

УДК 321.311

И. В. ХОМЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПО СХЕМЕ ГЛУБОКОГО ВВОДА

Проведен расчет параметров установившегося режима электрической сети по схеме глубокого ввода методом Ньютона. Исследовано влияние на параметры режима электрической сети суточной неравномерности электрической нагрузки, а также величин продольной компенсации мощности ЛЭП (X_C) и величины компенсации реактивной мощности у потребителя (Q_C).

Ключевые слова: электрическая сеть, параметры режима, узловые уравнения, метод Ньютона, суточная неравномерность нагрузки, продольная компенсация, компенсация реактивной мощности.

Проведено розрахунок параметрів усталеного режиму електричної мережі за схемою глибокого введення методом Ньютона. Исследовано впливу на параметри режиму електричної мережі добової нерівномірності електричного навантаження, а також величин поздовжньої компенсації потужності ЛЕП (X_C) і величини компенсації реактивної потужності у споживача (Q_C).

Ключові слова: електрична мережа, параметри режиму, вузлові рівняння, метод Ньютона, добова нерівномірність навантаження, поздовжня компенсація, компенсація реактивної потужності.

The calculation of the parameters of the steady mains mode according to the scheme of deep feeding Newton method. It is follow-influence on the parameters of the mains mode of daily non-uniformity of the electric load, as well as the values of the longitudinal compensation of power transmission lines (X_C) and the value of reactive power compensation in the consumer (Q_C).

Keywords: electric network mode settings, the nodal equations, Newton's method, the daily load uneven longitudinal someone overcancellation, reactive power compensation.

Введение. Расчеты установившихся режимов электрических сетей являются самыми распространенными видами расчетов. Их результаты используются в практике эксплуатации, а также при проведении проектных и научно-исследовательских работ. По оценкам специалистов доля расчетов установившихся режимов электрических сетей в общей расчетной практике составляет около 70%. Функционирование современных автоматизированных систем, обеспечивающих надежную и эффективную работу систем электроснабжения, неразрывно связано с необходимостью решения задач информационно-вычислительного обслуживания и многократного проведения расчетов установившихся режимов.

Целью исследований является установление функциональных зависимостей параметров режимов электрических сетей для различных условий эксплуатации.

Теоретическая часть. Нелинейные уравнения узловых напряжений описывают установившийся режим электрической системы при задании нелинейных источников тока. В схемах замещения электрических систем нелинейные источники тока соответствуют генераторам с постоянной мощностью либо нагрузкам потребителей, заданных статической характеристикой или постоянной мощностью. Если мощность нагрузки потребителя или генератора в узле k постоянная, то узловой ток, кА, равен:

$$j_k(\dot{U}_k) = \frac{S_k^*}{\sqrt{3} U_k^*}, \quad (1)$$

где S_k^* – постоянная трехфазная мощность k узла, МВА;

U_k^* – линейное напряжение k узла, кВ;

$j_k(\dot{U}_k)$ – нелинейный источник тока, зависящий от напряжения.

В матричном виде уравнения узловых напряжений в формате баланса токов следующие:

$$Y_y \dot{U} = \sqrt{3} j(\dot{U}) - Y_\sigma \dot{U}_\sigma, \quad (2)$$

где Y_y – комплексная матрица собственных и взаимных узловых проводимостей;

$j(\dot{U})$ – вектор-столбец задающих токов, k элемент которого определяется выражением (1);

$Y_\sigma \dot{U}_\sigma$ – вектор-столбец, k элемент которого равен $Y_{k\sigma} \dot{U}_\sigma$;

\dot{U}_σ – заданное напряжение балансирующего узла.

Уравнение баланса токов для k узла имеет следующий вид:

$$\dot{\omega}_{jk} = Y_{kk} \dot{U}_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} Y_{kj} \dot{U}_j - \frac{S_k^*}{U_k} = 0, \quad (3)$$

где Y_{kk} – собственная проводимость узла k ;

Y_{kj} – взаимная проводимость узлов k и j ;

ω_{jk} – небаланс тока в k узле, $k = 1, \dots, n$.

Уравнения узловых напряжений в форме баланса мощности и матричной записи имеют вид:

$$U_{diag}^* \left(Y_y^* U + Y_\sigma^* U_\sigma \right) = S^*, \quad (4)$$

U_{diag}^* – диагональная матрица, k диагональный элемент которой равен сопряженному комплексу напряжения k узла;

S^* – вектор-столбец, k элемент которого равен сопряженному комплексу мощности k узла.

Уравнения баланса мощностей для k узла легко получить из (3) на сопряженный комплекс напряжения узла:

$$\dot{\omega}_{\dot{S}k} = -Y_{kk} \dot{U}_k^* U_k - U_k^* \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} Y_{kj} \dot{U}_j + S_k^* = 0, \quad (5)$$

где функция $\dot{\omega}_{\dot{S}k}$ соответствует небалансу мощности в k узле, $k = 1, \dots, n$. В выражениях (4), (5) для удобства записи слагаемые $Y_{k\sigma} \dot{U}_\sigma$ и $Y_{k\sigma} \dot{U}_\sigma^* U_k$ внесены под знак Σ , причем балансирующему узлу присвоен номер $n+1$.

Для того чтобы оперировать с вещественными величинами, выделим в уравнениях (4), (5) действительные

тельные и мнимые части.

Принимаем:

$$\dot{\omega}_{jk} = \omega_{Jak} + j\omega_{Jrk}; \tag{6}$$

$$\dot{\omega}_{Sk} = \omega_{Pk} + j\omega_{Qk}, \tag{7}$$

где $\omega_{Jak}, \omega_{Jrk}, \omega_{Pk}, \omega_{Qk}$ – собственно небалансы активных и реактивных токов и мощностей в узле k .

В качестве переменных при решении уравнений установившегося режима могут использоваться: 1) модуль и фазы напряжений в узлах U и δ ; 2) вещественные и мнимые составляющие напряжений U_a и U_r .

Уравнения баланса активного и реактивного токов при использовании переменных U_a, U_r легко получить, разделив (3) на действительную и мнимую части:

$$\omega_{Jak} = g_{kk}U_{ak} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} g_{kj}U_{aj} + b_{kk}U_{rk} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} b_{kj}U_{rj} - \frac{P_k U_{ak} + Q_k U_{rk}}{U_k^2} = 0; \tag{8}$$

$$\omega_{Jrk} = -b_{kk}U_{ak} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} b_{kj}U_{aj} + g_{kk}U_{rk} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} g_{kj}U_{rj} - \frac{P_k U_{rk} + Q_k U_{ak}}{U_k^2} = 0. \tag{9}$$

Уравнения баланса активной и реактивной мощности для k узла при переменных U_a и U_r можно записать следующим образом:

$$\omega_{Pk} = P_k - g_{kk}U_k^2 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} [(U_{ak}U_{aj} + U_{rk}U_{rj})g_{kj} + (U_{ak}U_{rj} - U_{rk}U_{aj})b_{kj}] = 0; \tag{10}$$

$$\omega_{Qk} = Q_k - b_{kk}U_k^2 - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} [-(U_{ak}U_{rj} - U_{rk}U_{aj})g_{kj} + (U_{ak}U_{aj} + U_{rk}U_{rj})b_{kj}] = 0. \tag{11}$$

Уравнения баланса мощностей для k узла при переменных U, δ можно получить из (5) в следующем виде:

$$\omega_{Pk} = P_k - g_{kk}U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} U_j (g_{kj} \cos \delta_{kj} - b_{kj} \sin \delta_{kj}); \tag{12}$$

$$\omega_{Qk} = Q_k - b_{kk}U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} U_j (b_{kj} \cos \delta_{kj} - g_{kj} \sin \delta_{kj}). \tag{13}$$

Нелинейную систему уравнений установившегося режима в упрощенном виде можно записать следующим образом:

$$W(X) = 0, \tag{14}$$

где $W(X)$ – вектор-функция порядка n ;

X – вектор зависимых переменных порядка n :

$$W(X) = \begin{pmatrix} \omega_1(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ \omega_2(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ \dots \\ \omega_n(X_1, X_2, \dots, X_n) \end{pmatrix}.$$

При решении (14) по методу Ньютона на каждом шаге итерационного процесса решается линеаризованная система

$$\frac{\partial W}{\partial X} (X^{(i)}) \Delta X^{(i+1)} = -W(X^{(i)}), \tag{15}$$

где матрица производных (матрица Якоби)

$$\frac{\partial W}{\partial X} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \omega_1}{\partial X_1} & \frac{\partial \omega_1}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial \omega_1}{\partial X_n} \\ \frac{\partial \omega_2}{\partial X_1} & \frac{\partial \omega_2}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial \omega_2}{\partial X_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \omega_n}{\partial X_1} & \frac{\partial \omega_n}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial \omega_n}{\partial X_n} \end{vmatrix}. \tag{16}$$

Следующее, т.е. $(i+1)$ -е, приближение зависимых переменных определяется по выражению

$$X^{(i+1)} = X^{(i)} + \Delta X^{(i+1)}. \tag{17}$$

Контроль сходимости осуществляется по вектору небалансов, т.е. условие

$$\omega_k(X^{(i)}) \leq \varepsilon, \tag{18}$$

должно выполняться для всех небалансов.

Примеры различной записи уравнений установившегося режима приведены выше. Если уравнения узловых напряжений записаны в осях U_a, U_r и во всех узлах заданы активные и реактивные мощности, то матрица производных может быть представлена в виде

$$\frac{\partial W}{\partial X} = \begin{vmatrix} \frac{\partial W_P}{\partial U_a} & \frac{\partial W_P}{\partial U_r} \\ \frac{\partial W_Q}{\partial U_a} & \frac{\partial W_Q}{\partial U_r} \end{vmatrix}. \tag{19}$$

Если для узла заданы активная мощность P_k и модуль напряжения этого узла U_k то в системе уравнений узловых напряжений вместо уравнения баланса Q_k будет уравнение

$$U_k^2 = U_{ak}^2 + U_{rk}^2, \tag{20}$$

В матрице Якоби для узлов с заданными P_k и U_k вместо производных реактивных небалансов по активным и реактивным составляющим узлов будут входить производные (20) по U_{ak} и U_{rk} . Если в качестве переменных при расчете установившегося режима выбраны модули и фазы напряжений U_k, δ_k , то

$$\frac{\partial W}{\partial X} = \begin{vmatrix} \frac{\partial W_P}{\partial U} & \frac{\partial W_P}{\partial \delta} \\ \frac{\partial W_Q}{\partial U} & \frac{\partial W_Q}{\partial \delta} \end{vmatrix}. \tag{21}$$

В выражении (19) $\frac{\partial W_P}{\partial U_a}, \frac{\partial W_P}{\partial U_r}, \frac{\partial W_Q}{\partial U_a}, \frac{\partial W_Q}{\partial U_r}$ – матрицы-клетки частных производных небалансов активной и реактивной мощности по активным и реактивным составляющим напряжений узлов.

В (21) $\frac{\partial W_P}{\partial U}, \frac{\partial W_P}{\partial \delta}, \frac{\partial W_Q}{\partial U}, \frac{\partial W_Q}{\partial \delta}$ – матрицы-клетки частных производных небалансов P и Q по модулям и фазам напряжений узлов [1].

Расчетная часть. Схема замещения распределительной электрической сети по схеме глубокого ввода представлена на рис. 1.

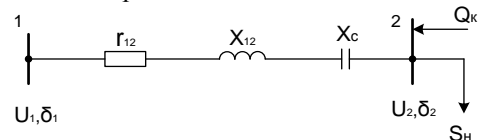


Рис. 1 – Схема замещения сети

Данные о параметрах сети и мощности нагрузки $Z_{12} = R_{12} + jX_{12} = (10 + j20) \text{ Ом}$, $U_1 = U_6 = 115 \text{ кВ}$, $\dot{S} = P_2 + jQ_2 = (-80 - j40) \text{ МВА}$, $X_c = 0 \text{ Ом}$, $Q_k = 0 \text{ МВАр}$
 Проведем расчет установившегося режима сети с точностью

$$\varepsilon = 0,1 \text{ мВА.}$$

1. Рассчитаем собственные и взаимные проводимости узлов сети

$$Y_{12} = \frac{1}{R_{12} + jX_{12}} = \frac{R_{12} - jX_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} = \frac{10 - j20}{500} = (0,02 - j0,04) \text{ См,}$$

$$Y_{22} = Y_{12}.$$

2. Задание начальных приближений $U_2^{(0)} = 110 \text{ кВ}$, $\delta_2^{(0)} = 0$

3. Формирование системы линейаризованных уравнений на шаге расчета.

Система нелинейных узловых уравнений для рассматриваемой схемы имеет вид:

$$-g_{22}U_2^2 - U_2U_{1g_{21}}\cos\delta_{21} + U_2U_{1b_{21}}\sin\delta_{21} + P_2 = 0;$$

$$-b_{22}U_2^2 - U_2U_{1b_{21}}\cos\delta_{21} - U_2U_{1g_{21}}\sin\delta_{21} + Q_2 = 0$$

Определим начальное приближение вектора небалансов при известных на шаге напряжениях

$$W(X^{(0)}) = \begin{vmatrix} -0,02 \cdot 110^2 + 110 \cdot 115 \cdot 0,02 \cdot \cos 0^\circ + \\ -0,04 \cdot 110^2 + 110 \cdot 115 \cdot 0,04 \cdot \cos 0^\circ + \\ + 110 \cdot 115 \cdot 0,04 \cdot \sin 0^\circ + 80 \\ -110 \cdot 115 \cdot 0,02 \cdot \sin 0^\circ + 40 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 69 \\ 18 \end{vmatrix}$$

Матрица Якоби для данной системы имеет вид

$$\frac{\partial W}{\partial X} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \Delta P_2}{\partial U_2} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial \delta_2} \\ \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial U_2} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial \delta_2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -2g_{22}U_2 - U_{\sigma}(g_{2\sigma}\cos\delta_2 - b_{2\sigma}\sin\delta_2) + \\ -2b_{22}U_2 - U_{\sigma}(b_{2\sigma}\cos\delta_2 - g_{2\sigma}\sin\delta_2) - \\ + U_2U_{\sigma}(g_{2\sigma}\sin\delta_2 - b_{2\sigma}\cos\delta_2) \\ - U_2U_{\sigma}(g_{2\sigma}\cos\delta_2 - b_{2\sigma}\sin\delta_2) \end{vmatrix}$$

Вычислим элементы матрицы Якоби и запишем ее в следующем виде:

$$\frac{\partial W(X^{(0)})}{\partial X} = \begin{vmatrix} -2,1 & -506 \\ -4,2 & 253 \end{vmatrix}$$

Систему линейаризованных уравнений на первом шаге можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} -2,1\Delta U_2^{(1)} - 506\Delta\delta_2^{(1)} = 69; \\ -4,2\Delta U_2^{(1)} + 253\Delta\delta_2^{(1)} = 18. \end{cases}$$

4. Оценка достигнутой точности. Небалансы мощности

$$P = 69, Q = 18.$$

больше заданной погрешности расчета.

5. Определим значения $\Delta U_2^{(1)}$ и $\Delta\delta_2^{(1)}$, решая систему линейаризованных уравнений методом Гаусса:

$$\begin{cases} \Delta U_2^{(1)} = -9,9907 \text{ кВ}; \\ \Delta\delta_2^{(1)} = -0,0949 \text{ рад} = -5,4374^\circ. \end{cases}$$

6. После определения поправок находим первое приближение переменных:

$$\begin{cases} \Delta U_2^{(1)} = 110 - 9,9907 = 100,0093 \text{ кВ}, \\ \Delta\delta_2^{(1)} = 0 - 5,4374^\circ = -5,4374^\circ; \end{cases}$$

Для достижения требуемой точности решения вычисления необходимо повторять по п. 3-6 до тех пор, пока небалансы в узлах не станут меньше заданной величины ε (табл. 1) [2].

Таблица 1 – Результаты итерационного процесса

Номер итерации	0	1	2
ΔW , макс	69	7,484	0,19
U_2 , кВ	100,0093	98,0893	98,0333
δ_2 , град	-5,4374	-6,1249	-6,1249

Основываясь на результатах расчета установившегося режима электрической сети проанализируем функциональные зависимости параметров режима от суточной неравномерности нагрузки (S_n), параметров продольной компенсации линии электропередачи (X_c) и от величины компенсации реактивной мощности у потребителя (Q_k).

Известно, что электрическая нагрузка систем электроснабжения неравномерна. Специалисты выделяют суточную, недельную и годовую неравномерности. Изменение нагрузки оказывает влияние на параметры режима электрической сети. Примем, что нагрузка у потребителя S_n изменяется от максимального до минимального значения следующим образом:
 $S_1 = (-60 - j20) \text{ МВА}$; $S_4 = (-90 - j50) \text{ МВА}$;
 $S_2 = (-70 - j30) \text{ МВА}$; $S_5 = (-100 - j60) \text{ МВА}$;
 $S_3 = (-80 - j40) \text{ МВА}$;

Характер этого влияния показан на рис. 2. Анализ приведенных результатов показывает, что с увеличением нагрузки потери активной и реактивной мощности в сети увеличиваются, кроме того увеличиваются потеря напряжения и угол δ_2 , а напряжение у потребителя снижается.

По мнению многих специалистов, одним из наиболее эффективных способов улучшения режима электрической сети является компенсация потоков реактивной мощности у потребителя. При этом снижаются потери мощности в сети, а пропускная способность линий повышается. Результаты расчетов влияния компенсации реактивной мощности на параметры режима приведены на рис. 3. Они показывают, что при компенсации падение напряжения, потери активной и реактивной мощности снижаются, а напряжение и угол δ_2 у потребителя повышаются.

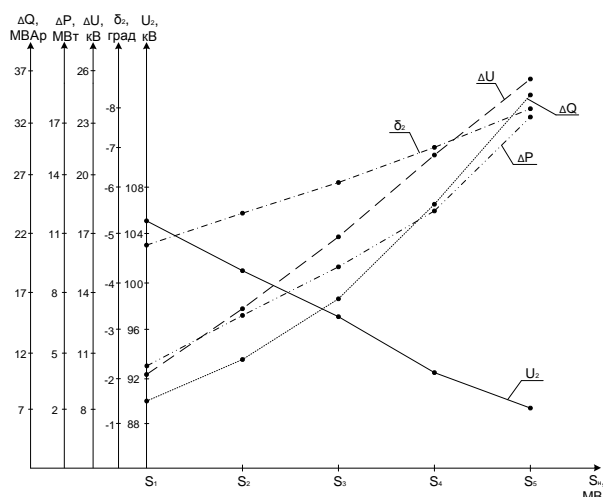


Рис. 2 – Влияние суточной неравномерности нагрузки на параметры режима

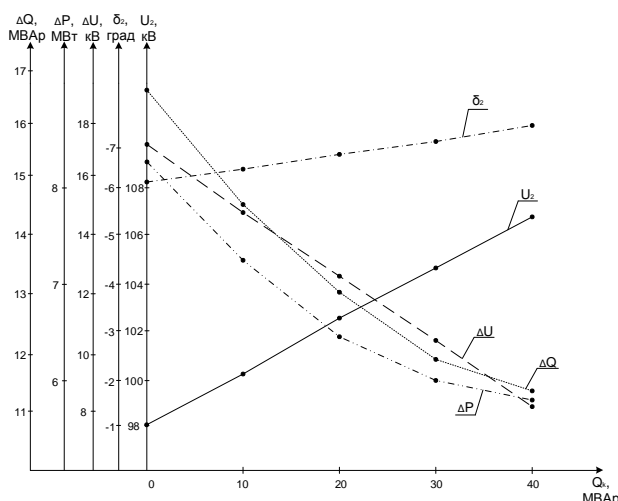


Рис. 3 – Влияние компенсации реактивной мощности у потребителя на параметры режима

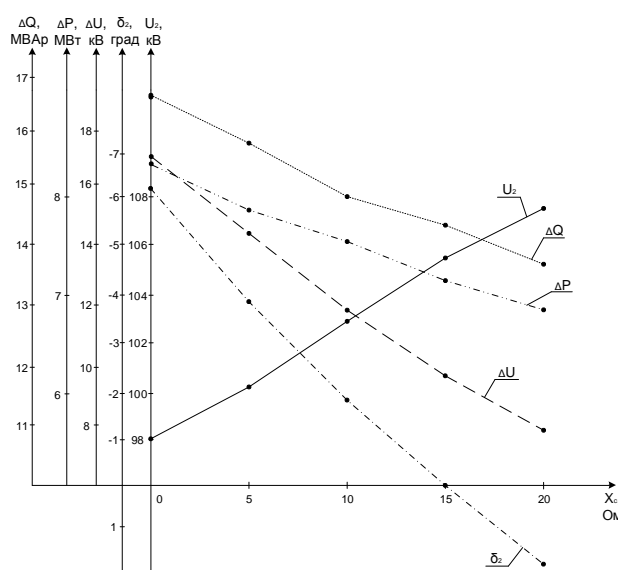


Рис. 4 – Влияние продольной компенсации ЛЭП на параметры режима

В последние годы повысился интерес к вопросам продольной компенсации параметров ЛЭП [3]. По своему влиянию увеличение величины продольной компенсации аналогично процессу увеличения компенсации реактивной мощности у потребителя. Отличие состоит во влиянии на угол δ_2 . Функциональные зависимости параметров режимов от величины продольной компенсации приведены на рис. 4.

Выводы. На основании расчетов установившихся режимов распределительной электрической сети по схеме глубокого ввода получены функциональные зависимости влияния на параметры режима суточной неравномерности электрической нагрузки, величины продольной компенсации и компенсации реактивной мощности у потребителя. Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности и качества электроснабжения потребителей электроэнергии при оперативно-технологическом управлении режимами электрических сетей.

Список литературы

1. Электрические системы. Электрические сети / Под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. – М.: Высшая школа, 1998.
2. Веприк Ю.Н., Бондаренко В.Е., Олейник Е.М. Математическое моделирование и диагностика режимов электрических систем. Харьков: 1997. – 194с.
3. J. Dixon et al., Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review, Proc. IEEE, 93:2144–2164, 2005 DOI:10.1109/JPROC.2005.859937

References (transliterated)

1. Elektricheskie sistemy. Elektricheskie seti. Pod red. V.A. Venikova, V.A. Stroeve. Moscow: Vysshaja shkola, 1998.
2. Veprik Ju.N., Bondarenko V.E., Olejnik E.M. Matematicheskoe modelirovanie i diagnostika rezhimov elektricheskikh sistem. Kharkov: 1997. 194 p.
3. J. Dixon et al., Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review, Proc. IEEE, 93:2144–2164, 2005 DOI:10.1109/JPROC.2005.859937.

Поступила (received) 14.09.16

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження робочих режимів систем електропостачання за схемою глибокого введення / I. В. Хоменко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 58-61. Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-3944.

Исследование рабочих режимов систем электроснабжения по схеме глубокого ввода / И. В. Хоменко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 58-61. Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-3944.

Study workers regimes of electric power scheme in deeply Input / I. V. Khomenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No 32 (1204). – P. 58-61. Bibliography: 3. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Хоменко Ігор Васильович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри "Передавання електричної енергії"; тел.: (067) 572-49-70; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Хоменко Игорь Васильевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры "Передачи электрической энергии"; тел.: (067) 572-49-70; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Khomenko Igor Vasilyevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Transmission of electricity"; tel.: (067) 572-49-70; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.