

УДК 621.316.727

Поднебенная С.К.

МЕТОДИКА ВЫБОРА МОЩНОСТИ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Введение. Внедрение современных стандартов качества электроэнергии обуславливает повышенный интерес к проблеме снижения уровня высших гармоник в сети, компенсации реактивной мощности и несимметрии. Возможности силовой электроники и преобразовательной техники позволяют для решения этой проблемы в сетях низкого и среднего напряжения использовать активные фильтрокомпенсирующие устройства (АФКУ): активные устройства компенсации реактивной мощности (СТАТ-СОМы) и фильтрации высших гармоник (силовые активные фильтры – САФ).

Подавляющее большинство АФКУ поперечной компенсации (рис. 1) строятся на основе двух- или многоуровневого автономного инвертора напряжения (АИН), подключаемого к сети через интерфейсный фильтр (ИФ) (рис. 2) [1].

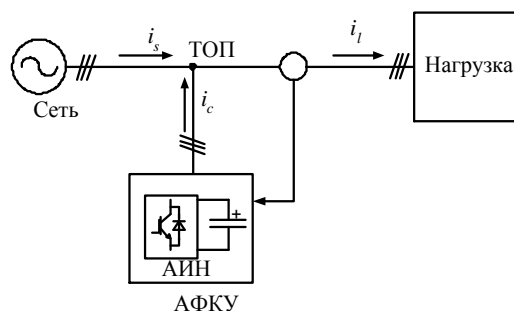


Рисунок 1 – Типовая структурная схема подключения АФКУ поперечной компенсации

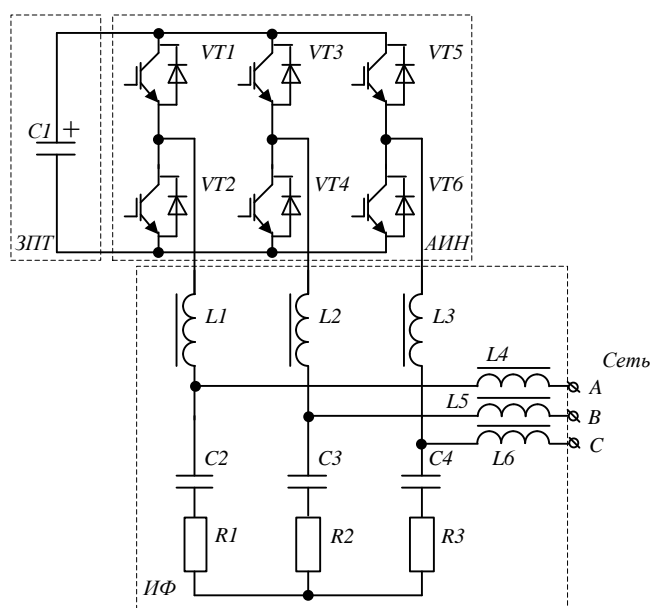


Рисунок 2 – Силовая часть АФКУ поперечной компенсации

ИФ в простейшем случае может представлять собой одиночную индуктивность (в каждой фазе), но на практике зачастую используются более сложные LCL-фильтры, иногда демпфированные (L1L2L3C2C3C4R1R2R3L4L5L6 на рис. 2). ИФ представляет собой фильтр нижних частот и в идеальном случае должен иметь близкий к нулю коэффициент передачи на частотах модуляционных составляющих выходного напряжения АИН (при ШИМ управлении это частота несущей ШИМ и ее гармоник), а в рабочей полосе АФКУ должен быть «прозрачным» [1].

Одним из важных вопросов, решаемых при выборе типа АФКУ, является экономическое обоснование. Стоимость АФКУ определяется его мощностью, поэтому задача правильного ее выбора стоит достаточно остро.

