

11.2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 6 КВ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ ПРЕДПРИЯТИЙ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Васильев И.Е., д.т.н., профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ЭПП СКГМИ (ГТУ);

Клюев Р.В., к.т.н., зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ЭПП СКГМИ (ГТУ);

Котова О.А., старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ЭПП СКГМИ (ГТУ);

Васильев Е.И., к.т.н., кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» МЭИ (ТУ)

На основе системного подхода в статье теоретически обоснована и разработана комплексная методика, математические модели, алгоритм и программа расчета критерия оптимальности k_p статической устойчивости работы блока «батарея статических конденсаторов – асинхронный двигатель (БСК-АД)» в системе электроснабжения (СЭС) предприятия 6 кВ с высшими гармоническими составляющими (ВГ) нелинейных нагрузок (НН).

Разработанная методика позволяет оценить влияние ВГ на устойчивость работы блока «БСК-АД» в реальной СЭС 6 кВ открытых акционерных обществ (ОАО) «Электроцинк» и «Победит». Расчеты выполнены с использованием математической среды MathCad.

Использование разработанной методики на предприятиях позволяет уменьшить потери электроэнергии в СЭС, существенно повысить надежность и финансово-экономическую эффективность работы предприятий в целом.

Исследования проводились в рамках научного направления работы кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» СКГМИ (ГТУ) «Повышение эффективности использования электроэнергии в различных отраслях промышленности».

В соответствии с Указом Президента РФ «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ и перечня критических технологий РФ» от 9 июля 2011 г., в котором одним из приоритетных направлений является «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», во всем промышленном комплексе Российской Федерации должны произойти серьезные изменения, связанные с модернизацией устаревшего оборудования и переходом на более эффективные технологии производства продукции, и, в первую очередь, связанные с повышением эффективности использования электроэнергии. Поэтому исследование и решение задач в этом направлении, представляют особую актуальность и значимость.

В течение последних лет на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» СКГМИ (ГТУ) и МЭИ (ТУ) проводятся комплексные исследования параметров электропотребления (энергоаудит) крупнейших предприятий цветной металлургии Республики Северная Осетия – Алания (РСО – Алания) – Открытого акционерного общества (ОАО) «Электроцинк» (производство цинка), ОАО «Победит» (производство твердых сплавов). По результатам энергоаудита был сформирован кластер задач, решение которых направлено на энергосбережение и повышение эффективности и надежности работы оборудования.

Одной из важнейших задач является исследование устойчивости работы блока «БСК (батарея статических конденсаторов) – АД (асинхронный двигатель)» в системе электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий напряжением 6 кВ с нелинейной нагрузкой (НН). На предприятиях цветной металлургии НН составляет до 70% общей нагрузки и является источником высших гармонических (ВГ) составляющих токов и напряжений.

Разработанная авторами методика комплексного расчета режимов работы СЭС впервые позволяет оценить влияние ВГ на устойчивость (надежность) работы блока «БСК-АД». Расчет проводится по алгоритму для реального блока «БСК-АД» в СЭС 6 кВ ОАО «Электроцинк», ОАО «Победит» с использованием математической среды MathCad.

Конечной целью расчета является определение коэффициента оптимальности k_p , характеризующего устойчивость работы блока «БСК-АД» при ограничении $k_p \geq k_{pmin}$, $k_{pmin} \geq 20\%$ [1]. Методикой предусмотрен расчет двух режимов работы блока «БСК-АД»:

- режим I. БСК – отключена;
- режим II. БСК – включена.

По результатам экспериментального исследования в точке общего присоединения (ТОП) СЭС – блок «БСК-АД» установлено наличие ВГ с частотами $n = 11, 13, 17$ [2, 3, 4, 5], технические данные БСК и АД:

- номинальная активная мощность АД: $P_n = 2,5 \text{ МВт}$;
- номинальное напряжение: $U_n = 6 \text{ кВ}$;
- номинальное скольжение: $s_n = 0,066$;
- коэффициент мощности АД: $\cos\phi_1 = 0,85$;
- мощность БСК: $Q_c = 0,63 \text{ квар}$;
- номинальное напряжение БСК: $U_{н.бск} = 3,637 \text{ кВ}$.

Расчетные значения внешних сопротивлений СЭС-ТОП на первой $n = 1$ (основной гармонике):

- $R_{вн(n)} = 0,092 \text{ Ом}$;
- $X_{вн(n)} = 0,198 \text{ Ом}$.

Обобщенная схема замещения блока «БСК-АД» в СЭС с ВГ приведена на рис. 1.

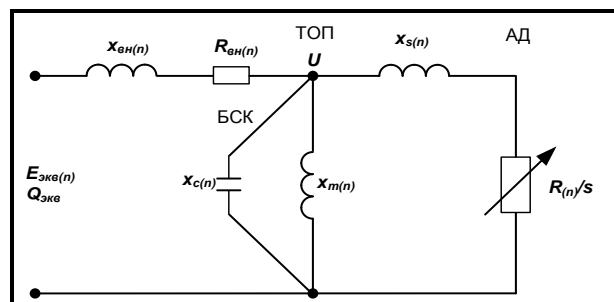


Рис. 1. Обобщенное замещение блока «БСК-АД» в СЭС с ВГ

На рис. 1 приняты следующие обозначения:
 n – порядковый номер высшей гармоники (ВГ) в СЭС, определяет параметры СЭС и АД на соответствующей гармонике;

$X_{вн(n)}$ – индуктивное внешнее сопротивление системы электроснабжения (СЭС) относительно точки общего присоединения (ТОП);

$R_{вн(n)}$ – активное внешнее сопротивление СЭС относительно ТОП;

$X_{с(n)}$ – сопротивление рассеяния ротора АД;

$X_{с(n)}$ – емкостное сопротивление батареи статических конденсаторов (БСК);

$x_{m(n)}$ – сопротивление цепи намагничивания АД;

$R_{(n)}/s$ – активное сопротивление ротора АД;

s – скольжение АД;

U – напряжение на выводах АД;

$E_{эвк(n)}$ – эквивалентная ЭДС источника питания СЭС;

$Q_{эвк}$ – эквивалентная полная реактивная мощность от источника питания СЭС.

Расчет ведется в относительных базисных единицах при базисных значениях мощности и напряжения:

• $S_б = P_H = 2,5 \text{ МВА}$;

• $U_б = U_H = 6 \text{ кВ}$.

Значения напряжения и мощности, приведенные к базисным величинам:

$$U = \frac{U_H}{U_б} = 1;$$

$$z_{вн} = \sqrt{R_{вн}^2 + x_{вн}^2} = 0,01516;$$

$$Q_c = \frac{Q}{S_б} = 0,252.$$

Активная мощность АД (P_0) при коэффициентах загрузки АД ($k_{зг} = 0,1 \div 1$): $P_0 = k_{зг} * P_H$.

Дискретные значения напряжений: $U = 0,1 \div 1$.

Результирующие значения активного и реактивного сопротивления: $R_{рез} = 0,092 \text{ Ом}$; $x_{рез} = 0,198 \text{ Ом}$. Значения внешних сопротивлений на первой (основной) гармонической составляющей, приведенные к базисным величинам:

$$R_{вн} = R_{рез} \frac{S_б}{U_H^2} = 0,00639;$$

$$x_{вн} = x_{рез} \frac{S_б}{U_H^2} = 0,01375.$$

Полное сопротивление СЭС относительно ТОП:

$$z_{вн} = \sqrt{R_{вн}^2 + x_{вн}^2} = 0,01516.$$

Индуктивное, активное, емкостное сопротивления элементов системы при ВГ (n):

$$x_{(n)} = n * x_{(1)};$$

$$R_{(n)} = \sqrt{n} * R_{(1)};$$

$$x_{c(n)} = n^{-1} * x_{c(1)},$$

где индекс (1) обозначает сопротивление элемента на первой (основной) гармонике.

