

## КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

### Автоматическое регулирование напряжения на трансформаторной подстанции: способ, алгоритм и метод расчета

Виноградов А. В., канд. техн. наук, Голиков И. О., Бородин М. В., инженеры,  
Бородина Е. В., магистр

Орловский государственный аграрный университет

Исследованы статистические данные об отклонении основных показателей качества электроэнергии от нормативных для различных категорий потребителей. Разработан способ автоматического регулирования напряжения на трансформаторной подстанции (ТП) в зависимости от значения напряжения у каждого конкретного потребителя, подключенного к регулируемой сети. Предложены алгоритм и методика расчета основных параметров регулирования, в том числе коэффициента, показывающего, на какое значение необходимо изменить действующее напряжение на ТП при его отклонении от нормативного значения. Учтены характеристики технического устройства, осуществляющего регулирование, введен коэффициент пропорциональности, зависящий от этих характеристик. Разработанный алгоритм позволяет автоматически определять коэффициент регулирования и применять соответствующие технические средства для изменения действующего отклонения напряжения на ТП.

**Ключевые слова:** способ регулирования, отклонение напряжения, коэффициент регулирования, регулирование напряжения, качество электроэнергии, автоматическое регулирование напряжения, трансформаторная подстанция.

Отклонение показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в сети от значений, нормируемых согласно ГОСТ Р 54149–2010 [1], является не меньшей проблемой для потребителей, чем ее внеплановые отключения [2]. По мнению авторов [3], существует много причин, препятствующих повышению качества регулирования напряжения, в том числе отказ сетевых компаний от автоматического управления с помощью устройства РПН из-за его недостаточной надежности и морального старения. Отсутствие автоматического регулирования напряжения на потребительских подстанциях в зависимости от значения напряжения у потребителей приводит к снижению надежности и энергоэффективности электроснабжения. Это требует разработки новых способов и устройств автоматического регулирования напряжения на ТП и их широкого внедрения в системы электроснабжения.

Авторы данной статьи провели исследование ПКЭ у трех основных категорий потребителей (46 жилых домов, 46 административных зданий, 8 промышленных предприятий), в ходе которых анализировались случаи выхода их за нормативные значения [4]. Выяв-

ленные диапазоны искажений показателей для каждой категории потребителей представлены в таблице.

Главным ПКЭ при автоматическом регулировании напряжения на ТП является отклонение его установившегося значения. На рис. 1 представлена частота появления отклонений (шаг напряжения — 2,5 %).

Наибольшее число случаев установившегося отклонения напряжения (68 случаев) зафиксировано в диапазоне напряжений 5 – 7,5 %. Диапазон с наибольшей частотой отклонений совпадает с диапазоном, установленным в ГОСТ Р 54149–2010 [1], но известно, что каждое отклонение более 5 % приводит к перерасходу электрической энергии. Так, на каждый процент изменения питающего напряжения потребляемые реактивная и активная мощности ламп накаливания увеличиваются в среднем на 1,5 и 3 % (при этом снижается их срок службы), а бытовых холодильников и телевизионных приемников — соответственно на 0,2 – 0,4 % и на 2,5 – 8,5 % [5].

В концепции Smart Grid предлагается максимально автоматизировать работу всех элементов в системе электроснабжения (в том числе ТП) в зависимости от режимов

№ п/п	Показатель	Диапазон искажения ПКЭ		
		Жилые дома	Административные здания	Промышленные предприятия
1	Размах изменения напряжения, %	- 15,6 ÷ + 16,5	- 7,8 ÷ + 15,6	- 10,6 ÷ + 10,8
2	Максимальное установившееся отклонение напряжения, %	- 15,4 ÷ + 14,6	- 7,6 ÷ + 14,9	- 7,2 ÷ + 9,4
3	Гармоники, для которых коэффициент $n$ -й гармонической составляющей напряжения вышел за пределы нормы	3, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 27	3, 6, 8, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 27	3, 6, 8, 12, 15, 21
4	Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности	2,01 – 4,52	2,02 – 5,55	2,05 – 4,36
5	Максимальная кратковременная доза фликера	1,45 – 5,3	1,41 – 5,2	2,5 – 2,65
6	Длительная доза фликера	1,1 – 3,9	1,5 – 3,5	1,1 – 2,3

Примечание. В п. 1, 2, 4 показатель не должен превышать 10, 10, 4 % соответственно, а в п. 5 и 6 — значений 1,38 и 1,0.