Стандарт IEEE 1459-2010 [2] дает определение для показателей электрической энергии и мощности, используемых в приборах контроля и учета, поэтому для расчета мощности АФКУ целесообразно использовать именно эти определения. Главным отличием определения IEEE [3] от других определений (по С. Budeanu [4]; по S. Fryze [5]; по N. L. Kusters и W. J. M. Moore [6]; по W. Shepherd и P. Zakikhani [7]; по D. Sharon [8]; по L. S. Czarnecki [9, 10]) является выделение активной P_1 и реактивной Q_1 составляющих полной мощности на основной частоте, которые составляют т.н. «фундаментальную» полную мощность.

Если выделить первую гармонику из среднеквадратичных значений напряжения и тока:

$$U^2 = U_1^2 + U_H^2 = U_1^2 + \sum_{h \neq 1} U_h^2; \quad (1)$$

$$I^2 = I_1^2 + I_H^2 = I_1^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2, \quad (2)$$

где U_1 – среднеквадратичное напряжение на основной частоте сети (первой гармонике), В; $U_H = \sqrt{\sum_{h \neq 1} U_h^2}$ – сумма среднеквадратичных напряжений на частотах, не равных основной частоте (высших гармоник), В; I_1 – среднеквадратичный ток на основной частоте сети (первой гармонике), А; $I_H = \sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2}$ – сумма среднеквадратичных токов на частотах, не равных основной частоте (высших гармоник), А;

то квадрат полной мощности можно записать в таком виде:

$$S^2 = (UI)^2 = (U_1 I_1)^2 + (U_H I_1)^2 + (U_1 I_H)^2 + (U_H I_H)^2. \quad (3)$$

При этом первое слагаемое – «фундаментальная» полная мощность – равна:

$$S_1^2 = (U_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2 = (U_1 I_1 \cos \phi_1)^2 + (U_1 I_1 \sin \phi_1)^2. \quad (4)$$

Остальные три слагаемые полной мощности составляют, т.н. «нефундаментальную» полную мощность, или мощность искажений:

$$S_N^2 = (U_H I_1)^2 + (U_1 I_H)^2 + (U_H I_H)^2 = S^2 - S_1^2, \quad (5)$$

состоящую из трех слагаемых: мощности искажений тока $D_I = U_1 I_H$, мощности искажений напряжения $D_U = U_H I_1$, и мощности гармонических искажений (полной мощности гармоник) $D_H = U_H I_H$.

В стандарте [2] вводятся понятия неактивной мощности N , равной:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{Q_1^2 + N_H^2}, \quad (6)$$

где N_H – неактивная мощность, переносимая высшими гармониками [3], ВАр;

и полной мощности гармоник D_H :

$$D_H^2 = (U_H I_H)^2 = P_H^2 + N_H^2, \quad (7)$$

где P_H – активная мощность, переносимая высшими гармониками, Вт.

Коэффициент мощности, в соответствии со стандартом IEEE 1459-2010 [2] определяется как:

$$PF = P/S. \quad (8)$$

Полная компенсация мощности искажений не всегда является экономически обоснованной, поэтому с учетом определений стандарта [2] и требований к параметрам качества электроэнергии в точке общего присоединения (ТОП), необходимо составить методику, позволяющую определить расчетную мощность АФКУ, что и является **целью данной статьи**.

Для предварительного выбора мощности АФКУ требуется знать [11]:

- активную мощность нагрузки (на первой гармонике), P_l , Вт;
- исходный коэффициент мощности (КМ) нагрузки, PF ;
- желаемый КМ системы «АФКУ + нагрузка», PF_d ;
- коэффициент несинусоидальности тока нагрузки THD_l .

Полная мощность нагрузки S_l в соответствии с (8), (3) может быть найдена как:

$$S_l = \frac{P_l}{PF} = \sqrt{S_1^2 + S_N^2}. \quad (9)$$

При этом, мощность искажений может быть найдена из следующего выражения:

$$S_N^2 = N^2 - Q_1^2, \quad (10)$$

где N – неактивная мощность нагрузки, ВАр, Q_1 – реактивная мощность нагрузки на первой гармонике, ВАр.

