

УДК 621.316

М.В. Мартынюк

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НАПРЯЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приводится описание метода вычисления коэффициентов управления специализированных устройств, предназначенных для обеспечения заданных напряжений в электрической сети. Задача сводится к поиску корней уравнения с одним комплексным неизвестным второго порядка. Показано, что данная задача не всегда имеет решение, приводится пример задачи управления напряжением потребителя, которую нельзя решить посредством одного регулирующего устройства даже в случае неограниченного диапазона регулирования.

Ключевые слова: оперативное управление, функция комплексного переменного, распределительная электрическая сеть, тиристорный регулятор вольтодобавочного напряжения.

Постановка задачи управления состоянием электрической сети

Существующие в настоящее время устройства управления величиной и фазой вольтодобавочного напряжения (тиристорные регуляторы величины и фазы вольтодобавочного напряжения – ТРВДН [1]) могут применяться для решения задач статического [2] и оперативного [3] регулирования напряжения и управления потоками мощности в распределительных электрических сетях (РЭС) различной архитектуры. Возможность регулирования с помощью ТРВДН амплитуды и фазы напряжения позволяет получить точное решение для задачи управления напряжениями в заданных узлах электрической сети. В качестве таких узлов могут выступать, например, потребители электроэнергии.

Управляющее воздействие ТРВДН на электрическую сеть описывается комплексным числом z , представляющим собой комплексный коэффициент трансформации напряжения. Действительная часть $\text{Re}(z)$ отвечает за продольное регулирование, а мнимая часть $\text{Im}(z)$ – за поперечное регулирование.

В работах [4,5] даны описания различных алгоритмов управления напряжениями РЭС посредством ТРВДН. Исходными данными для вычисления управляющих коэффициентов ТРВДН являются значения параметров элементов электрической сети: полные сопротивления линий передачи электроэнергии Z_{LINE} , номинальные (требуемые) напряжения U_{nom} и значения текущих нагрузок каждого из потребителей (полные мощности потребления P_{LOAD}), характеристики трансформаторов – позволяющие произвести расчет электрической сети (вычисление токов и напряжений каждого элемента электрической сети) [6]. Нагрузка потребителей моделируется комплексным сопротивлением Z_{LOAD} , значение которого определяется P_{LOAD} и U_{nom} . В работе [4] показано, что для регулирования РЭС с линейной архитектурой (1) для каждого участка сети требуется решить уравнение, составленное на основании равенства мощностей на входе и выходе каждого из ТРВДН (в рамках данной модели ТРВДН рассматривается, как идеальный трансформатор) (1):

$$-Z_{\text{LINE}}I[I]^* + U_{\text{nom}}[I]^* - [I_{\text{LOAD}}]^*U_{\text{nom}} = 0, \quad (1)$$

где I – ток во входной ветви ТРВДН, а I_{LOAD} – ток в выходной линии ТРВДН, который определяется нагрузкой потребителя. После вычисления I управляющий коэффициент z вычисляется на основании уравнения (2):

$$z = (U_{\text{nom}} + IZ_{\text{LINE}})/U_{\text{nom}} \quad (2)$$

Данное уравнение не является простым квадратным уравнением и требует решения системы нелинейных уравнений, составленных на основании равенства нулю действительной и

мнимой составляющих функции комплексного аргумента расположенной в левой части уравнения.

