

## Влияние несимметричного режима электрической сети на работу потребителей электрической энергии

Н. В. Чижикова

ФГБОУВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»,  
г. Рыбинск, Российская Федерация  
E-mail: chizhikovanatalya@yandex.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Существующие устройства устранения несимметрии, имеющие дискретный характер регулирования, не учитывают резкопеременный характер нагрузок, включенных в сложные электротехнологические комплексы, и не обеспечивают точности параметров симметрирования сети. В данных условиях необходимо применение таких устройств, в которых могло бы осуществляться с достаточно высоким быстродействием непрерывное изменение параметров элементов схемы Штейнметца (индуктивности и емкости) в соответствии с изменением нагрузки.

**Материалы и методы:** Для решения поставленных задач использованы численно-аналитические и экспериментальные методы исследования. С помощью анализатора электропотребления AR-5 и программного пакета Power Vision дана оценка несимметрии, имеющей место при работе комплекса установок для выращивания монокристаллов лейкосапфира «Апекс-М».

**Результаты:** Разработано схмотехническое решение быстродействующего симметрирующего устройства на базе магнетовентильных элементов с плавнорегулируемым изменением характера проводимости, позволяющего обеспечить оптимальный уровень симметрии в электротехнологическом комплексе установок для выращивания монокристаллов.

**Выводы:** Установлено, что применение комплекса быстродействующих симметрирующих устройств на базе магнетовентильных элементов с использованием модульного алгоритма управления позволяет снизить коэффициент несимметрии до нормального уровня, что способствует повышению эффективности как самой питающей сети, так и энергокомплекса в целом.

**Ключевые слова:** несимметрия, несимметричный режим, коэффициент несимметрии, показатели качества электроэнергии, повышение качества электроэнергии.

## Influence of electrical network unbalanced conditions on electric power consumers

N.V. Chizhikova

Rybinsk State Aviation Technology University, Rybinsk, Russian Federation  
E-mail:chizhikovanatalya@yandex.ru

### Abstract

**Background:** The existing devices eliminating the unbalance through discrete adjustment do not take into account the fast-variable nature of loads in complex electric technology systems and do not provide sufficient accuracy of network parameter balancing. Under these conditions it is necessary to use fast-response devices which could continuously modify parameters of the Steinmetz circuit elements (inductance and capacitance) according to load changes.

**Materials and methods:** The set problems were solved by numerical analytic and experimental methods. Using the power consumption analyzer AR-5 and the software package Power Vision, the authors assessed the level of the unbalance in the installation complex used for growing single crystals of leucosapphire «Apex-M».

**Results:** The authors have developed a scheme of a fast-response symmetrizing device (SD) based on magneto-valve elements with continuously adjustable conductivity modification which makes it possible to achieve the optimal level of symmetry in the electric technology installations used for growing leucosapphire monocrystals.

**Conclusions:** It has been determined that using the fast-response symmetrizing device (SD) based on magneto-valve elements with a modular control algorithm reduces the unbalance parameter to the normal level which increases the efficiency of both the supply line itself and the power system as a whole.

**Key words:** Unbalance, unbalanced conditions, unbalanced factor, electric power quality coefficients, energy efficiency increasing.

От электрических сетей систем электро-снабжения питаются различные электротехнические комплексы, мощность которых составляет более 1 МВт. Рассмотрим комплекс промышленных установок, включенных в технологический процесс выращивания монокристаллов лейкосапфира по методу Киропулоса. Система

электро-снабжения данного комплекса имеет вид, представленный на рис. 1.

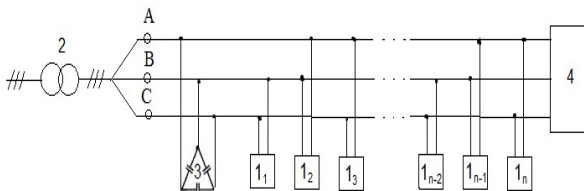


Рис. 1. Комплекс системы электроснабжения промышленных установок для выращивания монокристаллов лейкосапфира по методу Киропулоса: 1<sub>1</sub>–1<sub>*n*</sub> – ростовые установки; 2 – трансформатор; 3 – конденсаторная установка; 4 – прочие однофазные и трехфазные потребители

Каждый элемент данного комплекса представляет собой нагрузку, включенную в трехфазную сеть по одно-трехфазной схеме. Такое электропитание отрицательно сказывается на параметрах симметрии трехфазной питающей системы и работе других потребителей. В связи с этим проведем анализ уровня несимметрии на данном объекте, оценку влияния несимметричного режима на работу потребителей электроэнергии, входящих в данный электротехнологический комплекс, а также разработку обоснованных мероприятий по симметрированию электрической сети.