Значение мощности БСК, приведенное к базисной величине:

$$Q_c = \frac{Q}{S_б} = 0,252.$$

По результатам экспериментального исследования ВГ в СЭС 6 кВ завода «Электроцинк» в ТОП блока «БСК-АД» зарегистрированы ВГ (n): n_{11} , n_{13} , n_{17} [4, 5]. Значения напряжений при ВГ $U_{(n)}$ изменялось в широких пределах в зависимости от числа и мощности вентиляльных преобразователей типа ВК типа ПКВВ-6 300/850 (номинальный выпрямленный ток 6 300 А, номинальная мощность 5355 кВт, напряжение вы-

прявленного тока 850 В, $\eta = 98,5\%$, $\cos\varphi = 0,95$), параллельно работающих по 12-пульсной системе.

Расчет критерия оптимальности k_p проводится по следующему алгоритму:

1. Сопротивление рассеяния АД при значении $U = 1$:

$$x_s = \frac{U^2}{2m_m}, \quad (1)$$

где

m_m – кратность максимального момента (мощности);

$m_m = 2,5$.

$x_s = 0,2$.

На рис. 2 приведен график изменения x_s в зависимости от U (1).

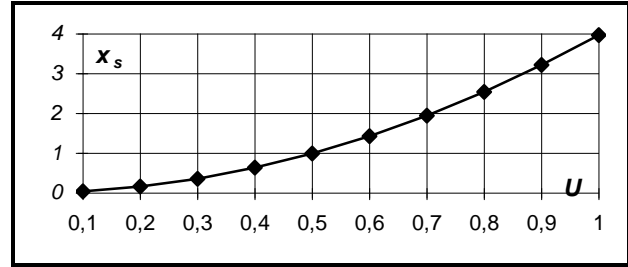


Рис. 2. График изменения $x_s = f(U)$

2. Сопротивления системы на ВГ:

$$x_{вн(n)} = n * x_{вн};$$

$$R_{вн(n)} = \sqrt{n} * R_{вн};$$

$$z_{вн(n)} = \sqrt{R_{вн(n)}^2 + x_{вн(n)}^2};$$

$$z_{рез} = \sqrt{\sum_{i=1}^{17} R_{вн(n)}^2 + \sum_{i=1}^{17} x_{вн(n)}^2}. \quad (2)$$

$x_{вн11} = 0,151$;

$x_{вн13} = 0,179$;

$x_{вн17} = 0,234$;

$R_{вн11} = 0,0212$;

$R_{вн13} = 0,023$;

$R_{вн17} = 0,026$;

$z_{вн11} = 0,153$;

$z_{вн13} = 0,18$;

$z_{вн17} = 0,235$;

$z_{рез} = 0,583$.

3. Сопротивления АД на ВГ:

$$x_{s(n)} = n * \bar{\sigma}_s(1);$$

$$R_{(n)} = \sqrt{n} * R_{(1)}. \quad (3)$$

$x_{s11} = 2,2$;

$x_{s13} = 2,6$;

$x_{s17} = 3,4$;

$R_{11} = 0,021$;

$R_{13} = 0,0228$;

$R_{17} = 0,0261$.

4. Сопротивления намагничивания АД на ВГ:

$$x_{m(n)} = n * \frac{1}{\sin\varphi_i - \frac{1 - \sqrt{1 - 4x_{s(n)}^2 \cos^2\varphi_i}}{2x_{s(n)}}}, \quad (4)$$

где

φ_1 – угол при отключенной и включенной БСК;

$\varphi_1 = 31,79^\circ$, $\cos\varphi_1 = 0,85$ (БСК отключена);

$\varphi_2 = 21,5^\circ$, $\cos\varphi_2 = 0,93$ (БСК включена).

Включение БСК мощностью $Q_c = 630$ квар, приводит

к повышению $\cos\varphi_1 = 0,85$ до значения $\cos\varphi_2 = 0,93$.

Зависимости $x_m = f(x_s)$ (4) при отключенной БСК ($x_{1m(n)}$) и при включенной БСК ($x_{2m(n)}$) представлены на рис. 3, 4. При $x_{s(n)}$ значения $x_{1m(n)}$ и $x_{2m(n)}$ составили:

- $x_{1m1} = 2,646$;
- $x_{1m11} = 29,11$;
- $x_{1m13} = 34,4$;
- $x_{1m17} = 44,99$;
- $x_{2m1} = 5,35$;
- $x_{2m11} = 58,85$;
- $x_{2m13} = 69,55$;
- $x_{2m17} = 90,95$.

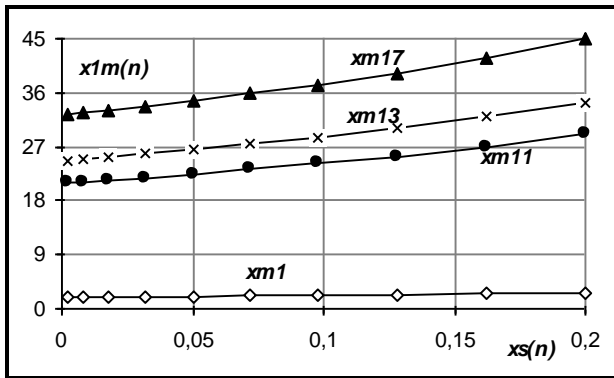


Рис. 3. Зависимости $x_{1m(n)} = f(x_s)$ при отключенной БСК

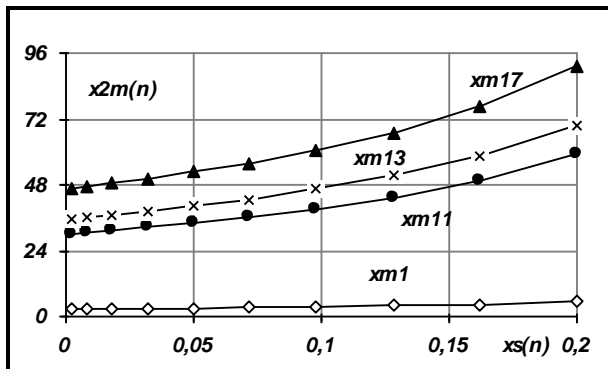


Рис. 4. Зависимости $x_{2m(n)} = f(x_s)$ при включенной БСК

На рис. 3, 4 (и на последующих) приняты следующие обозначения графиков:

- ◇ первая (основная) гармоническая составляющая $n = 1$;
- гармоника n_{11} ;
- × гармоника n_{13} ;
- ▲ гармоника n_{17} .

5. Реактивное сопротивление и мощность БСК на ВГ:

$$x_{c(n)} = \frac{U^2}{n \cdot Q_c}; \quad (5)$$

$$Q_{c(n)} = \frac{U^2}{x_{c(n)}}. \quad (6)$$

Зависимости $x_{c(n)} = f(U)$ (5), $Q_{c(n)} = f(U)$ (6) для ВГ приведены на рис. 5, 6.