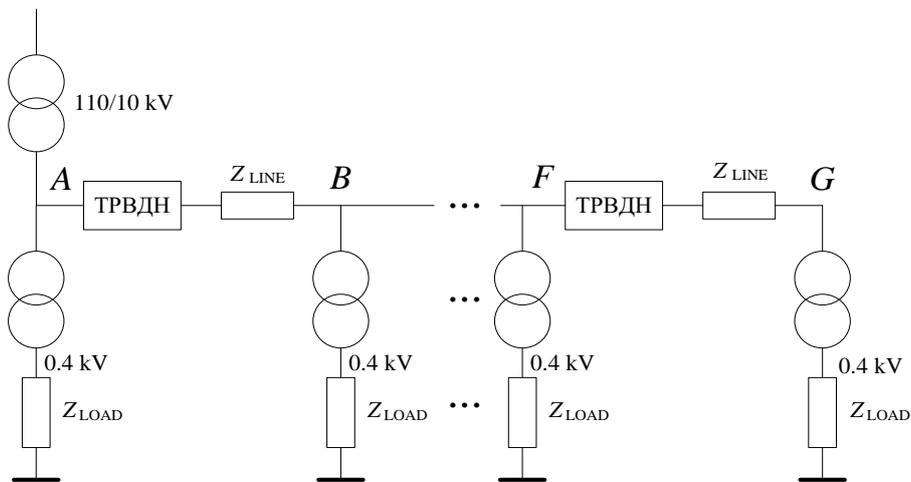


Рис. 1. Пример структурной схемы распределительной электрической цепи с линейной архитектурой

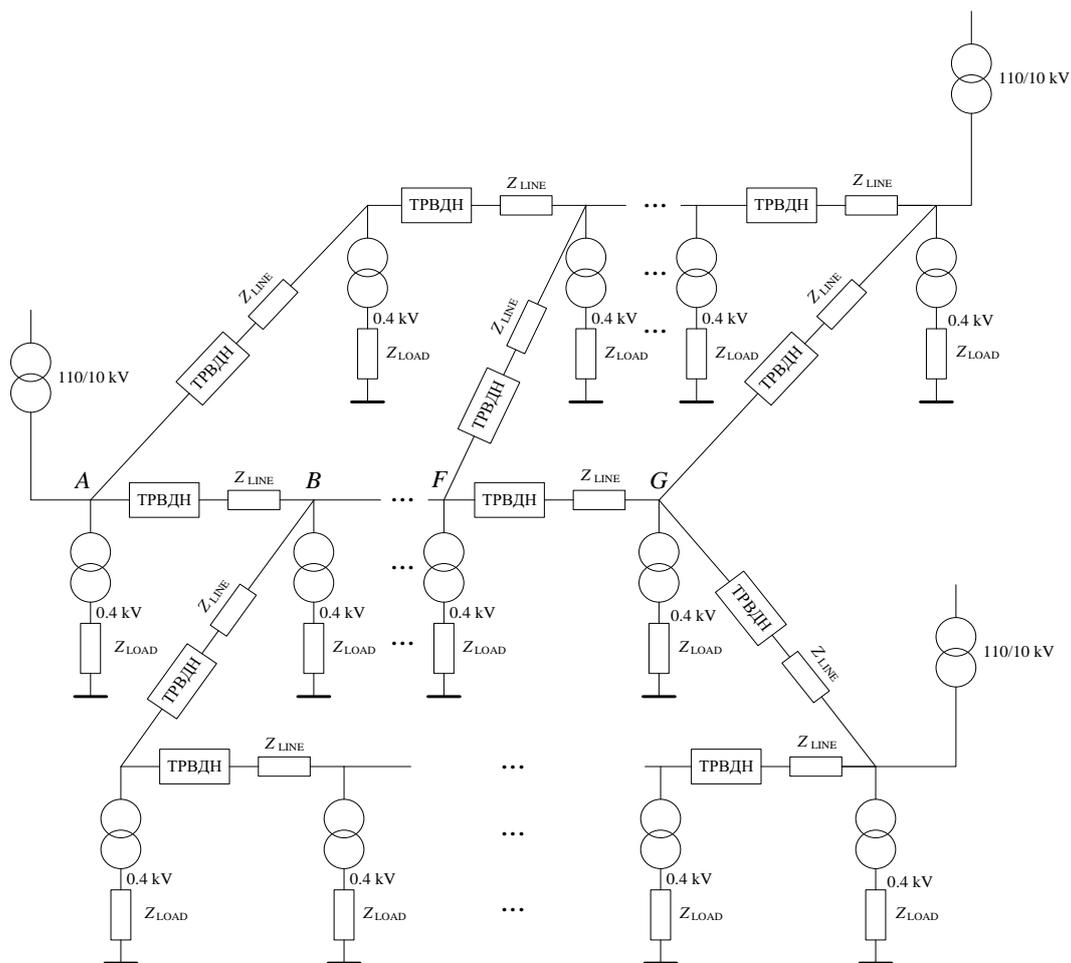


Рис. 2. Пример структурной схемы распределительной электрической цепи со сложной сетевой архитектурой