При компенсации КМ до PF_d выражение (10) можно записать с учетом некоторых остаточных искажений:

$$S'_l = \frac{P_l}{PF_d}; \quad (11)$$

$$S'_l = \sqrt{P_l^2 + (S_N - S_C)^2}, \quad (12)$$

где S'_l – полная мощность системы «компенсатор + нагрузка», ВА, S_C – мощность компенсатора, ВА.

Выразим величину неактивной мощности нагрузки:

$$N = \sqrt{S_l^2 - P_l^2} = \sqrt{\left(\frac{P_l}{PF}\right)^2 - P_l^2} = P_l \cdot \sqrt{\frac{1}{PF^2} - 1}. \quad (13)$$

Выражение для нахождения относительной мощности АФКУ получено при подстановке полученного выражения в (11) с учетом (13):

$$\frac{S_C}{P_l} = \sqrt{\frac{1}{PF^2} - 1} - \sqrt{\frac{1}{PF_d^2} - 1}. \quad (14)$$

На рис. 3 приведено семейство зависимостей относительной мощности АФКУ от активной мощности нагрузки для разных желаемых КМ системы «АФКУ + нагрузка» [10].

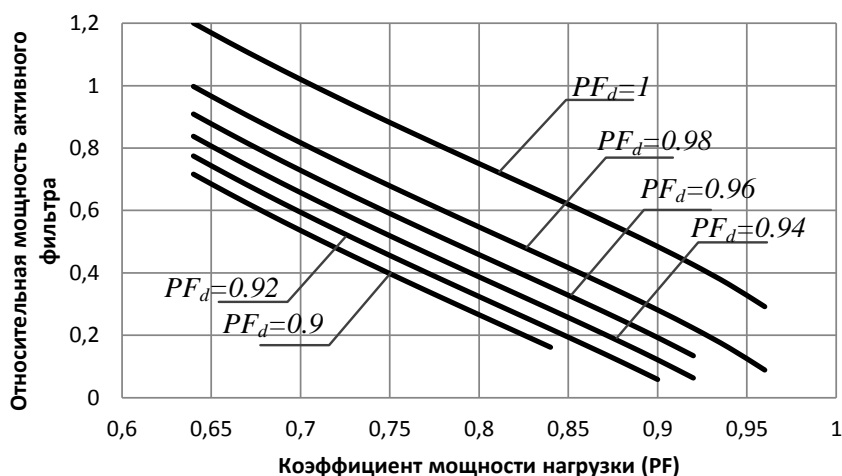


Рисунок 3 – Семейство зависимостей относительной мощности АФКУ от исходного КМ нагрузки

Из полученных зависимостей видно, что при коэффициенте мощности нагрузки, не превышающем 0,7, требуемая мощность АФКУ для достижения единичного КМ системы «АФКУ + нагрузка», должна превышать мощность нагрузки. Таким образом,

економічною цілесобразним рішенням може виявитися неповна компенсація вищих гармонік і реактивної потужності, або установка гібридної системи (АФКУ + пасивні фільтри).

При необхідності компенсації тільки вищих гармонік току (без компенсації реактивної потужності), потужність АФКУ може вибиратися з урахуванням коефіцієнта несинусоїдальності (THD_I) току навантаження:

$$S_C = S_N = \frac{P_I}{PF} \cdot \frac{THD_I}{\sqrt{1+THD_I^2}}. \quad (15)$$

При необхідності компенсації тільки реактивної потужності, потужність АФКУ може бути вибрана в відповідності з вираженням:

$$S_C = Q_I = \frac{P_I}{PF} \sqrt{1-PF^2 \cdot (1+THD_I^2)}. \quad (16)$$

При неможливості проведення вимірювань і аналізу споживаного току нелінійного навантаження приблизний вибір потужності АФ можна виконати за типовими характеристиками. Так, для нелінійного навантаження, що складається з електроприводів постійного і/або змінного току, в відповідності з [12] рекомендується два методи приблизного визначення потужності АФ.