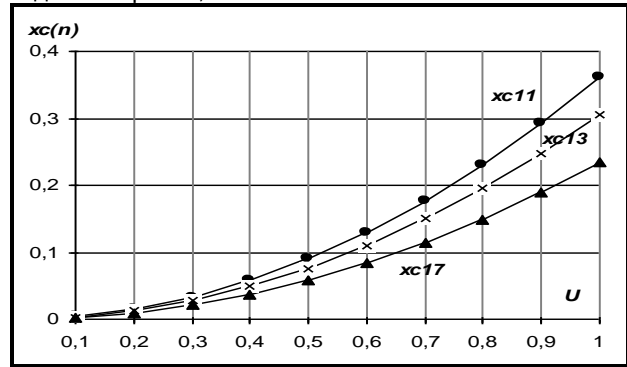


Рис. 5. Зависимости $x_{c(n)} = f(U)$

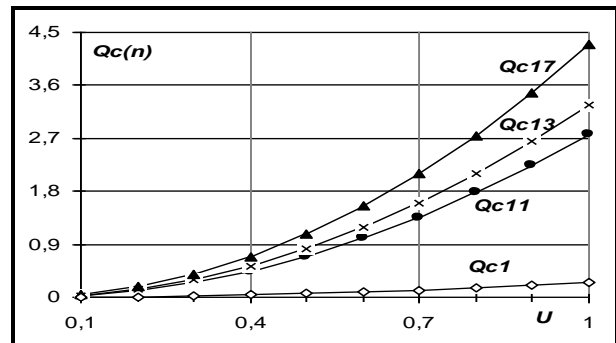


Рис. 6. Зависимости $Q_{c(n)} = f(U)$

6. Эквивалентное сопротивление на ВГ:

- при отключенной БСК:

$$z_{1экв(n)} = \sqrt{\left(\frac{x_{1m(n)} \cdot x_{вн(n)}}{x_{1m(n)} + x_{вн(n)}} \right)^2 + R_{вн(n)}^2}; \quad (7)$$

- при включенной БСК:

$$z_{2экв(n)} = \sqrt{\left(\frac{1}{\frac{1}{x_{вн(n)}} + \frac{1}{x_{m(n)}} - \frac{1}{x_{c(n)}}} \right)^2 + R_{вн(n)}^2}. \quad (8)$$

Зависимости $z_{1экв(n)} = f(U)$ (7), $z_{2экв(n)} = f(U)$ (8) для ВГ приведены на рис. 7, 8.

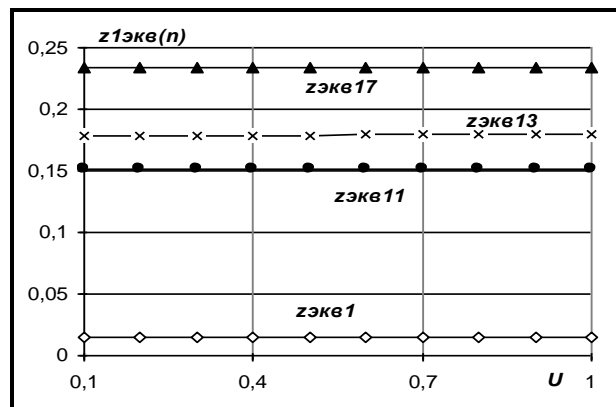


Рис. 7. Зависимости $z_{1экв(n)} = f(U)$ при отключенной БСК

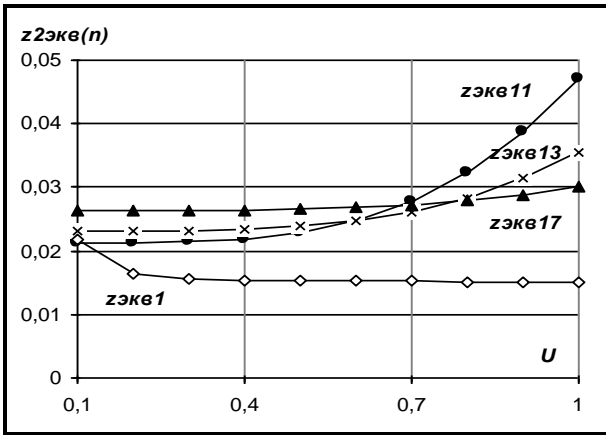


Рис. 8. Зависимости $z_{2эке(n)}=f(U)$ при включенной БСК

7. Реактивная мощность намагничивания АД на ВГ:

$$Q_{m(n)} = \frac{U^2}{X_{m(n)}} \quad (9)$$

При

- $X_{1m1} = 2,646;$
- $X_{1m11} = 29,11;$
- $X_{1m13} = 34,4;$
- $X_{1m17} = 44,99;$
- $X_{2m1} = 5,35;$
- $X_{2m11} = 58,85;$
- $X_{2m13} = 69,55;$
- $X_{2m17} = 90,95$

и

$U = 1$ значения $Q_{1m(n)}, Q_{2m(n)}$ составили:

- $Q_{1m1} = 0,187;$
- $Q_{1m11} = 0,017;$
- $Q_{1m13} = 0,014;$
- $Q_{1m17} = 0,011;$
- $Q_{2m1} = 0,378;$
- $Q_{2m11} = 0,034;$
- $Q_{2m13} = 0,029;$
- $Q_{2m17} = 0,022.$

Зависимости $Q_{1m(n)}=f(U), Q_{2m(n)}=f(U)$ (9) (значение $X_{m(n)}$ определяется при $X_{s(n)}$) соответственно при отключенной и включенной БСК приведены на рис. 9, 10.

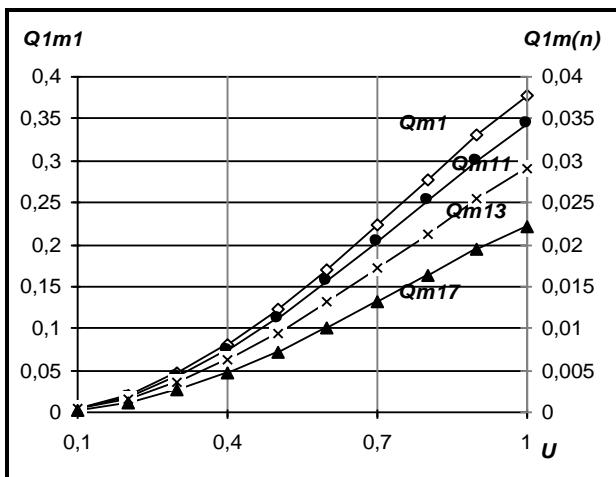


Рис. 9. Зависимости $Q_{1m(n)}=f(U)$ при отключенной БСК

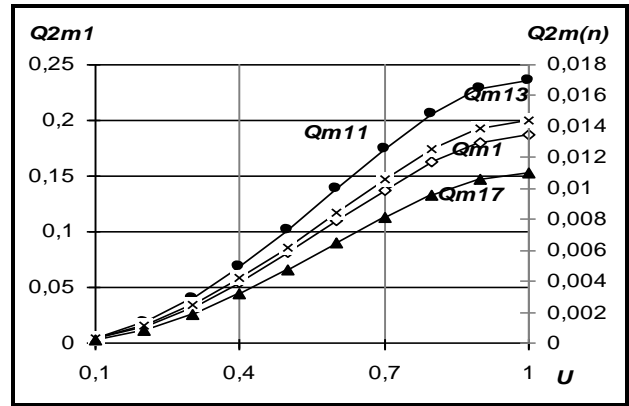


Рис. 10. Зависимости $Q_{2m(n)}=f(U)$ при включенной БСК

8. Реактивная мощность рассеяния АД на ВГ:

$$Q_{s(n)} = k_{32} * P_n * \frac{X_s * s}{R(n)} \quad (10)$$

Зависимости $Q_{s(n)}=f(U)$ ($k_{32} = 1, s = var$), (10) приведены на рис. 11.