Можно показать, что вычисление коэффициентов управления в электрических сетях с более сложной сетевой архитектурой (рис.2) потребует решения уравнение второй степени вида (3):

$$az\bar{z} + bz + c\bar{z} + d = 0, \quad (3)$$

где z – искомый неизвестный коэффициент управления ТРВДН, \bar{z} – число комплексно сопряженное коэффициенту управления, a, b, c и d – известные комплексные коэффициенты уравнения.

Вычисление коэффициентов управления

Введем обозначения для действительной и мнимой составляющих комплексного числа через нижние индексы r и i : $a = a_r + a_i i$, где $a_r = \text{Re}(a)$ и $a_i = \text{Im}(a)$ действительные числа. Также введём обозначение (4):

$$f(z) = az\bar{z} + bz + c\bar{z} + d = u(z_r, z_i) + iv(z_r, z_i), \quad (4)$$

где $f(z)$ – функция комплексной переменной, а $u(z_r, z_i)$ и $v(z_r, z_i)$ – действительные функции действительных переменных.

Требуется, либо найти значения корней данного уравнения z , либо, если уравнение не имеет решения, значение z обеспечивающее (5):

$$\min_z |f(z)|. \quad (5)$$

Решение находится путем составления системы уравнений для действительной и мнимой составляющих.

Запишем выражение (4) в соответствии с введенным обозначением:

$$f(z) = (a_r + a_i i)(z_r + z_i i)(z_r - z_i i) + (b_r + b_i i)(z_r + z_i i) + (c_r + c_i i)(z_r - z_i i) + (d_r + d_i i)$$

или

$$f(z) = (a_r z_r^2 + a_r z_i^2 + b_r z_r - b_i z_i + c_r z_r + c_i z_i + d_r) + (a_i z_r^2 + a_i z_i^2 + b_r z_i - b_i z_r - c_r z_i + c_i z_r + d_i) i.$$

Получаем,

$$\begin{aligned} u(z_r, z_i) &= (a_r z_r^2 + a_r z_i^2 + b_r z_r - b_i z_i + c_r z_r + c_i z_i + d_r), \\ v(z_r, z_i) &= (a_i z_r^2 + a_i z_i^2 + b_r z_i - b_i z_r - c_r z_i + c_i z_r + d_i). \end{aligned}$$

Из (3) следует, что должно выполняться условие

$$\begin{cases} u(z_r, z_i) = 0 \\ v(z_r, z_i) = 0 \end{cases}$$

или (6)

$$\begin{cases} a_r(z_r^2 + z_i^2) + (b_r + c_r)z_r + (-b_i + c_i)z_i + d_r = 0 \\ a_i(z_r^2 + z_i^2) + (b_i + c_i)z_r + (b_r - c_r)z_i + d_i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Эту систему нелинейных уравнений необходимо решить относительно двух вещественных неизвестных z_r и z_i .

