ту же постоянную времени. В результате длительность переходного процесса значительно снижается.

При использовании закона управления емкостью (2) длительность переходного процесса зависит от коэффициента передачи  $K_c$ . Полученные на модели переходные процессы наброса 50 % активно-индуктивной нагрузки с  $\cos\phi = 0,8$  при различных значениях  $K_c$  приведены на рис. 4.

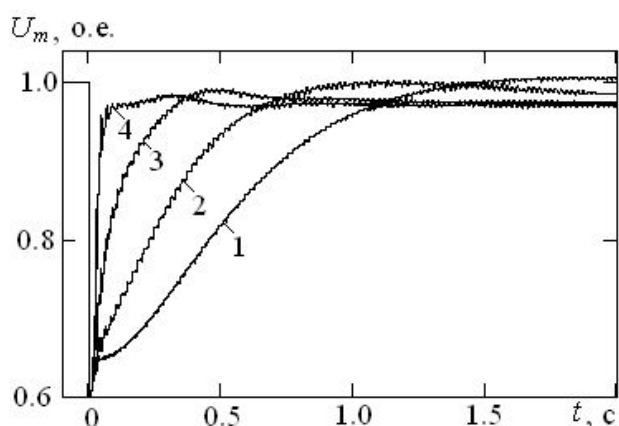


Рис. 4. Динамические процессы восстановления напряжения СГ при включении нагрузки:  
 1 –  $K_c = 0$ ; 2 –  $K_c = 0.1$ ;  
 3 –  $K_c = 0.5$ ; 4 –  $K_c = 2$

Как видно из рис. 4, при значении коэффициента  $K_c = 2$  время восстановления напряжения уменьшается в десять раз.

Эффект увеличения быстродействия системы регулирования напряжения тем больше, чем меньше начальная нагрузка генератора.

Зависимость времени переходного процесса включения активно-индуктивной нагрузки с коэффициентом мощности  $\cos\phi = 0,8$   $t_p$  от коэффициента передачи  $K_c$  при различной начальной загрузке генератора приведена на рис. 5.

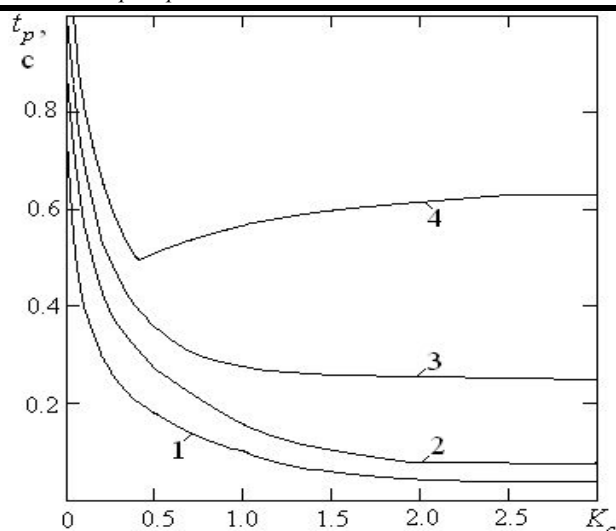


Рис. 5. Зависимость времени переходного процесса восстановления напряжения СГ от коэффициента  $K_c$  закона управления (2):  
 1 – наброс нагрузки 25 % на холостом ходу;  
 2 – наброс нагрузки 50 % на холостом ходу;  
 3 – наброс нагрузки 50 % при 25 % загрузке;  
 4 – наброс нагрузки 50 % при 50 % загрузке

### Заключение

Использование емкости конденсаторов для регулирования напряжения в течении переходного процесса коммутации активно-индуктивной нагрузки позволяет значительно уменьшить время восстановления напряжения.

Время динамического провала напряжения удастся уменьшить до двух-трех периодов переменного тока после коммутации нагрузки.

### Список использованной литературы

1. Ильяшов В. П. Конденсаторные установки промышленных предприятий / В. П. Ильяшов – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 156 с.
2. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
3. Гудко Є. І. Про доцільність установлення конденсаторних батарей у промислових електричних мережах у сучасних економічних умовах / Є. І. Гудко, О. Д. Демов,

Л. Б. Терешкевич // Энергетика и электрификация. – К. : – 1997. – № 2. – С. 55 – 61.

4. Агунов А. В. Статический компенсатор неактивных составляющих мощности с полной компенсацией гармонических составляющих тока нагрузки / А. В. Агунов // Электротехника. – М. : – 2003. – № 2. – С. 47 – 50.

5. Правила технической эксплуатации морских и речных судов / Нормативные документы морского транспорта Украины. – Одесса, 2000. – 405 с.

6. Ермуратский В. В. Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях / В. В. Ермуратский, П. В. Ермуратский. – М. : Энергия, 1979. – 224 с.