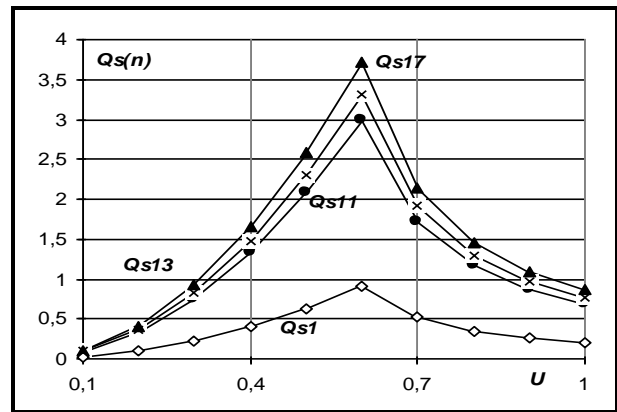


Рис. 11. Зависимости $Q_{s(n)}=f(U)$ ($k_{32} = 1, s = var$)

9. Реактивная мощность АД на ВГ:

$$Q_{ad(n)} = Q_{m(n)} + Q_{s(n)} \quad (11)$$

Зависимости $Q_{1ad(n)}=f(U), Q_{2ad(n)}=f(U)$ ($k_{32} = 1, s = var$); (11) при отключенной БСК (индекс 1) и включенной БСК (индекс 2) приведены на рис. 12-13.

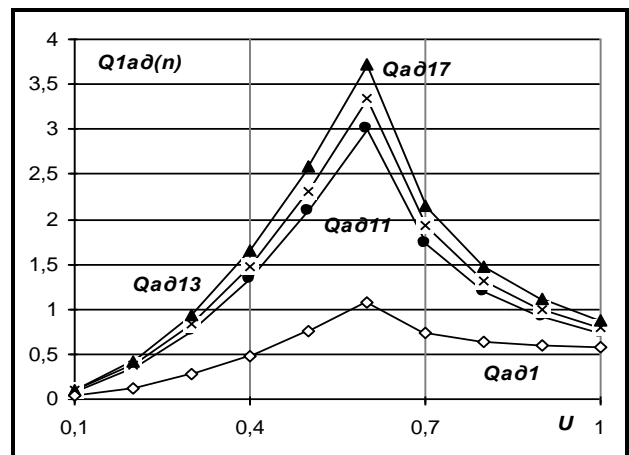


Рис. 12. Зависимости $Q_{1ad(n)}=f(U)$ ($k_{32} = 1, s = var$)

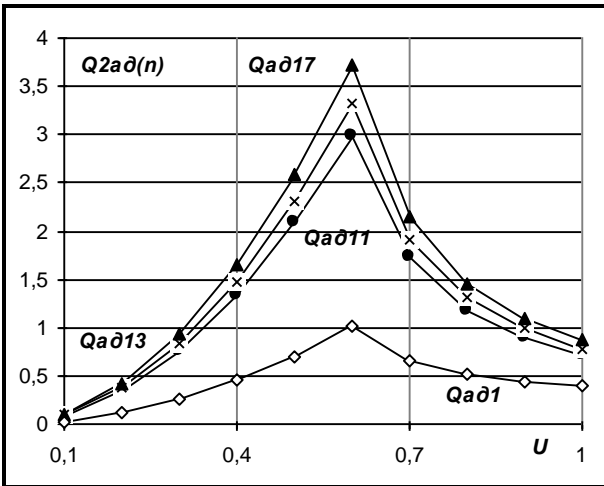


Рис. 13. Зависимости $Q_{2aδ(n)} = f(U)$ ($k_{32} = 1, s = var$)

Зависимости $Q_{1m(n)} = f(k_{32})$, $Q_{2m(n)} = f(k_{32})$ (значение $U = 1$) соответственно при отключенной и включенной БСК приведены на рис. 14, 15.

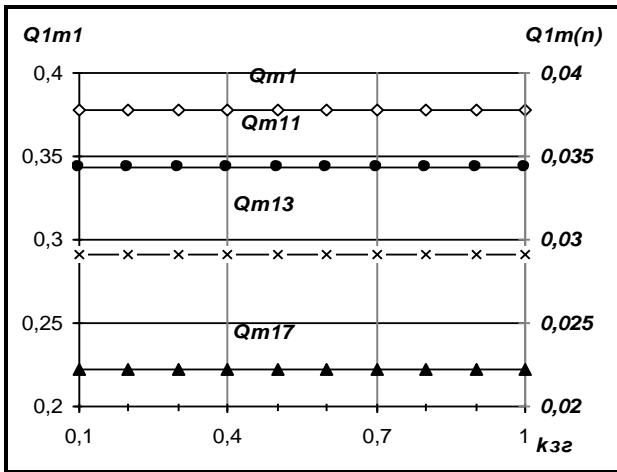


Рис. 14. Зависимости $Q_{1m(n)} = f(k_{32})$ при отключенной БСК

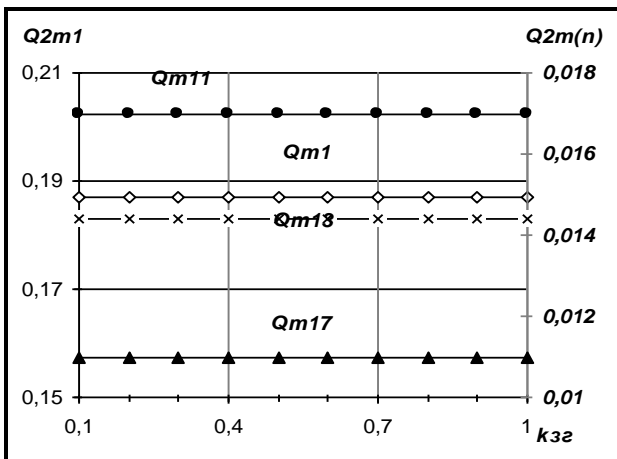


Рис. 15. Зависимости $Q_{2m(n)} = f(k_{32})$ при включенной БСК

Зависимости $Q_{s(n)} = f(k_{32})$ ($k_{32} = 0,1 \div 1, s = S_H$) (10) приведены на рис. 16.

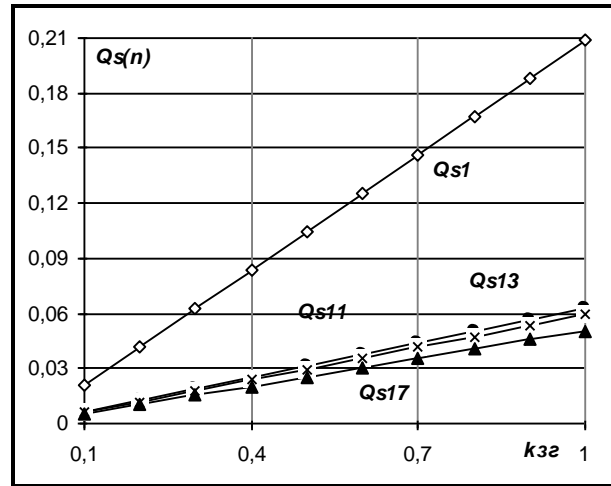


Рис. 16. Зависимости $Q_{s(n)} = f(U)$ ($k_{32} = 0,1 \div 1, s = S_H$)

Зависимости $Q_{1aδ(n)} = f(k_{32})$, $Q_{2aδ(n)} = f(k_{32})$ ($k_{32} = 0,1 \div 1, s = S_H$) (11) при отключенной БСК (индекс 1) и включенной БСК (индекс 2) приведены на рис. 17-18.