Рассмотрим несколько случаев. Если $a_r = 0$ и $a_i = 0$, то система уравнений (3) является системой линейных уравнений, решение которой находится, как:

$$z_r = \frac{b_i d_i + b_r d_r - c_i d_i - c_r d_r}{b_i^2 + b_r^2 - c_i^2 - c_r^2},$$

$$z_i = \frac{b_i d_r - b_r d_i + c_i d_r - c_r d_i}{b_i^2 + b_r^2 - c_i^2 - c_r^2}.$$

Если $a \neq 0$, находится линейная зависимость между z_r и z_i через взвешенную разность строк системы уравнений (6):

$$\begin{aligned} a_i(b_r + c_r)z_r + a_i(-b_i + c_i)z_i + a_i d_r - a_r(b_i + c_i)z_r - a_r(b_r - c_r)z_i - a_r d_i &= 0, \\ (a_i b_r + a_i c_r - a_r b_i - a_r c_i)z_r + (-a_i b_i + a_i c_i - a_r b_r + a_r c_r)z_i + a_i d_r - a_r d_i &= 0. \end{aligned}$$

Введем обозначение:

$$Rz_r + Qz_i + D = 0,$$

где

$$\begin{aligned} R &= (a_i b_r + a_i c_r - a_r b_i - a_r c_i), \\ Q &= (-a_i b_i + a_i c_i - a_r b_r + a_r c_r), \\ D &= a_i d_r - a_r d_i. \end{aligned}$$

В зависимости от равенства нулю коэффициентов R или Q , выражаем $z_r(z_i)$ или $z_i(z_r)$ и подставляем в одно из уравнений в (6). В результате получается обычное квадратное уравнение, которое необходимо решить относительно неизвестного z_r или z_i .

При $R = 0$:

$$z_i = -\frac{D}{Q}.$$

Найденное значение подставляется в одно из уравнений (6) с ненулевым коэффициентом при $(z_r^2 + z_i^2)$.

Если $a_r = 0$ найденное значение z_i подставляется во второе уравнение:

$$a_i z_r^2 + (b_i + c_i)z_r + (a_i z_i^2 + (b_r - c_r)z_i + d_i) = 0,$$

в противном случае z_i подставляется в первое уравнение:

$$a_r z_r^2 + (b_r + c_r)z_r + (a_r z_i^2 + (-b_i + c_i)z_i + d_r) = 0.$$

Полученное квадратное уравнение решается относительно неизвестного z_r .

Если $R \neq 0$, то

$$z_r = -\frac{Q}{R}z_i - \frac{D}{R}$$

или

$$z_r = Az_i + B,$$

где

$$A = \frac{a_r b_r - a_r c_r + a_i b_i - a_i c_i}{a_i b_r + a_i c_r - a_r b_i - a_r c_i}$$

и

$$B = -\frac{a_i d_r - a_r d_i}{a_i b_r + a_i c_r - a_r b_i - a_r c_i}$$

подставляется в одно из уравнений (6) с ненулевым коэффициентом при $(z_r^2 + z_i^2)$.

Если $a_r = 0$ выражение $z_r(z_i)$ подставляется во второе уравнение:

$$a_r(A^2 + 1)z_i^2 + (2a_r AB + (b_r + c_r)A + b_i - c_i)z_i + (a_r B^2 + (b_r + c_r)B + d_r) = 0,$$

в противном случае $z_r(z_i)$ подставляется в первое уравнение:

$$a_i(A^2 + 1)z_i^2 + (2a_r AB + (b_i + c_i)A + b_r - c_r)z_i + (a_r B^2 + (b_i + c_i)B + d_i) = 0.$$

Полученное квадратное уравнение решается относительно неизвестного z_i .

Если найденные значения z_r и z_i имеют мнимую составляющую (не существует действительных z_r и z_i) – это означает, что уравнение (3) не имеет решения на множестве комплексных чисел, то есть ТРВДН не может обеспечить требуемое напряжение в заданном узле.

В этом случае требуется найти z удовлетворяющее требованию (5). Нахождение строгого аналитического решения затруднительно и минимум функции $|f(z)|$ может быть найден численно с использованием одного из методов нелинейной оптимизации.