В першому випадку необхідно знати:

- потужності приводів постійного (P_{DC}) і змінного (P_{AC}) току відповідно, Вт;
- THD живлячого напруги THD_U ;
- THD живлячого напруги після установки САФ THD_{U_F} .

Потужність АФКУ можна приблизно визначити як [12]

$$S_C \approx (0,26P_{DC} + 0,318P_{AC}) \cdot k, \quad (17)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від початкового і бажаного THD живлячого напруги, вибирається за діаграмою, наведеною на рис. 4.

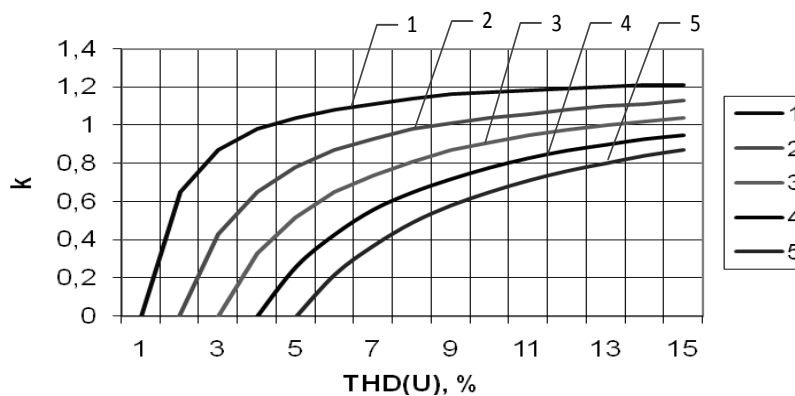


Рисунок 4 – Діаграма для вибору коефіцієнта k , криві 1–5 відповідають THD живлячого напруги після установки АФКУ, $THD(U_F)$, %, при початковому THD живлячого напруги $THD(U)$, % по осі ординат

Во втором случае набор исходных данных следующий:

- THD тока нелинейной нагрузки THD_I ;
- желаемый THD сетевого тока после установки АФКУ $THD_{I,d}$;
- полная мощность нагрузки S_I , ВА (исключая мощность батарей конденсаторов, если таковые имеются).

При этом мощность АФ может быть приближенно выбрана по выражению [12]

$$S_C \approx 1,3 \frac{THD_I - THD_{I,d}}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \cdot S_I. \quad (18)$$

На основании приведенных зависимостей и выражений, составлена методика вычисления мощности АФ, представленная в виде алгоритма (рис. 5).