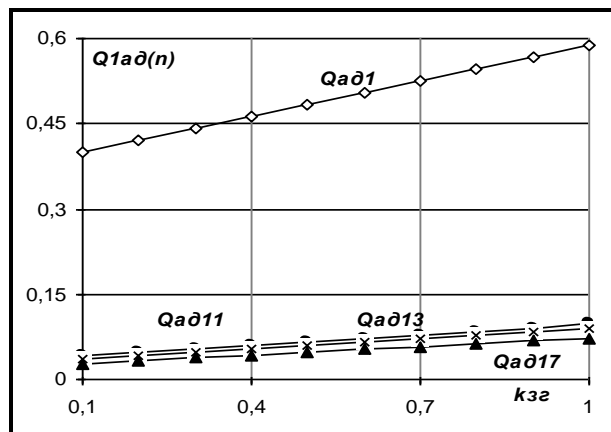


Рис. 17. Зависимости $Q_{1aδ(n)} = f(U)$ ($k_{32} = 0,1 \div 1, s = S_H$)

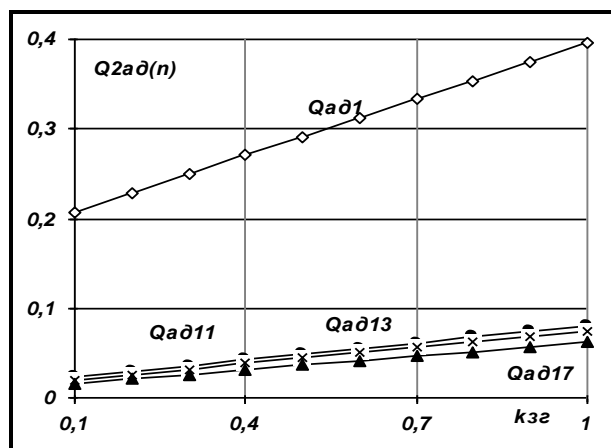


Рис. 18. Зависимости $Q_{2aδ(n)} = f(U)$ ($k_{32} = 0,1 \div 1, s = S_H$)

10. Реактивная мощность от системы при включенной БСК на ВГ:

$$Q_{H(n)} = Q_{ad(n)} - Q_{c(n)} \quad (12)$$

Зависимости $Q_{H(n)} = f(U)$ (12), приведены на рис. 19. При отключенной БСК: $Q_{H(n)} = Q_{1aδ(n)}$ (см. рис. 12).

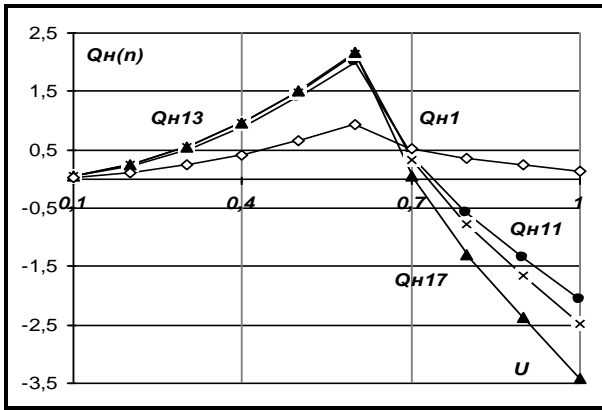


Рис. 19. Зависимости $Q_{n(n)}=f(U)$

11. Потери реактивной мощности в СЭС на ВГ:

- при отключенной БСК:

$$DQ_{1(n)} = \frac{P_0^2 + Q_{ад(n)}^2}{U^2} * z_{1эке(n)}; \quad (13)$$

- при включенной БСК:

$$DQ_{2(n)} = \frac{P_0^2 + (Q_{ад(n)} - Q_{с(n)})^2}{U^2} * z_{2эке(n)}; \quad (14)$$

На рис. 20, 21 приведены зависимости $DQ_{1(n)} = f(U)$ (13), $DQ_{2(n)} = f(U)$ (14).

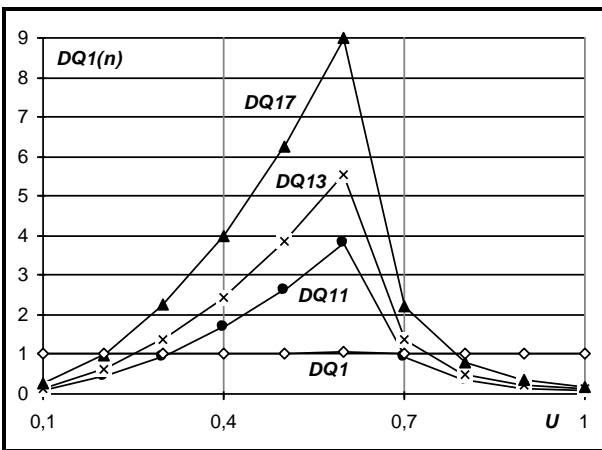


Рис. 20. Зависимости $DQ_{1(n)}=f(U)$

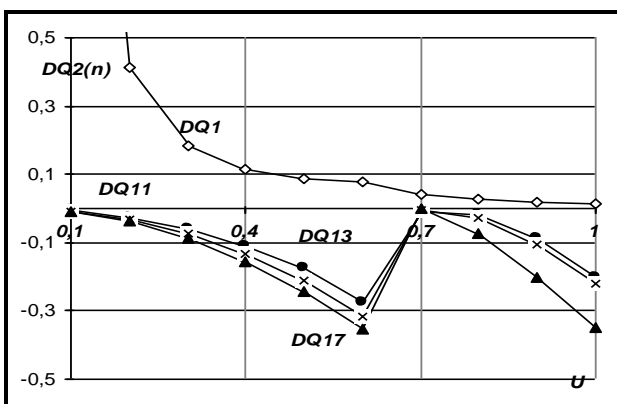


Рис. 21. Зависимости $DQ_{2(n)}=f(U)$

12. Эквивалентная реактивная мощность СЭС $Q_{эке(n)}$ на ВГ:

- при отключенной БСК:

$$Q_{1эке(n)} = Q_{1ад(n)} + \Delta Q_{1(n)}; \quad (15)$$

- при включенной БСК:

$$Q_{2эке(n)} = Q_{2ад(n)} - Q_{с(n)} + \Delta Q_{2(n)}; \quad (16)$$

13. Результирующая эквивалентная реактивная мощность СЭС $Q_{рез.эке(n)}$ на ВГ:

$$Q_{1(2)рез.эке(n)} = \sum_{v=1}^{17} Q_{1(2)эке(n)}; \quad (17)$$

Зависимости $Q_{1эке(n)} = f(U)$ (15), $Q_{2эке(n)} = f(U)$ (16) приведены на рис. 22, 23.