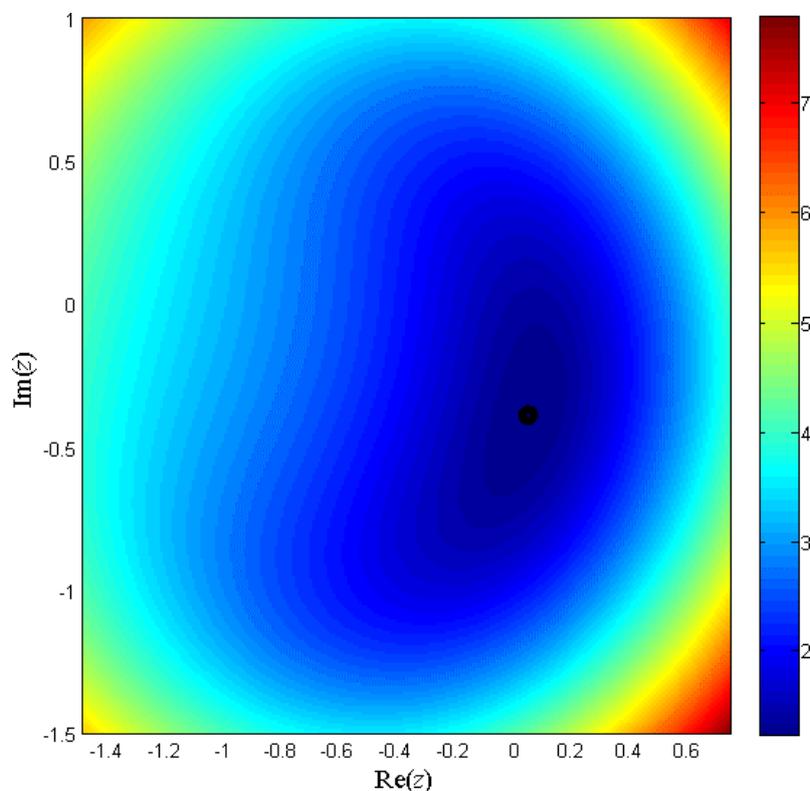


Рис. 3. Пример функции $|f(z)|$ (4) для значений коэффициентов: $a = 1+2i, b = 2+1i, c = 1+1i, d = -1+1i$

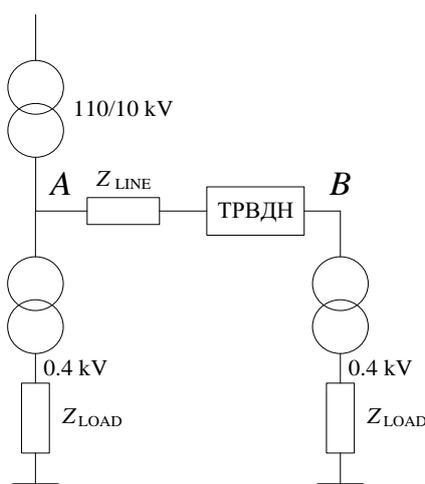


Рис. 4. Протяженная РЭС с двумя потребителями

На рис. 3 представлен пример функции $|f(z)|$ и найденное численно положение экстремума: $|f(0.0457-0.386i)| = 1,234$.

Был проведен численный эксперимент по управлению напряжением удаленного от источника потребителя (рис. 4) посредством изменения коэффициентов регулирования в широком диапазоне, значительно превышающем возможности реального ТРВДН. Величина нагрузки потребителя в узле B составляла 1 МВт, расстояние до источника 50 км, площадь поперечного сечения проводов линии электропередачи 150 мм². Результаты моделирования представлены на рис 5. Максимальное значение модуля напряжения потребителя в точке B составило 9740 В.