Рис. 1

работы электрических сетей [6]. Поэтому, по нашему мнению, необходимо осуществлять автоматическое регулирование напряжения при его отклонении больше 5 % в ту или иную сторону.

Известные средства регулирования напряжения на ТП имеют ряд существенных недостатков: большую материалоемкость и высокую стоимость; значительные габариты; сложную конструкцию. Кроме того, они не учитывают фактическое напряжение у потребителя электрической энергии, в результате чего снижается точность регулирования. В такой ситуации целесообразнее контролировать напряжение у каждого конкретного потребителя, подключенного к регулируемой электрической сети [7].

В настоящее время более перспективным направлением в создании средств регулирования напряжения является построение логических схем с микропроцессорным управлением. С учетом этого разработан способ автоматического регулирования напряжения на электрической подстанции (рис. 2). Здесь приняты следующие обозначения (в соответствии с [8]):  $T$  — трансформатор с устройством регулирования под нагрузкой (РПН);  $PO$  — рабочий орган;  $ИУ$  — исполняющее устройство;  $У$  — усилитель;  $СУ$  — система управления;  $ДН_T$  — датчик напряжения трансформатора;  $ДН_1 - ДН_n$  — датчики напряжения наиболее удаленного и приближенного потребителей;  $ЗУ$  — задающее устройство;  $S_1 - S_n$  — потребители электрической энергии. Установленные у потребителей дат-

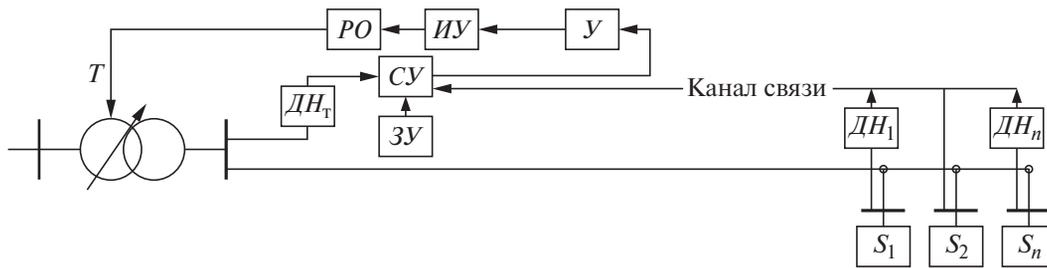


Рис. 2

чики напряжения ( $ДН_1 - ДН_n$ ) или расположенные в точках балансового разграничения потребителя и энергоснабжающей организации приборы учета (ПУ) с функцией контроля напряжения определяют наличие и уровень отклонения напряжения и передают соответствующий сигнал на исполнительный механизм, который приводит в действие технические средства, обеспечивающие регулирование напряжения на ТП.

К каждой ТП присоединено несколько потребителей. Конечная цель регулирования — приведение отклонения напряжения у каждого потребителя к нормативным значениям. Это отклонение от нормы у разных потребителей, подключенных к одной и той же ТП, может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Регулирование необходимо осуществлять в том случае, если уровень установившегося (действующего) отклонения напряжения хотя бы у одного потребителя выходит за нормативные значения. Причем следует выбирать, на какое значение нужно изменить коэффициент регулирования. Это важно делать для того, чтобы минимизировать действующие отклонения напряжения от нормативных значений одновременно у всех потребителей. Таким образом, выявив наличие отклонений, следует определить их суммарное значение у всех потребителей. Если оно положительное, напряжение надо регулировать в сторону уменьшения его значения на ТП, и наоборот. Если сумма отклонений действующего напряжения равна нулю (даже в случае, когда отклонение напряжения больше нормативного значения), регулирование не требуется, так как это приведет к еще большим отклонениям.

Далее необходимо определить значение коэффициента регулирования. При положительном суммарном отклонении напряжения коэффициент, показывающий, на какое значение необходимо изменить уровень отклонения действующего напряжения на ТП, %, определяется по формуле

$$B_1 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n A_n}{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\Delta U_d}{100} + 1 \right)} - 1 \right) \cdot 100, \quad (1)$$

где  $\Delta U_d$  — уровень отклонения действующего значения напряжения на границе балансового разграничения потребителя и энергоснабжающей организации, %;  $A_n$  —  $n$ -я точка балансового разграничения потребителя и энергоснабжающей организации.

При этом  $B_1$  принимает значения от  $-1$  до  $0$  (отрицательное значение показывает, что регулирование необходимо осуществлять в сторону уменьшения напряжения).