Нами была произведена оценка уровня несимметрии, имеющей место при работе электротехнологического комплекса, включающего в себя ростовые установки для выращивания монокристаллов «Апекс-М» с помощью программно-технического решения, выполненного на базе анализатора электропотребления AR-5 и программного пакета PowerVision. На рис. 2 представлены суточные графики изменения линейного напряжения в трехфазной электрической сети.

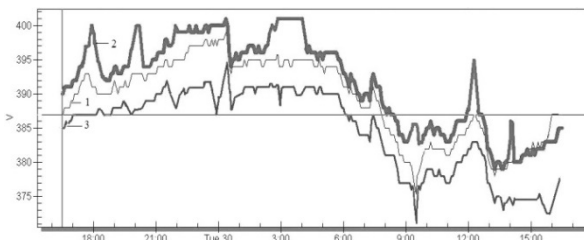


Рис. 2. Графики изменения линейного напряжения: 1 – U<sub>AB</sub>; 2 – U<sub>BC</sub>; 3 – U<sub>CA</sub>

Анализ графиков (рис. 2) показывает наличие явной несимметрии линейных напряжений.

Для количественной оценки несимметрии была использована методика, приведенная в ГОСТ 13109-97. В качестве критерия несимметрии был выбран коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $\varepsilon_{2U}$  для междуфазных напряжений, который определяется как результат усреднения *N* наблюдений  $\varepsilon_{2U_i}$  на интервале времени 24 часа:

$$\varepsilon_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_{2U_i}^2}{N}}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{2U_i} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{\text{ном мф}}} \cdot 100, \quad (2)$$

$$U_{2(1)i} = 0,62(U_{\text{нб}(1)i} - U_{\text{нм}(1)i}), \quad (3)$$

где  $U_{\text{ном.мф}}$  – номинальное значение междуфазного напряжения;  $U_{2(1)i}$  – действующее значение напряжения обратной последовательности основной частоты трехфазной системы напряжения в каждом *i*-м наблюдении;  $U_{\text{нб}(1)i}$ ,  $U_{\text{нм}(1)i}$  – наибольшее и наименьшее действующие значения из трех междуфазных напряжений основной частоты в *i*-м наблюдении, В, кВ.

В результате вычислений, произведенных по (1)–(3), коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности получился равным  $\varepsilon_{2U} = 3,14$ , что превышает предельно допустимые нормы.

Рассмотрим воздействие несимметричного режима электрической сети на работу подключенных к ней потребителей.

Несимметричный режим негативно сказывается непосредственно на самих ростовых установках (рис. 1, 1<sub>1</sub>–1<sub>*n*</sub>). Каждый элемент 1<sub>1</sub>–1<sub>*n*</sub> представляет собой отдельно взятую ростовую установку, функциональная схема электроснабжения которой представлена на рис. 3.

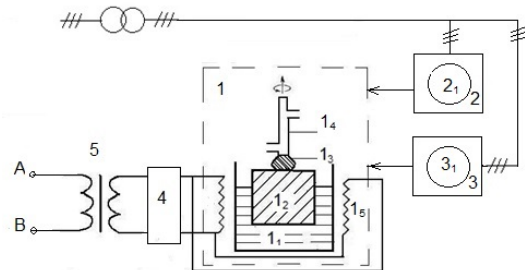


Рис. 3. Функциональная схема электроснабжения установки для выращивания монокристаллов: 1 – ростовая установка (1<sub>1</sub> – расплав, 1<sub>2</sub> – монокристалл, 1<sub>3</sub> – затравка, 1<sub>4</sub> – охлаждаемый водой держатель затравки, 1<sub>5</sub> – нагреватель); 2 – вакуумный насос (2<sub>1</sub> – асинхронный двигатель); 3 – водяной насос (3<sub>1</sub> – асинхронный двигатель); 4 – регулятор тока; 5 – трансформатор

Возникающие несимметричные режимы сети при работе однофазных ростовых установок приводят к изменению фазности и величины однофазных питающих напряжений. Это обстоятельство негативно влияет на режимы регулирования температуры. Нарушение температурного режима приводит как минимум к изменению направления кристаллизации монокристалла и образованию дефектных включений, пузырьков, примесей и как максимум к лавинной кристаллизации – «замерзанию».