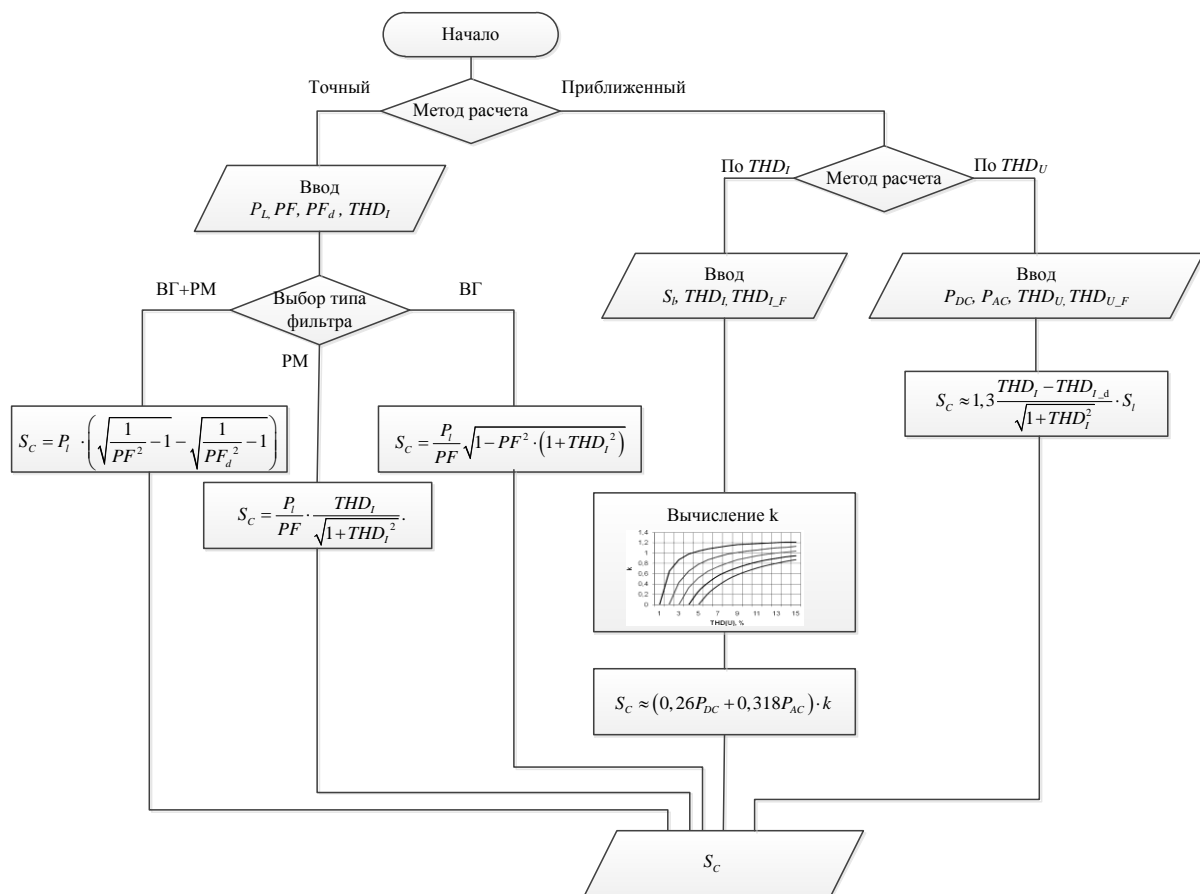


Рисунок 5 – Алгоритм нахождения мощности АФ

Вышеперечисленные методы выбора мощности АФКУ не учитывают спектральный состав тока компенсируемых нелинейных нагрузок. Между тем, физические основы работы АФКУ требуют введения специфических ограничений, описанных ниже.

Для уточненного выбора параметров АФКУ требуется выполнение следующих условий:

$$I_{C_rms} \geq I_{D_rms}; \quad (19)$$

$$I_{C_m} \geq I_{D_m}; \quad (20)$$

$$\frac{dI_{C_rms}}{dt} \geq \frac{dI_{D_max}}{dt}, \quad (21)$$

где I_{C_rms} – среднеквадратичный выходной ток АФКУ, А; I_{C_m} – амплитуда выходного тока АФКУ, А; I_{D_rms} – среднеквадратичный ток нагрузки с отфильтрованной основной гармоникой, А; I_{D_m} – амплитуда тока нагрузки с отфильтрованной основной гармоникой, А.

Приведенные выше условия обусловлены следующими требованиями:

- амплитуда выходного тока АФКУ не должна быть больше тока насыщения дросселей интерфейсного фильтра и не больше допустимого тока силовых ключей АИН;

- среднеквадратичный ток АФКУ определяет тепловой режим его работы;

- от максимальной скорости изменения выходного тока АФКУ зависят параметры интерфейсного фильтра, в частности, индуктивности входящих в его состав дросселей. Так, возможны ситуации, когда АФ не сможет развить требуемый выходной ток гармоник высоких порядков, что приведет к недокомпенсации мощности искажений даже при достаточной установленной мощности АФ.

Выполнение последних условий необходимо для оптимизации силовой части АФКУ с целью снижения его себестоимости и уменьшения потерь мощности в нем.