При отрицательном суммарном отклонении установившегося напряжения коэффициент, показывающий, на какое значение необходимо изменить уровень отклонения действующего напряжения на ТП, %, вычисляется из выражения

$$B_2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n A_n}{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\Delta U_d}{100} - 1 \right)} + 1 \right) \cdot 100. \quad (2)$$

В этом случае  $B_2$  принимает значения от  $0$  до  $1$  (положительное значение показывает, что регулирование нужно выполнять в сторону увеличения напряжения).

При использовании технических средств повышения уровня напряжения необходимо учитывать характеристики конкретного устройства, осуществляющего регулирование. Поскольку воздействие на него не всегда приводит к пропорциональному изменению напряжения, следует принимать во внимание коэффициент пропорциональности, учитывающий особенности каждого применяемого устройства. При этом можно определить коэффициент регулирования, который соответственно при положительном и отрицательном

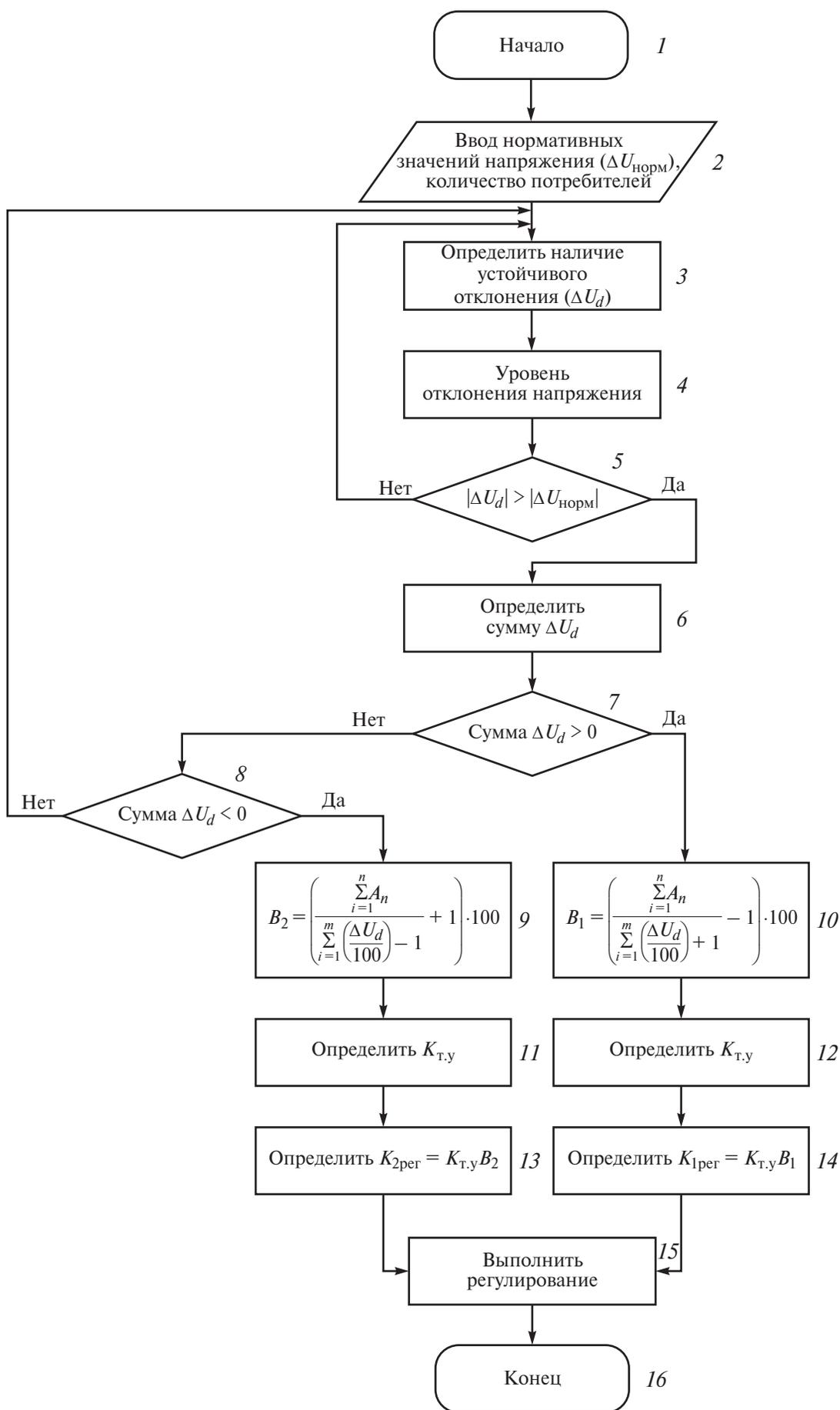


Рис. 3

суммарном отклонении установившегося напряжения будет иметь следующий вид:

$$K_{1\text{рег}} = K_{\text{т.у}} B_1; \quad (3)$$

$$K_{2\text{рег}} = K_{\text{т.у}} B_2, \quad (4)$$

где  $K_{1\text{рег}}$  и  $K_{2\text{рег}}$  — коэффициенты регулирования при положительном и отрицательном суммарном отклонении, %;  $K_{\text{т.у}}$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от характеристик технического устройства.

Для практической реализации предложенного способа автоматического регулирования напряжения на ТП разработан алгоритм (рис. 3) с использованием принципов, изложенных в [9, 10]. Сначала (блок 1) в блок 2 вводятся нормативные значения напряжения  $\Delta U_{\text{норм}}$  и количество потребителей, затем в блоке 3 определяется наличие устойчивого установившегося отклонения напряжения  $\Delta U_d$ , а в блоке 4 — его уровень, который далее в блоке 5 сравнивается с нормативным значением. При превышении этого значения сигнал поступает в блок 6, где вычисляется сумма отклонений напряжения. Если отклонение меньше нормативного значения, сигнал поступает в блок 3. Блоки 7 и 8 выполняют функцию определения направления регулирования. При превышении суммарным отклонением нулевого значения сигнал поступает в блок 10, в котором вычисляется коэффициент, показывающий, на какое значение необходимо изменить установившееся отклонение напряжения при его отклонении от норматива. В последующих блоках 12, 14 определяются коэффициенты пропорциональности  $K_{\text{т.у}}$  и регулирования  $K_{1\text{рег}}$ , после чего информация поступает в блок 15, который выдает исполнительный сигнал на начало регулирования (блок 16). Если условие блока 7 ( $\Delta U_d > 0$ ) не выполняется, сигнал поступает в блок 8. В этом случае схема реализует аналогичный алгоритм с использованием блоков 9, 11, 13. Если условия блоков 7 и 8 не выполняются, сигнал из блока 8 поступает в блок 3. Таким образом, данный алгоритм, который может быть реализован с помощью микропроцессоров AVR [11], позволяет автоматически определять коэффициент регулирования и применять соответствующие технические средства для регулирования действующего отклонения напряжения на ТП.

## Выводы

1. Отклонение напряжения более чем на 5 % приводит к перерасходу электрической энергии и влечет за собой сокращение срока службы оборудования как на стороне потребителя, так и энергоснабжающей организации, и как следствие — снижение надежности и энергоэффективности систем электроснабжения.

2. Разработанный способ автоматического регулирования напряжения на трансформаторной подстанции позволит комплексно повысить эффективность функционирования систем электроснабжения, уменьшить количество случаев отклонения ПКЭ от нормативного значения и их негативное воздействие на системы электроснабжения потребителя и энергоснабжающей организации.

## Список литературы

1. ГОСТ Р 54149–2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. Бахмутский И. Н. Качество в сетях. — Независимая газета, 2011, 31 мая.
3. Воронин В., Гаджиев М., Шамонов Р. Направления развития системы регулирования напряжения и реактивной мощности в ЕНЭС / ОАО «ФСК ЕЭС». — Электроэнергия. Передача и распределение (<http://eepg.ru>).
4. Бородин М. В., Виноградов А. В. Корректировка стоимости потребленной электроэнергии в зависимости от ее качества. — Промышленная энергетика, 2013, № 7.
5. Попов Н. М. Электроснабжение. Рабочие режимы сетей 0,38...10 кВ: Учеб. пособие. — Кострома: КГСХА, 2010.
6. European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. — Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006.
7. Михалков А. В. Что нужно знать о регулировании напряжения. 3-е изд. — М.: Книга по Требованию, 2013.
8. Овчаренко Н. И. Автоматика энергосистем: Учеб. для вузов / Под ред. А. Ф. Дьякова. 3-е изд., исправленное. — М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
9. Fundamentals of automation technology / F. Ebel, S. Idler, G. Prede, D. Scholz. Technical book — Festo Didactic GmbH & Co. KG, 2008.
10. Carlos A. Smith, Principles and Practice of Automatic Process Control. — Wiley, 1997.
11. Morton J. AVR: an introductory course — Newnes, 2002.

winaleksandr@rambler.ru