В соответствие с [1], средний уровень потерь (процент брака) определяется по формуле

$$p_i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \text{sign}(\theta_{iH} - \theta_i) \sum_{k=1}^n b_k (\theta_i - \theta_{iH})^k dt}, \quad (4)$$

где  $\theta_i$  – текущая температура;  $\theta_{iH}$  – номинальная температура; *T* – время анализа;  $b_k$  – коэффи-

циент полинома аппроксимирующего функцию потерь; *sign* – функция выделения знака.

Согласно (4), при температуре, соответствующей номинальному режиму, потери отсутствуют. При увеличении отклонения от номинальной температуры в меньшую сторону функция потерь возрастает.

Регулирование и поддержание необходимой температуры в установках для выращивания монокристаллов осуществляется за счет вакуумных и водяных насосов (рис. 3). Асинхронные двигатели (АД), входящие в их состав, являются особо чувствительными к наличию несимметрии напряжений. Наличие даже незначительной несимметрии на зажимах приводит к значительному увеличению потерь активной мощности и, как следствие, к дополнительному нагреву обмоток.

Коэффициент потерь мощности АД при несимметричном режиме определяется из выражения [2]

$$K_{pAD} = \Delta P_{M1НОМ} / P_H = r_1^2 / \cos \varphi \eta,$$

где  $P_H$  – номинальная активная мощность двигателя;  $r_1$  – активное сопротивление статорной обмотки;  $\eta$  – КПД двигателя;  $\cos \varphi$  – номинальный коэффициент мощности.

Дополнительные потери активной мощности, обусловленные несимметрией, могут быть определены из выражения

$$\Delta P_{AD} = K_{AD} \left( 2,41 \varepsilon_U^2 + \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}} \right) P_H.$$

Дополнительный перегрев обмоток АД, вызванный несимметрией, определяется по упрощенной формуле

$$\Delta \tau = \frac{280}{b} \left( 1,55 \varepsilon_U^2 + 1,39 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}} \right),$$

где  $B$  – тепловой параметр асинхронного двигателя.

Продолжительность жизни изоляции рассчитывается как

$$z = \exp \left[ -280 \left( 1,55 \varepsilon_U^2 + 1,39 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}} \right) \right].$$

Величина, обратная  $z$ , называется кратностью снижения срока службы:

$$\gamma = 1/z = \exp b \Delta \tau.$$

Согласно расчетам и опытным данным, при повышении температуры изоляции примерно на 8° срок ее службы уменьшается в 2 раза. При повышении коэффициента несимметрии до 4 % срок службы АД сокращается вдвое только за счет дополнительного нагрева, а при увеличении коэффициента несимметрии до 5 % мощность двигателя уменьшается на 5–10 % [3].

Несимметрия напряжений отрицательно сказывается и на силовых трансформаторах, к которым подключается трехфазная сеть (рис. 1), вызывая протекание в них токов обратной последовательности, вследствие чего возникают дополнительные потери активной мощности [2]:

$$\Delta P'_T = \varepsilon_U^2 \left( \Delta P_{X.X} + \frac{\Delta P_{K.3}}{u_{K.3}^2} \right),$$

где  $\Delta P_{X.X} = 3U_H I_{XX} \cos \varphi_{XX}$  – потери холостого хода в номинальном режиме;  $\Delta P_{K.3} = 3I_{K.3}^2 r_{K.3-k}$  – потери короткого замыкания в симметричном номинальном режиме.

Дополнительные потери в трансформаторах сопровождаются повышением температуры обмоток и, как следствие, сокращением срока их службы. Перегрев обмоток трансформатора определяется как разность между превышением температуры обмотки над температурой внешней среды при заданном режиме и при номинальном:

$$\Delta \tau = \tau_{об-в} - \tau_{(об-в)н} = \alpha_{\Sigma} \varepsilon_U^2 + \sum_{v=2}^{\infty} \frac{d_1 + d_2 v^2 + d_3 \frac{1}{\sqrt{v}}}{v\sqrt{v}},$$

где  $\alpha_{\Sigma}$ ,  $d_1$ ,  $d_2 = 0,03\alpha_1$ ,  $d_3 = 1,291\alpha_2$  – коэффициенты, средние значения которых различны для каждого конкретного электрооборудования.

При несимметрии токов трансформатора нагрев масла будет меньше, чем в случае симметричной нагрузки при токе фаз, равном току наиболее загруженной фазы (в результате обмотка этой фазы охлаждается более интенсивно).

Для компенсации реактивной мощности, ограничения и поддержания напряжения в трехфазной сети к ней подключаются конденсаторные установки (рис. 1). Эти установки усиливают несимметричный режим, поскольку выдача реактивной мощности в сеть в фазе с наименьшим напряжением будет меньше, чем в остальных фазах.