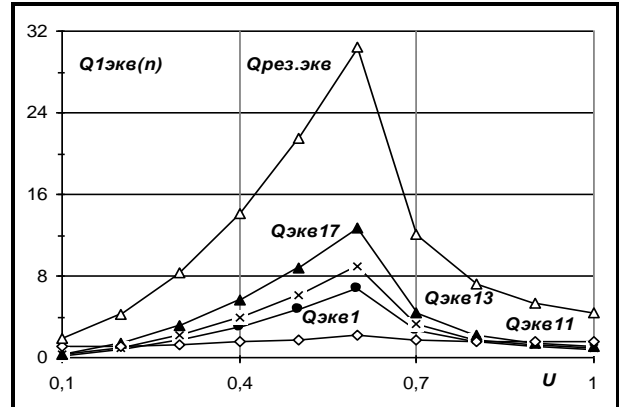


Рис. 22. Зависимости $Q_{1эке(n)}=f(U)$

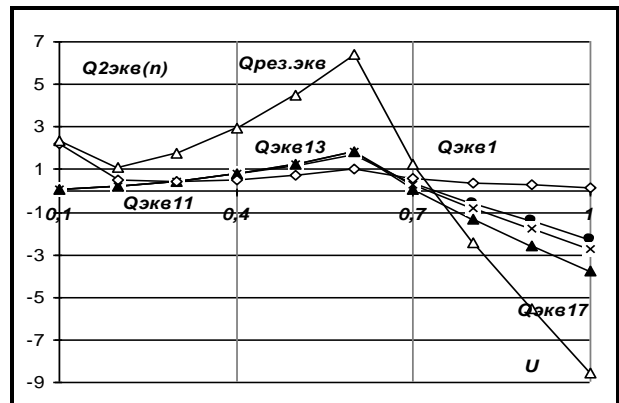


Рис. 23. Зависимости $Q_{2эке(n)}=f(U)$

14. Эквивалентная ЭДС:

- при отключенной БСК на основной гармонике:

$$E_{1эке(1)} = \sqrt{\left(U + \frac{Q_{1ад(1)} * z_{1эке(1)}}{U} \right)^2 + \left(\frac{P_0 * z_{1эке(1)}}{U} \right)^2}; \quad (18)$$

- на ВГ:

$$E_{1эке(n)} = \sqrt{\left(\frac{Q_{1ад(n)} * z_{1эке(n)}}{U} \right)^2}; \quad (19)$$

- при включенной БСК на основной гармонике:

$$E_{2экв(1)} = \sqrt{\left(U + \frac{(Q_{2ад(1)} - Q_{с(1)} + \Delta Q_{2(1)}) * z_{2экв(1)}}{U} \right)^2 + \left(\frac{P_0 * z_{2экв(1)}}{U} \right)^2} \quad (20)$$

• на ВГ:

$$E_{2экв(n)} = \sqrt{\left(\frac{(Q_{2ад(n)} - Q_{с(n)} + \Delta Q_{2(n)}) * z_{2экв(n)}}{U} \right)^2} \quad (21)$$

15. Результирующая эквивалентная ЭДС на ВГ:

$$E_{рез.экв(n)} = \sqrt{\left(\sum_{v=1}^{17} E_{экв(n)} \right)^2} \quad (22)$$

Зависимости $E_{1экв(n)}=f(U)$ (18, 19, 22), $E_{2экв(n)}=f(U)$ (20, 21, 22) приведены на рис. 24, 25. При различных коэффициентах загрузки ($k_{зг} = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$) зависимости $E_{1экв(n)}=f(U)$, $E_{2экв(n)}=f(U)$ приведены на рис. 26, 27.

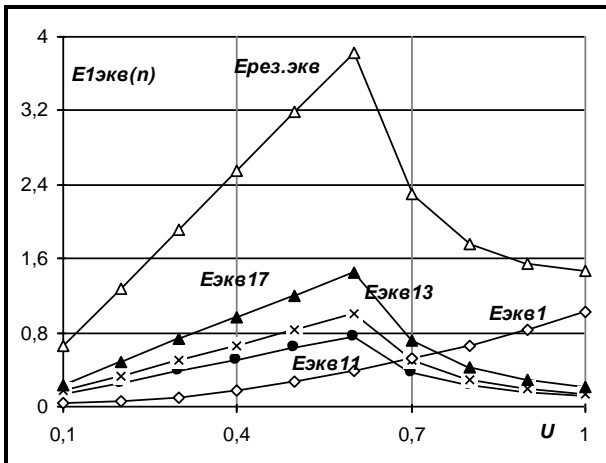


Рис. 24. Зависимости $E_{1экв(n)}=f(U)$

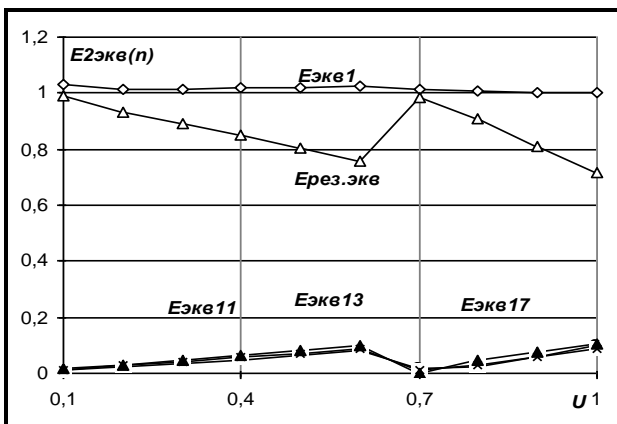


Рис. 25. Зависимости $E_{2экв(n)}=f(U)$

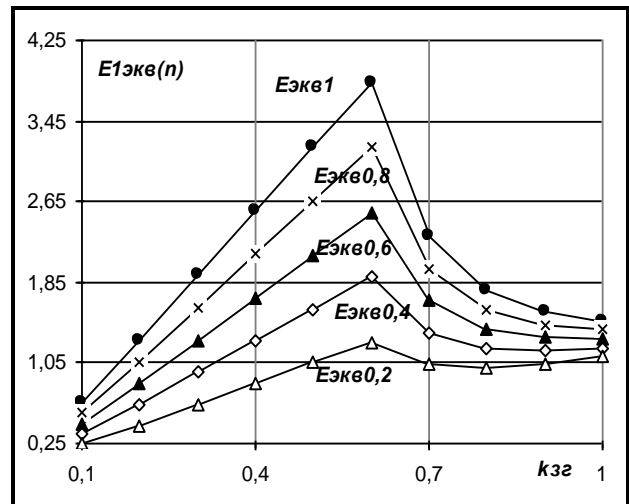


Рис. 26. Зависимости $E_{1экв(n)}=f(k_{зг})$

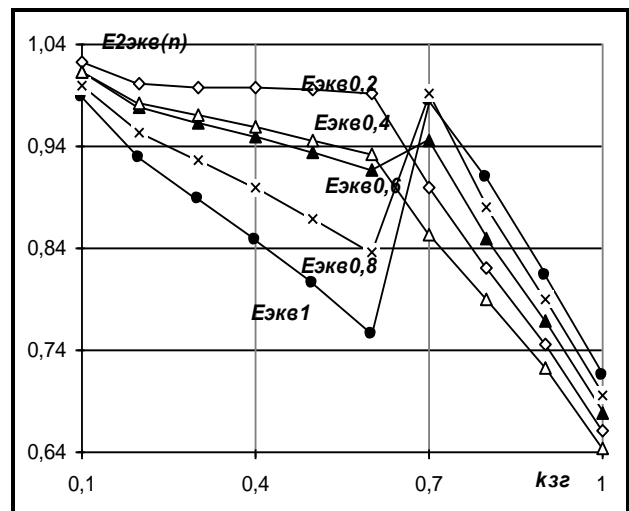


Рис. 27. Зависимости $E_{2экв(n)}=f(k_{зг})$

На рис. 28, 29 приведены зависимости $Q_{1рез.экв(n)} = f(E_{1рез.экв(n)})$, $Q_{2рез.экв(n)} = f(E_{2рез.экв(n)})$.