Выводы

1. Разработанная методика для расчета мощности АФКУ, использующая определения стандарта IEEE Standard 1459-2010, позволяет рассчитать требуемую мощность АФКУ с учетом требований к параметрам качества электроэнергии в точке общего присоединения.

2. При невозможности проведения измерений и анализа потребляемого тока нелинейной нагрузки приближенный выбор мощности АФ можно выполнить по типовым характеристикам.

3. Следует учитывать динамические свойства (характеристики) АФ при его выборе.

Литература

1. Бурлака В.В. Современные способы улучшения качества электроэнергии / В.В. Бурлака, С.К. Поднебенная, С.В. Гулаков // Управление качеством электрической энергии: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Москва, 26–28 ноября 2014 г. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг “Радуга”», 2014. – С. 137–143.

2. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE Standard 1459–2010, New York, 2010.

3. Arseneau R. Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: a discussion / R. Arseneau, Y. Baghzouz, J. Belanger, K. Bowes,

- A. Braun, A. Chiaravallo, M. Cox, S. Crampton, A. Emanuel, P. Filipski, E. Gunther, A. Girgis, D. Hartmann, S.-D. He, G. Hensley, D. Iwanusiw, W. Kortebein, T. McComb, A. McEachern, T. Nelson, N. Oldham, D. Piehl, K. Srinivasan, R. Stevens, T. Unruh, and D. Williams // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1996. – Vol. 11, No. 1. – pp. 79–101.
4. Budeanu C. Reactive and fictitious powers / C. Budeanu // *Rumanian National Institute*. – 1927. – No. 2.
5. Fryze S. Wirk- Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung / S. Fryze // *Elektrotechnische Zeitschrift*. – 1932. – No. 25. – pp. 596–99, 625–627, 700–702.
6. Kusters N.L. On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions / N. L. Kusters, W. J. M. Moore // *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*. – 1980. – Vol. PAS-99. – No. 5. – pp. 1845–1854.
7. Shepherd W. Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems / W. Shepherd, P. Zakikhani // *PROC. IEE*. – 1972. – Vol. 119. – No. 9. – pp. 1361–1362.
8. Sharon D. Reactive power definition and power factor improvement in non-linear systems / D. Sharon // *Proc IEE*. – 1973. – Vol 120. – No 6. – pp. 704–706.
9. Czarnecki L.S. Considerations on the reactive power in nonsinusoidal situations / L. S. Czarnecki // *IEEE Trans. on Inst. and Meas.* – 1985. – Vol. 34. – No. 3. – pp. 399–404.
10. Czarnecki L.S. What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned / L.S. Czarnecki // *IEEE Trans. on Inst. and Meas.* – 1987. – Vol. 36. – No. 3. – pp. 834–837.
11. Поднебенная С.К. К вопросу выбора мощности параллельного активного фильтра / С.К. Поднебенная, В.В. Бурлака // *Научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Наукові дослідження молоді – інновації в науці та практиці»*. – Мариуполь: ПГТУ, 2013. – С. 15–16.
12. Power Quality Filter. Active Filtering Guide. Режим доступа:
[http://library.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/0f61159109c44f58c1256f2e00445c57/\\$File/2GCS401012A0070.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/0f61159109c44f58c1256f2e00445c57/$File/2GCS401012A0070.pdf)

Bibliography (transliterated)