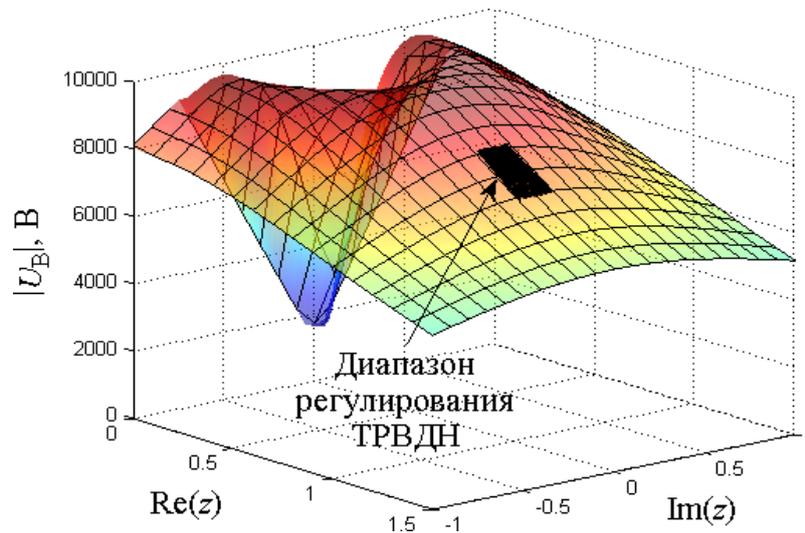


Рис. 5. Зависимость абсолютного напряжения потребителя в узле B от значения коэффициента регулирования ТРВДН

Заключение

При вычислении значений управляющих коэффициентов ТРВДН необходимо учитывать не только возможности данных устройств – верхние и нижние пределы изменения выходного напряжения и угла сдвига фаз, их дискретность – но и тот факт, что достижение номинального напряжения в заданном узле может оказаться невозможным.

Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.577.21.0242 о предоставлении субсидии от 26.09.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0242).

Библиографический список

1. Пат. 2621062 Рос. Федерация: МПК G 05F 1/30. Тиристорное фазоповоротное устройство с вольтодобавочным трансформатором для сети среднего напряжения / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, А.А. Кралин, Е.В. Крюков; заявитель и патентообладатель Ниж. гос. техн. ун-т им. П.Е. Алексеева – № 2016127017; заявл. 06.07.2016; опубл. 31.05.2017, Бюл. № 16.
2. **Рыбников, Д.А.** Применение вольтодобавочных трансформаторов в распределительных сетях 0,4 кВ ОАО «МРСК Центра» // Энергоэксперт. – 2011. – № 3. – С. 52.
3. **Соснина, Е.Н.** Тиристорный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения в распределительных электрических сетях 6-10 кВ / Е.Н. Соснина [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики. 2017. – С. 132-136.
4. **Martynyuk, M.V.** Voltage regulation of a linear section of an extended distribution network with thyristor regulators of booster voltage (TRBV) / M.V. Martynyuk, E.S. Sokolova, D.V. Dmitriev, A.I. Tyurin,

Evgeny V. Kryukov // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering.

5. **Sokolova, E.S.** Optimization of the Parameters of the Distribution Network Computer Model to Reduce Losses / E.S. Sokolova, M.V. Martyniuk, D.V. Dmitriev, A.I. Tyurin – 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok.
6. **Martynyuk, M.V.** Matrix Method of Calculation for Simulation of Distribution Electric Networks of Medium Voltage / M.V. Martynyuk, E.S. Sokolova, D.V. Dmitriev. And A.I. Tyurin // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – V 12. – № 24. – P. 15066-15072.

*Дата поступления
в редакцию: 22.04.2019*

M.V. Martynyuk

**CALCULATION OF THE COEFFICIENTS OF REGULATING THYRISTOR DEVICE
FOR OPERATIONAL VOLTAGE MANAGEMENT
ON THE ELECTRIC NETWORK SECTION**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The article describes the method of calculating the control coefficients of a device designed to regulate the voltage of consumers in a distribution electrical network.

Approach: The values of the control coefficients are found by solving a second-order complex unknown equation, which reduced to a system of nonlinear equations.

Results: The considered method allows to obtain the exact values of the control coefficients. It is shown that this task does not always have a solution and provides an example of a consumer voltage control problem that cannot be solved by a single regulating device, even if the device has an unlimited range of regulation.

Keywords: operational control, function of complex variable, distribution electrical network, TVBR.