7. Гулевич А. И. Производство силовых конденсаторов / А. И. Гулевич, А. П. Киреев. – М. : Высшая школа, 1969. – 440 с.

8. Вишневецкий Л.В. Системы управления асинхронными генераторными комплексами / Л. В. Вишневецкий, А. Е. Пасс. – К. – Одесса : Лыбидь, 1990. – 68 с.

9. Веретенник А.М. Моделирование процессов стабилизации напряжения синхронного генератора в режиме компенсации реактивной мощности / А. М. Веретенник / Электромашинобудування та електрообладнання. – К. : Техніка. – 2003. – Вип. 61. – С. 29 – 32.

10. Вишневецкий Л. В. Компьютерное моделирование судовых вспомогательных электроустановок / Л. В. Вишневецкий, Н. И. Муха, А. М.Веретенник // Судовые энергетические установки. – Одесса : – 2001. – № 6. – С. 23 – 30.

Получено 08.10.2014

#### References

1. Plyashov V.P. Kondensatorsnyye ustanovki promyshlennykh predpriyatiy [Condenser units of Industrial Enterprises], (1983), Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat Publ.*, 156 p. (In Russian).

2. Zelezko Iu.C. Kompensatsiya reaktivnoy moshnosti i povyshenie kachestva elektroenergii [Reactive Power Compensation and Improve Power Quality], (1985), Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat Publ.*, 224 p. (In Russian).

3. Gudko E.I., Demov O.D., and Tereshkevich L.B. Pro docilnist ustanovlennia kondensatornykh batarey u promyslovykh elektrychnykh merezakh u suchasnykh ekonomichnykh umovah [On the Feasibility of Installing Capacitor Banks in Industrial Electrical Networks in the Current Economic Conditions], (1997), Kiev, Ukraine, *Energetika i Elektrofikatsiya*, No. 2, pp. 55 – 61 (In Ukrainian).

4. Argunov A.V. Sticheskiy kompensator neaktivnykh sostavlyayuchih moshnosti s polnoy kompensatsiey garmonicheskikh sostavlyayuchih toka nagruzki [Static Compensator Inactive Components of Power with full Compensation of Harmonic Components of the Load Current], (2003), Moscow, Russian Federation, *Elektrotehnika*, No. 2, pp. 47 – 50 (In Russian).

5. Pravila tehniceskoy ekspluatatsii morskikh i rechnykh sudov. Normativnye dokumenty morskogo transporta Ukrainy [The Technical Operation of Marine and River Vessels. Regulations Sea Transport of Ukraine], (2000), Odessa, Ukraine, 405 p. (In Russian).

6. Ermuratsky V.V., and Ermuratsky P.V. Kondensatoru peremennogo toka v tiristornykh preobrazovatelyah [Capacitors AC Thyristor Converters], (1979), Moscow, Russian Federation, *Energiya Publ.*, 224 p. (In Russian).

7. Gulevich A.I., and Kireev A.P. Proizvodstvo silovykh kondensatorov [Manufacture of Power Capacitors], (1969), Moscow, Russian Federation, *Vyshshaya Shkola Publ.*, 440 p. (In Russian).

8. Vyshnevsky L.V., and Pass A.E. Sistemy upravleniya asinhronnymi generatornymi kompleksami [System of Control of Asynchronous Generator Complexes], (1990),

Kiev-Odessa, Ukraine, *Lybid Publ.*, 68 p. (In Russian).

9. Veretennik A.M. Modelirovanie processov stabilizatsii napryazeniya sinhronnogo generatora v rezime kompensatsii reaktivnoy moshnosti [Modeling of Processes of Synchronous Generator Voltage Regulation Mode of Reactive Power Compensation], (2003), *Elektromashinostroenie I Elektrooborudovanie*, Kiev, Ukraine, *Tehnika*, No. 61, pp. 29 – 32 (In Russian).

10. Vyshnevsky L.V., Muha N.I., and Veretennik A.M. Kompyuternoe modelirovanie sudovykh vspomogatelnykh elekproustanovok [Computer Simulation of Ship Auxiliary Electrical], (2001), *Sudovye Energeticheskie Ustanovki*, Odessa, Ukraine, No. 6, pp. 23 – 30 (In Russian).



Вишнеvский  
Леонид Викторович,  
д.т.н., проф., зав. каф.  
автоматизации судовых  
паросиловых установок  
Одесской нац. морской  
академии.  
E-mail:  
leovish@rambler.ru



Веретенник  
Александр Михайлович,  
д.т.н., доц. каф. судовых  
энергетических установок  
Одесской нац. морской  
академии.  
E-mail:  
vamod@ukr.net



Тумольский  
Александр Петрович,  
ст. преподаватель каф.  
электрооборудования и  
автоматики судов  
Одесской нац. морской акаде-  
мии.  
E-mail:  
altum59@gmail.com