1. Burlaka V.V. Sovremennyye sposoby uluchsheniya kachestva elektroenergii. V.V. Burlaka, S.K. Podnebenная, S.V. Gulakov. Upravleniye kachestvom elektricheskoy energii: Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Moskva, 26–28 noyabrya 2014 g. – M.: «Zentr poligraficheskikh uslug "Raduga"», 2014. – P. 137–143.
2. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE Standard 1459–2010, New York, 2010.
3. Arseneau R. Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: a discussion. R. Arseneau, Y. Baghzouz, J. Belanger, K. Bowes, A. Braun, A. Chiaravallo, M. Cox, S. Crampton, A. Emanuel, P. Filipski, E. Gunther, A. Girgis, D. Hartmann, S.-D. He, G. Hensley, D. Iwanusiw, W. Kortebein, T. McComb, A. McEachern, T. Nelson, N. Oldham, D. Piehl, K. Srinivasan, R. Stevens, T. Unruh, and D. Williams. *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1996. – Vol. 11, No. 1. – pp. 79–101.
4. Budeanu C. Reactive and fictitious powers. C. Budeanu. *Rumanian National Institute*. – 1927. – No. 2.

5. Fryze S. Wirk- Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung. S. Fryze. Elektrotechnische Zeitschrift. – 1932. – No. 25. – pp. 596–99, 625–627, 700–702.
6. Kusters N.L. On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions. N. L. Kusters, W. J. M. Moore. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. – 1980. – Vol. PAS-99. – No. 5. – pp. 1845–1854.
7. Shepherd W. Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems. W. Shepherd, P. Zakikhani. PROC. IEE. – 1972. – Vol. 119. – No. 9. – pp. 1361–1362.
8. Sharon D. Reactive power definition and power factor improvement in non-linear systems. D. Sharon. Proc IEE. – 1973. – Vol 120. – No 6. – pp. 704–706.
9. Czarnecki L.S. Considerations on the reactive power in nonsinusoidal situations. L. S. Czarnecki. IEEE Trans. on Inst. and Meas. – 1985. – Vol. 34. – No. 3. – pp. 399–404.
10. Czarnecki L.S. What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned. L.S. Czarnecki. IEEE Trans. on Inst. and Meas. – 1987. – Vol. 36. – No. 3. – pp. 834–837.
11. Podnebennaya S.K. K voprosu vybora moshchnosti parallel'nogo aktivnogo fil'tra. S.K. Podnebennaya, V.V. Burlaka. Nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh i studentov «Naukoví doslídzhennya molodí – ínnovatsíi v nauksí ta praktitsíi». – Mariupol' : PGTU , 2013. – S. 15–16.
12. Power Quality Filter. Active Filtering Guide. Access mode: [http://library.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/0f61159109c44f58c1256f2e00445c57/\\$File/2GCS401012A0070.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/0f61159109c44f58c1256f2e00445c57/$File/2GCS401012A0070.pdf).

УДК 621.316.727

Поднебенна С.К.

МЕТОДИКА ВИБОРУ ПОТУЖНОСТІ АКТИВНИХ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

Одним з важливих питань, що вирішуються при виборі типу активних фільтрокомпенсуючих пристроїв (АФКП), є економічне обґрунтування. Вартість АФКП визначається його потужністю, тому задача правильного її вибору стоїть досить гостро. Повна компенсація потужності спотворень не завжди є економічно обґрунтованою, тому з урахуванням визначень стандарту IEEE 1459–2010 і вимог до параметрів якості електроенергії в точці загального приєднання складено методіку, що дозволяє визначити розрахункову потужність АФКП. Для врахування спектрального складу струму нелінійних навантажень потребується введення специфічних обмежень, які дозволяють знизити собівартість АФКП та зменшити втрати потужності в ньому.

Podnebennaya S.K.

METHOD OF SELECTION OF ACTIVE FILTER'S POWER

One of the important issues which can be solved when choosing the type of active filter-compensating devices (AFCD) is an economic justification. The cost of AFCD is determined by its power rating, so the task of choosing the right AFCD power is quite acute. Full compensation of mains current distortion is not always economically feasible, so, considering the IEEE 1459–2010 standard definitions and requirements for power quality parameters in the point of common coupling, a method of determining the estimated power rating of AFCD

is proposed. For taking into account the spectral composition of nonlinear load current, additional specific limitations are required, which allows to optimize the AFCD cost and reduce active power losses in it.