При несимметрии напряжений они неравномерно загружаются реактивной мощностью по фазам, что делает невозможным полное использование установленной мощности, приводя к существенному возрастанию температуры конденсаторов и сокращению срока их службы.

Дополнительные потери в конденсаторной установке, обусловленные несимметрией, определяются как [3]

$$\Delta P_{ДОП} = Q_H \operatorname{tg} \delta \left( \varepsilon_U^2 + \sum_{v=2}^{\infty} v U_v^2 \right),$$

где  $Q_H$  – номинальная реактивная мощность конденсаторной установки;  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла потерь диэлектрика на основной частоте.

Дополнительный нагрев конденсаторной установки при этом рассчитывается по формуле

$$\Delta \tau = \vartheta_H \left( \varepsilon_U^2 + \sum_{v=2}^{\infty} v U_v^2 \right),$$

где  $\vartheta_H$  – перепад температуры между наиболее нагретой точкой конденсатора и окружающей средой при симметричном напряжении.

Кратность снижения срока службы конденсаторной установки определяется как

$$\gamma = \exp \left[ b \vartheta_H \left( \varepsilon_U^2 + \sum_{v=2}^{\infty} v U_v^2 \right) \right].$$

Наряду с вышеперечисленными установками, в промышленный комплекс, предназначенный для выращивания монокристаллов по методу Киропулоса, входят и другие однофазные потребители (рис. 1), на которые оказывает существенное влияние несимметричный режим. Превышение допустимых норм коэффициента несимметрии оказывает отрицательное влияние на работу осветительной аппаратуры, используемой в технологическом процессе, вызывая отклонение напряжения, которое, в свою очередь, влияет на такие важные показатели, как световой поток, световая отдача и срок службы. При снижении напряжения на 7–10 % снижается надежность люминесцентных ламп, а их световая отдача снижается пропорционально снижению уровня напряжения.

Функциональная связь между эффективностью работы приемника и уровнем напряжения выражается в виде соотношения

$$f = a \delta U^2 + c \delta U,$$

где  $f$  – удельный экономический ущерб от напряжения, не соответствующего нормам;  $a, c$  – коэффициенты экономической невыгодности, зависящие от типа лампы;  $\delta U$  – отклонение напряжения от номинального на зажимах приемника.

В целях устранения несимметричного режима и приведения коэффициента несимметрии к нормируемому значению применяются симметрирующие устройства (СУ), распределяющие токи между фазами электрической сети и приводящие коэффициент несимметрии к нормируемому значению.

Существующие на сегодняшний день СУ, в большинстве своем, основаны на схеме Штейнметца и представляют собой дискретные элементы – индуктивность и емкость. Параметры нагрузки в них изменяются методом дискретного регулирования, однако при этом не обеспечивается точность параметров симметрирования сети в сложном электротехнологическом комплексе (рис. 1), поскольку установки по выращиванию монокристаллов [4] представляют собой резкопеременную нагрузку. В этом случае требуется применение плавнорегулируемых пофазных элементов.

В целях обеспечения оптимального уровня симметрии в электрической сети, питающей комплекс установок по выращиванию монокристаллов, предлагается применение группы быстроедействующих СУ с плавнорегулируемым изменением характера проводимости (емкостного или индуктивного) от 0 до номинального значения. Межфазный вариант СУ представлен на рис. 4, его регулировочная характеристика – на рис. 5.

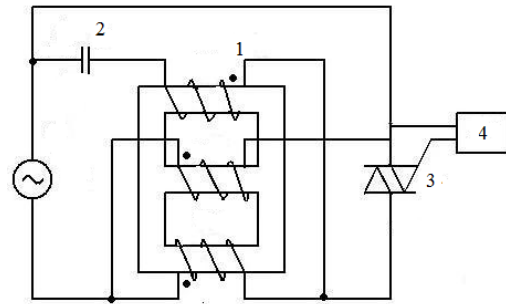


Рис. 4. Принципиальная схема межфазной СУ на базе магнитовентильных элементов: 1 – управляемый дроссель; 2 – управляемый конденсатор; 3 – тиристорная пара; 4 – блок управления

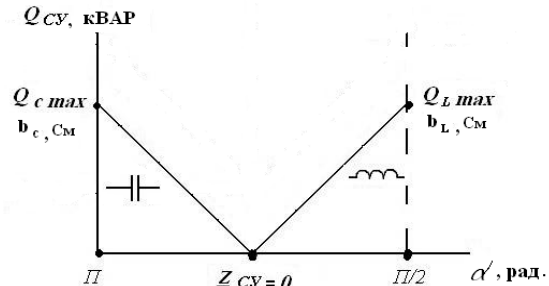


Рис. 5. Регулировочная характеристика СУ

Управление СУ в соответствии с регулировочной характеристикой осуществляется с применением системы автоматического регулирования несимметрии одноплечевой нагрузки (рис. 6).