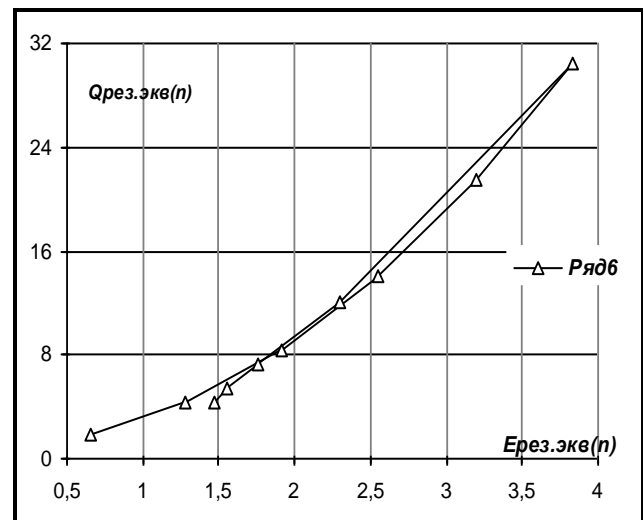


Рис. 28. $Q_{1рез.экв(n)} = f(E_{1рез.экв(n)})$

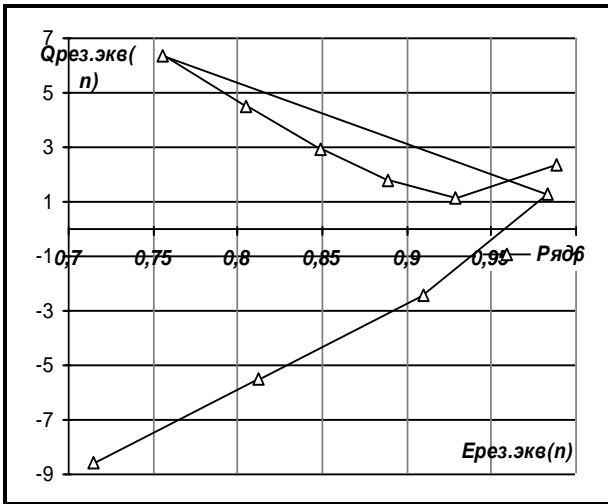


Рис. 29. $Q_{рез.эвк(n)} = f(E_{рез.эвк(n)})$

16. Критическая ЭДС $E_{кр}$:

- при отключенной БСК:

$$E_{1кр(n)} = \sqrt{2 * k_{зэ} * P_n * \left(x_{s(n)} + \sum_{n=1}^{17} \left(\frac{x_{1m(n)} * x_{вн(n)}}{x_{1m(n)} + x_{вн(n)}} \right) \right)^2 + R_{вн(n)}^2} \quad (23)$$

- при включенной БСК:

$$E_{2кр(n)} = \sqrt{2 * k_{зэ} * P_n * \left(x_{s(n)} + \sum_{n=1}^{17} \left(\frac{1}{\frac{1}{x_{вн(n)}} + \frac{1}{x_{п(n)}} - \frac{1}{x_{с(n)}}} \right) \right)^2 + R_{вн(n)}^2} \quad (24)$$

На рис. 30, 31 приведены зависимости $E_{1кр(n)} = f(U)$, $E_{2кр(n)} = f(U)$ при различных коэффициентах загрузки ($k_{зэ} = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$).

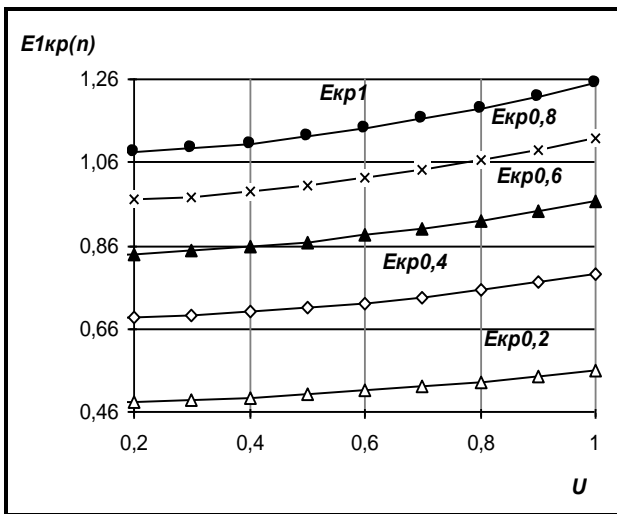


Рис. 30. Зависимости $E_{1кр(n)} = f(U)$

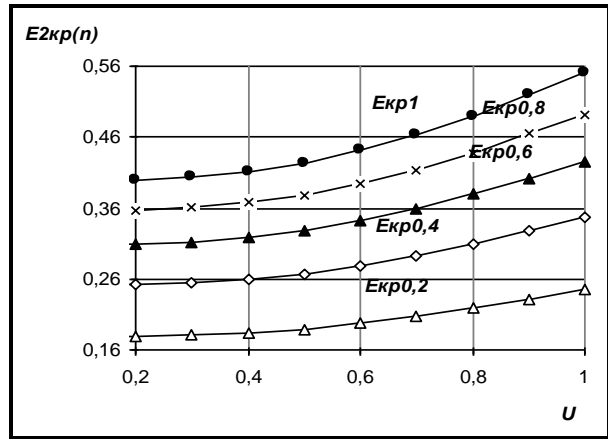


Рис. 31. Зависимости $E_{2кр(n)} = f(U)$

17. Расчетное значение критерия оптимальности k_p :

$$k_p(n) = \frac{E_{эвк.рез(n)} - E_{кр(n)}}{E_{эвк.рез(n)}} * 100 \geq 20\% \quad (25)$$

Зависимости $k_{p1(n)} = f(U)$, $k_{p2(n)} = f(U)$ (25), при $k_{зэ} = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$, приведены на рис. 32, 33. Значение k_{p1} определено при $E_{1эвк.рез(n)}$ ($U_{кр1} = 0,6$), рис. 24; k_{p2} определено при $E_{2эвк.рез(n)}$ ($U_{кр2} = 0,7$), рис. 25.