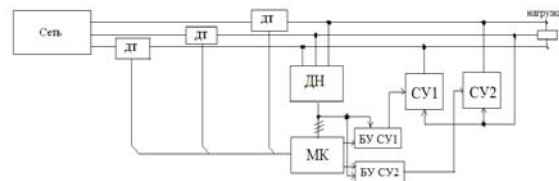


Рис. 6. Структурная схема системы автоматического регулирования (САР) несимметрии одноплечевой нагрузки: ДТ – датчик тока; ДН – датчик напряжения; МК – микроконтроллер; СУ1, СУ2 – симметрирующие устройства 1 и 2; БУ СУ1, БУ СУ2 – блоки управления симметрирующими устройствами

Таким образом, для  $k$ -го количества однофазных нагрузок, входящих в комплекс установок по выращиванию монокристаллов, необходимо применить  $k$ -количество СУ и блоков САР, тем самым обеспечивая оптимальный уровень несимметрии в электрической сети и предотвращая негативное воздействие несимметричного режима на работу потребителей электрической сети.

В результате применения предлагаемой системы автоматического регулирования получены графики напряжений, представленные на рис. 7. При этом коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности составляет  $K_{2U} = 0,41$ .

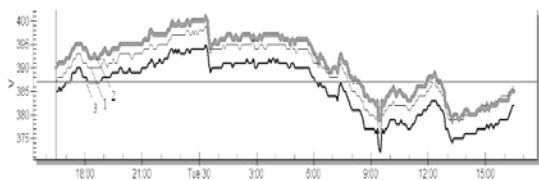


Рис. 7. Графики изменения линейного напряжения в результате применения системы автоматического регулирования быстродействующим СУ: 1 –  $U_{AB}$ ; 2 –  $U_{BC}$ ; 3 –  $U_{CA}$

### Заключение

Применение комплекса быстродействующих СУ на базе магнитовентильных элементов с использованием модульного алгоритма управления позволяет снизить коэффициент несимметрии до нормального уровня, что способствует повышению эффективности как самой питающей сети, так и энергокомплекса в целом.

### Список литературы

1. Юдин А.В. Методология создания автоматизированных систем обеспечения стабильности условий роста монокристаллов в электротермических установках: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Рыбинск, 2011. – С. 4–10.
2. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электрической энергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

Чижикова Наталья Вадимовна,  
ФГБОУВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»,  
аспирант кафедры электротехники и промышленной электроники,  
e-mail: chizhikovanatalya@yandex.ru

3. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – Киев: Наук. думка, 1985. – 268 с.

4. Манин А.В., Юдин А.В., Чижикова Н.В. Повышение энергоэффективности работы установок по производству монокристаллов методом Киропулоса // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии. – 2011. – № 2 (21). – С. 126–129.

### References

1. Yudin, A.V. *Metodologiya sozdaniya avtomatizirovannykh sistem obespecheniya stabil'nosti usloviy rosta monokristallov v elektrotermicheskikh ustanovkakh*. Avtoref. diss. d-ra tekhn. nauk [Methods of developing automated systems ensuring the stability of single crystal growth in electrothermal installations. Abstract Dr. tech. sci. diss.]. Rybinsk, 2011, pp. 4–10.
2. Ivanov, V.S., Sokolov, V.I. *Rezhimy potrebleniya i kachestvo elektricheskoy energii sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy* [Consumption regimes and power quality of industrial plants power systems]. Moscow, Energoatomizdat, 1987. 336 p.
3. Shidlovskiy, A.K., Kuznetsov, V.G. *Povyshenie kachestva energii v elektricheskikh setyakh* [Power quality enhancement in electrical networks]. Kiev, Naukova dumka, 1985. 268 p.
4. Manin, A.V., Yudin, A.V., Chizhikova, N.V. *Povyshenie energoeffektivnosti raboty ustanovok po proizvodstvu monokristallov metodom Kiropulosa* [Increasing the power efficiency of monocrystal producing installations by the Kyropoulos technique]. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii*, 2011, no. 2 (21), pp. 126–129.