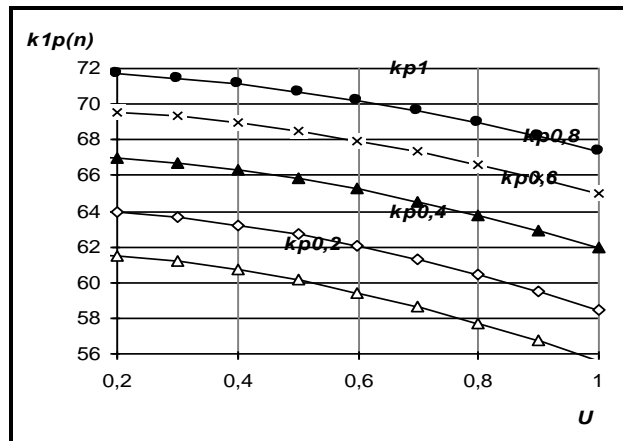


Рис. 32. Зависимость $k_{p2} = f(U)$

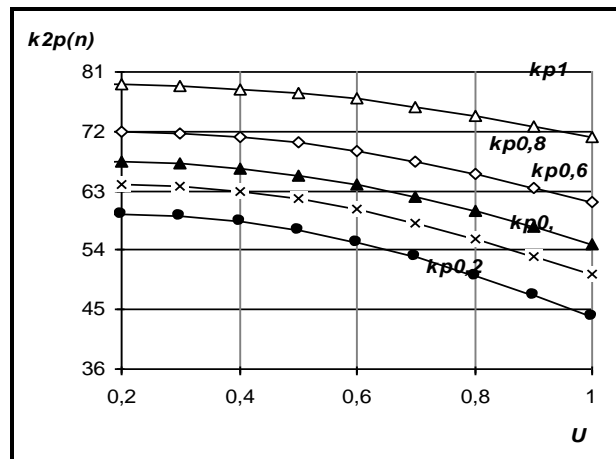


Рис. 33. Зависимость $k_{p2} = f(U)$

Минимальное значение $k_{pmin} = 20\%$ обеспечивается при всех $k_{зэ}$.

ВЫВОДЫ

Анализ расчетных значений параметров СЭС 6 кВ с ВГ и реального блока «БСК-АД» позволяет сделать следующие выводы:

Впервые проведен углубленный расчет и анализ устойчивости работы СЭС 6 кВ блока «БСК-АД» действующего предприятия ОАО «Электроцинк», результаты расчета наглядно представлены в виде графиков зависимости параметров СЭС, БСК, АД в функции двух независимых переменных $U, K_{за}$.

С точки зрения устойчивости работы блока «БСК-АД» по обоим рассматриваемым режимам (БСК – откл./вкл.) значение коэффициента оптимальности $K_{р(т)} > 20\%$ (рис. 32, 33), что указывает на незначительное влияние ВГ на устойчивость работы блока «БСК-АД», которым можно пренебречь.

Проверка устойчивости работы блока «БСК-АД» (в режимах I-II) по критерию $\frac{\partial E_{эке}}{\partial U} = 0$ (рис. 24, 25), где $U_{кр1} = 0,6, U_{кр2} = 0,7$ и

по критерию $\frac{\partial Q_{эке}}{\partial E_{эке}} = -\infty$ (рис. 28, 29) показала, что устойчи-

вость работы блока обеспечивается в обоих режимах I, II при $U > U_{кр}$, определяющих значение $\frac{\partial Q_{эке}}{\partial E_{эке}} > 0$.

В режиме II (БСК – включена):

- повышается коэффициент мощности ($\cos \varphi$) от 0,85 до 0,93, что снижает потери в СЭС от перетока реактивной мощности, практически, до $Q_{н(т)} = 0$ (рис. 19);
- существует опасность возникновения резонанса напряжения на n -й гармонике в ТОП СЭС – блок «БСК-АД», и полного разрушения БСК. Это может привести к аварийному отключению АД газодувки, как потребителя 1-й категории.

Важной и актуальной задачей дальнейшего исследования влияния ВГ на устойчивость работы блока «БСК-АД» является разработка методики по определению критерия оптимальности $K_{р(т)}$ – критерия исключения резонанса напряжения в ТОП при ограничениях: $X_{вн(т)} \neq X_{с(т)}; X_{вн(т)} > 0; X_{с(т)} < 0; R_{вн(т)} > 0; Q_{бск.тах} \leq 1,3Q_{бск.ном}$.

Для исключения негативного влияния ВГ на работу блока «БСК-АД» рекомендуется перевести, при возможности, питание блока на другой источник питания (секцию шин 6 кВ), где НН и ВГ отсутствуют или установить в ТОП фильтро-компенсирующие ВГ установки.

Литература

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах [Текст] / В.А. Веников. – М. : Высшая школа, 1985.
2. Васильев И.Е. и др. Определение фактического вклада потребителя и системы в несинусоидальность напряжений предприятий цветной металлургии на основе активного эксперимента – включения трансформаторов на параллельную работу [Текст] / И.Е. Васильев, Р.В. Ключев, Е.И. Васильев // Аудит и финансовый анализ. – 2011. – №4. – С. 464-467.
3. Васильев И.Е. и др. Определение фактического вклада потребителя и системы в несинусоидальность напряжения при управлении работой БСК на предприятиях цветной металлургии [Текст] / И.Е. Васильев, Р.В. Ключев, О.А. Котова, Е.И. Васильев // Известия ВУЗов. Сер. Электромеханика. – 2010. – №3. – С. 58-63.
4. Ключев Р.В. Исследование высших гармоник токов и напряжений в системе электроснабжения газодувки [Текст] / Р.В. Ключев // Труды 3-го Междунар. форума «Актуальные проблемы современной науки». Технические науки. Ч. 18. Энергетика. – Самара : Самарск. гос. техн. ун-т, 2007. – С. 14-19.
5. Ключев Р.В. Исследование возможных резонансных режимов в системе электроснабжения промышленных предприятий цветной металлургии [Текст] / Р.В. Ключев, О.А. Котова // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобнов-

ляемые источники энергии : сб. мат-лов Всеросс. студенческой олимпиады, науч.-практ. конф. и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых. – Екатеринбург : Изд-во ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. – С. 139-142.

Ключевые слова

Устойчивость; электроснабжение; промышленные предприятия; асинхронный двигатель; батарея статических конденсаторов; сопротивление; напряжение; критерий оптимальности; высшие гармонические составляющие.

Васильев Игорь Евгеньевич

Ключев Роман Владимирович

Котова Ольга Анатольевна

Васильев Евгений Игоревич

РЕЦЕНЗИЯ

Методика расчета критерия оптимальности устойчивой работы блока «БСК-АД» (батареи статических конденсаторов – асинхронный двигатель) впервые разработана для предприятия цветной металлургии по электролизу цинка. Полученные математические модели зависимостей параметров блока «АД-БСК» в функции двух независимых переменных (напряжения, коэффициента загрузки) позволяют совместить графики реактивных мощностей, эквивалентных и критических ЭДС и представить результаты расчета в наиболее компактной и наглядной форме.

Математический аппарат реализован с помощью средств программного комплекса MathCad и MicroSoft Excel.

Все данные получены с использованием сертифицированных средств измерения, результаты имеют высокую степень воспроизводимости и могут быть использованы в ходе технологического процесса на промышленных предприятиях цветной металлургии Открытого акционерного общества (ОАО) «Победит», ОАО «Электроцинк».

Все выводы, полученные в статье, подтверждаются расчетными данными и строго соответствуют основным положениям статьи. Все иллюстрации соответствуют физическому смыслу исследуемых процессов.

В статье сделаны ссылки на пять литературных источников, в четырех из которых авторами приведены результаты собственных исследований, нашедших свое отражение в статье, что подтверждает значимость научных положений статьи.

Замечаний по статье нет.

В целом статья написана технически грамотным языком, приведенные в ней графики отражают весь спектр расчетов устойчивости работы системы электроснабжения на предприятиях цветной металлургии.

Рецензируемая статья заслуживает положительной оценки, тема предложенная авторами, является актуальной и может быть рекомендована к изданию.

Б.Д. Хасцаев, д.т.н., профессор, декан факультета электронной техники Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета)