

p. 6.7
437

TALLINNA POLÜTEHNILISE
INSTITUUDI TOIMETISED

ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

№ 437

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
И ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ УСТРОЙСТВ
УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СПЕЦИАЛЬНОГО
НАЗНАЧЕНИЯ

Электромеханика

VII

Ep. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

№ 437

1977

УДК 621.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
И ЭЛЕКТРОМАШИНЫХ УСТРОЙСТВ
УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СПЕЦИАЛЬНОГО
НАЗНАЧЕНИЯ

Электромеханика

VII

Таллин 1978

18.179

УДК 62-72

1971

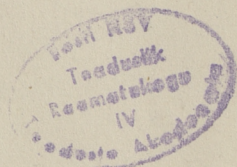
1971

1971

УДК 62-72
УДК 62-72
УДК 62-72

УДК 62-72

IV



1971

УДК 621.313.33

Л.Э.Варик, Г.К.Самолевский

ФОРМУЛЯР РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХФАЗНОГО
АСИНХРОННОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С
АКСИАЛЬНЫМ ПОТОКОМ

Двухфазный асинхронный исполнительный двигатель с аксиальным потоком, конструкция которого описана в [1,2], рассчитывается по исходным данным проектного задания. Расчет двигателя состоит из электромагнитного, теплового и механического расчетов. В данном формуляре не рассматриваются тепловой и механический расчеты.

Расчет исполнительного двигателя с аксиальным потоком проводится в предположении обеспечения кругового поля в режиме пуска.

При проектировании исходными являются:

1. Номинальное напряжение управления U_{YN} .
2. Номинальное напряжение возбуждения U_{BN} .
3. Номинальная мощность на валу P_{2N} .
4. Частота сети f_0 .
5. Синхронная частота вращения n_0 .
6. Электромеханическая постоянная времени T_m .
7. Кратность пускового момента по отношению к номинальному K_m .
8. Число фаз m .
9. Режим работы двигателя.

Предварительный расчет основных геометрических параметров магнитной системы

Для предварительного выбора толщина диска ротора из немагнитного материала (например, Д-16АТ, АЛ) следует исхо-

даны из следующих ориентировочных данных:

при диаметре ротора $D_{р1}$ до 50 мм, толщина диска ротора $\delta_p - 0,3...0,5$ мм,

при $D_{р1}$ от 50 до 100 мм $\delta_p - 0,5...1,0$ мм,

при $D_{р1}$ более 100 мм δ_p принимается более 1,0 мм.

Для асинхронных исполнительных двигателей с дисковым немагнитным ротором, имеющих магнитопровод из электротехнической стали, при частотах вращения до 5000 об/мин можно принять следующие ориентировочные значения:

| | | |
|---|---|--|
| $P_{2н}$ | 1,0...10 | 10...100 |
| $A_{ср}$ (линейная нагрузка на среднем диаметре статора) | 0,02...0,1 (10...15)·10 ³ | 0,1...0,2 (15...25)·10 ³ |
| $B_г$ (амплитуда первой гармоники в воздушном зазоре на среднем диаметре статора) | 0,1...0,15 | 0,15...0,25 |
| K_e (отношение э.д.с. обмотки возбуждения к номинальному значению напряжения возбуждения) | 0,8...0,9 | 0,9 |
| α (отношение средней индукции в воздушном зазоре к её амплитуде на среднем диаметре) | | $\frac{2}{\pi}$ |

$K_r \approx 1,4...1,5$ - экспериментально определенный коэффициент, который учитывает увеличение активного сопротивления дискового немагнитного ротора.

Расчет обмоток и определение геометрии пазов и зубцов пакета статора

В исполнительных двигателях с аксиальным потоком применяется двухслойная обмотка с укороченным шагом. Укорочение шага для обмотки возбуждения и управления одинаковое.

При питающей частоте 400 Гц количество пазов на полюс и фазу q , принимается равным 2...3, при частоте 50 Гц - q равен 3...4.

Распространенной формой паза у двигателей с аксиальным потоком является прямоугольная, как наиболее технологичная. Отношение l_n глубины паза к ширине находится в пределах 4...5.

Плотность тока в обмотке управления j_y и возбуждения j_b в расчетах выбирается $(10...15) \cdot 10^6$ А/м².

Отношение мощности управления к мощности возбуждения $K_{yв}$ при номинальной нагрузке двигателя находится в пределах 0,25...0,35.

Проверка соответствия основных геометрических параметров условию обеспечения линейности характеристик и отсутствия самохода

Соответствие условию обеспечения линейности характеристик и отсутствия самохода проверяется по формуле (2.3)

$$\frac{r_{Ry}}{x_{my}} \geq 1,$$

где r_{Ry} — активное сопротивление дискового немагнитного ротора, приведенное к параметрам обмотки управления;

x_{my} — индуктивное сопротивление, соответствующее основной гармонике потока воздушного зазора по оси обмотки управления.

Уточненный расчет геометрических и электромагнитных параметров

Для асинхронного исполнительного двигателя с аксиальным потоком, имеющего витой магнитопровод из ленты электро-технической стали, максимальная индукция в зубце B_{2m} принимается не более 0,8 Т.

Средняя длина витка для обмотки управления и возбуждения принимается одинаковой.

Применяя технологию крепления секций обмоток в пазах путем склеивания, можно отказаться от пазовых клиньев. Следовательно, $h_{n2} = 0$.

| № | Наименование | Обозначение | Расчетная формула | Единица |
|--|--|-------------|--|---------------------------------|
| I | 2 | 3 | 4 | 5 |
| I. Расчет основных геометрических параметров магнитной системы | | | | |
| I.1. | Внешний диаметр ротора | D_{p1} | $\sqrt[4]{29,4 \frac{K_M \cdot P_{2N} \cdot T_M}{\gamma_p \cdot \delta_p \cdot \omega_0^2}}$ | М |
| I.2. | Внешний диаметр статора | D_{c1} | $(0,9 \dots 0,95) D_{p1}$ | М |
| I.3. | Количество пазов статора | z | $2 \cdot p \cdot m \cdot q$ | - |
| I.4. | Минимальная величина внутреннего диаметра активного пакета статора | D_{c2} | $\frac{z(b_{z2} + b_n)}{\pi}$ | М |
| I.5. | Средний диаметр активного пакета статора | D_{cp} | $\frac{D_{c1} + D_{c2}}{2}$ | М |
| I.6. | Расчетная мощность двигателя | S' | $K_e \frac{P_{2N}}{\eta_N \cdot \cos \varphi_N}$ | В.А |
| I.7. | Коэффициент использования магнитной системы | C | $\frac{1,147}{\pi \cdot D_{cp} \cdot A_{cp} \cdot \alpha \cdot B_{\delta} \cdot K_w}$ | $\frac{M^2}{V \cdot A \cdot S}$ |
| I.8. | Внутренний диаметр активного пакета статора | D_{c2} | $\sqrt{\frac{D_{c1}^2 \cdot n_0 - S' \cdot C}{n_0}}$ | М |

| I | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------|--|-----------------|---|----|
| I.9. | Магнитный поток одного полюса обмотки управления | Φ_y | $\frac{B_{\delta y} (D_{c1}^2 - D_{c2}^2)}{4 \cdot p}$ | Wb |
| I.10. | Магнитный поток одного полюса обмотки возбуждения | Φ_{δ} | $\frac{B_{\delta \delta} (D_{c1}^2 - D_{c2}^2)}{4 \cdot p}$ | Wb |
| I.11. | Коэффициент укорочения шага обмотки | k_y | $\sin \left(1 - \frac{2p}{z}\right) \frac{\pi}{2}$ | — |
| I.12. | Коэффициент распределения обмотки | k_p | $\frac{\sin \frac{\pi}{2 \cdot m}}{q \cdot \sin \frac{\pi}{2 \cdot q \cdot m}}$ | — |
| I.13. | Обмоточный коэффициент | k_w | $k_y \cdot k_p$ | — |
| 2. | Расчет обмоток и определение геометрии пазов и зубцов пакета | | | |
| 2.1. | Число витков обмотки управления | W_y | $\frac{K_e \cdot U_{yN}}{4,44 \cdot k_w \cdot f_0 \cdot \Phi_y}$ | — |
| 2.2. | Число витков обмотки возбуждения | W_{δ} | $\frac{K_e \cdot U_{\delta N}}{4,44 \cdot k_w \cdot f_0 \cdot \Phi_{\delta}}$ | — |
| 2.3. | Число проводников обмотки управления на паз | N_y | $\frac{W_y}{p \cdot q}$ | — |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------|--|--------------|---|----------------|
| 2.4. | Число проводников обмотки возбуждения на паз | N_b | $\frac{W_b}{p \cdot \varphi}$ | — |
| 2.5. | Номинальная мощность обмотки управления | P_{yN} | $S' \frac{K_{yb}}{1 + K_{yb}} \cdot \cos \varphi_N$ | W |
| 2.6. | Номинальная мощность обмотки возбуждения | P_{bN} | $S' \frac{1}{1 + K_{yb}} \cos \varphi_N$ | W |
| 2.7. | Полная мощность обмотки управления при номинальной нагрузке | S'_{yN} | $\frac{P_{yN}}{\cos \varphi_{yN}}$ | V.A |
| 2.8. | Полная мощность обмотки возбуждения при номинальной нагрузке | S'_{bN} | $\frac{P_{bN}}{\cos \varphi_{bN}}$ | V.A |
| 2.9. | Расчетное значение тока управления | $I_{расч.у}$ | S'_{yN}/U_{yN} | A |
| 2.10. | Расчетное значение тока возбуждения | $I_{расч.б}$ | S'_{bN}/U_{bN} | A |
| 2.11. | Расчетное значение сечения провода обмотки управления | $q_{пр.у}$ | $I_{расч.у}/j_y$ | м ² |
| 2.12. | Расчетное значение сечения провода обмотки возбуждения | $q_{пр.б}$ | $I_{расч.б}/j_b$ | м ² |

| I | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------|---|------------|---|-------|
| 2.13. | Расчетная площадь сечения паза обмотки управления | S'_{ny} | $\frac{q_{упр.у} \cdot N_y}{K_n}$ | M^2 |
| 2.14. | Расчетная площадь сечения паза обмотки возбуждения | S'_{nb} | $\frac{q_{пр.б} \cdot N_b}{K_n}$ | M^2 |
| 2.14. | Действительная площадь сечения паза обмотки управления | S_{ny} | $K_{ин} \cdot S'_{ny}$ | M^2 |
| 2.16. | Действительная площадь сечения паза обмотки возбуждения | S_{nb} | $K_{ин} \cdot S'_{nb}$ | M^2 |
| ω | 2.17. | b_n | $\sqrt{\frac{S_n}{b_n}}$ | M |
| | 2.18. | h_n | $b_n \cdot i_n$ | M |
| | 2.19. | b_{z1} | $\frac{\pi \cdot D_{c1}}{Z} - b_n$ | M |
| | 2.20. | b_{z2} | $\frac{\pi \cdot D_{c2}}{Z} - b_n$ | M |
| | 2.21. | K_δ | $\frac{5 + \frac{b_n}{2 \cdot \delta + \delta_p}}{5 + \frac{b_n}{2 \delta + \delta_p} \left(1 - \frac{b_n \cdot Z}{\pi \cdot D_{cp}}\right)}$ | — |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|

3. Проверка соответствия основных геометрических параметров условию обеспечения линейности характеристик и отсутствия самохода

3.1. Расчет выполнения условия обеспечения линейности характеристик и отсутствия самохода

$$\Gamma_{Ry} / x_{\text{туп}} \geq 1 \cdot \frac{[\delta(1 + \kappa\delta) + \delta_p] \cdot \kappa_r}{\pi \cdot \rho \cdot \mu_0 \cdot \gamma_p \cdot \delta_p \cdot (D_{c1}^2 - D_{c2}^2)} \cdot \left[\frac{4 \cdot p^2 (D_{c1} - D_{c2})}{D_{c1} + D_{c2}} + \frac{D_{p1} + D_{c1}}{D_{p1} - D_{c1}} + \frac{D_{c2} + D_{p2}}{D_{c2} - D_{p2}} \right] \geq 1$$

4. Уточненный расчет геометрических и электромагнитных параметров

4.1. Площадь сечения зубцов одного полюса

$$S_z = \frac{D_{c1} - D_{c2}}{4 \cdot p} \left[\frac{\pi (D_{c1} + D_{c2})}{2} - b_n \cdot z \right]$$

4.2. Индукция в зубце

$$B_z = \frac{\Phi}{S_z \cdot \kappa_{\text{ст}}}$$

4.3. Внешний диаметр ярма

$$D_{я1} = D_{c1}$$

4.4. Внутренний диаметр ярма

$$D_{я2} = D_{c2}$$

4.5. Площадь сечения ярма активного пакета статора

$$S_c = \frac{\Phi_y}{B_{c\text{max}}}$$

| I | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------|--|---------------------------|--|----------|
| 4.6. | Площадь сечения ярма неактивного пакета статора | $S_{я}$ | $\frac{\Phi_{y}}{B_{я \max}}$ | M^2 |
| 4.7. | Аксиальная толщина ярма активного пакета статора | h_c | $\frac{2 \cdot \Phi_{y}}{K_{ст} \cdot B_{с \max} (D_{c1} - D_{c2})}$ | M |
| 4.8. | Аксиальная толщина ярма неактивного пакета статора | $h_{я}$ | $\frac{2 \cdot \Phi_{y}}{K_{ст} B_{я \max} (D_{c1} - D_{c2})}$ | M |
| 4.9. | Средняя длина витка статорной обмотки | L_{y} | $2 \left[\frac{D_{c1} - D_{c2}}{2} + \frac{\pi (D_{c1} + D_{c2})}{4 \cdot p} \right]$ | M |
| 4.10. | Активное сопротивление обмотки управления | $r_{y(75^{\circ}C)}$ | $\frac{\rho_{75^{\circ}C} \cdot W_{y} \cdot L_{y}}{q_{пр} \cdot y}$ | Ω |
| 4.11. | Активное сопротивление обмотки возбуждения | $r_{\delta(75^{\circ}C)}$ | $\frac{\rho_{75^{\circ}C} \cdot W_{\delta} \cdot L_{y}}{q_{пр} \cdot \delta}$ | Ω |
| 4.12. | Укорочение шага обмотки статора | β | $\frac{y}{\tau}$ | — |
| 4.13. | Относительная магнитная проводимость пазового расщелия | λ_n | $\frac{h_{n1}}{3b_n} \left(\frac{1+3\beta}{4} \right) + \frac{h_{n2}}{b_n} \beta$ | — |

| I | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|-------------------|--|----------|---|
| 4.14. Относительная магнитная проводимость рассеяния по коронкам зубцов | λ_k | $\frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{\delta^2}{b_n^2} + \frac{1}{4} \right) + 4 \frac{\delta}{b_n} \operatorname{arctg} \frac{b_n}{2\delta} \right]$ | — | |
| 4.15. Относительная магнитная проводимость рассеяния лобовых частей обмоток | λ_λ | $\frac{q(D_{c1} + D_{c2})}{p(D_{c1} - D_{c2})} (0,534 - 0,342\beta)$ | — | |
| 4.16. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора | x_σ | $2\pi \cdot f_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{W_y^2}{2 \cdot p \cdot q} \cdot \frac{D_{c1} - D_{c2}}{2} (\lambda_n + \lambda_k + \lambda_\lambda)$ | Ω | |
| 4.17. Индуктивное сопротивление, соответствующее основной гармонике потока воздушного зазора по оси обмотки управления Y | $x_{\tau y}$ | $\frac{f_0 \cdot \mu_0 \cdot K_{wy}^2 \cdot W_y^2 (D_{c1} - D_{c2})^2}{p^2 [\delta (1 + K_\delta) + \delta_p]}$ | Ω | |
| 4.18. Активное сопротивление немагнитного ротора, приведенное к парам обмотки управления Y | $r'_{эy}$ | $\frac{K_{wy}^2 \cdot W_y^2 \cdot K_r \cdot \rho_r}{p^2 \cdot \pi \cdot \delta_p} \left[\frac{4p^2 (D_{c1} - D_{c2}) + D_{c1} + D_{c2}}{D_{c1} + D_{c2}} + \frac{D_{p1} + D_{c1}}{D_{p1} - D_{c1}} + \frac{D_{c2} + D_{p2}}{D_{c2} - D_{p2}} \right]$ | Ω | |
| 4.19. Эквивалентное активное сопротивление прямой последовательности параллельного разветвления по оси обмотки Y | $r'_{эy}$ | $\frac{(1-y) x_{\tau y} \cdot r_{эy}}{r_{эy}^2 + (1-y)^2 x_{\tau y}^2}$ | Ω | |

| I | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------|--|-----------|---|---|
| 4.20. | Эквивалентное реактивное сопротивление прямой последовательности параллельного разветвления по оси обмотки Y | x'_{y1} | $\frac{x_{\text{тн}} \cdot r_{\text{э}}^2}{r_{\text{э}}^2 + (1-\nu)^2 \cdot x_{\text{тн}}^2}$ | Ω |
| 4.21. | Эквивалентное активное сопротивление обратной последовательности параллельного разветвления по оси обмотки Y | r'_{y2} | $\frac{(1+\nu) \cdot x_{\text{тн}} \cdot r_{\text{э}}}{r_{\text{э}}^2 + (1+\nu)^2 \cdot x_{\text{тн}}^2}$ | Ω |
| 4.22. | Эквивалентное реактивное сопротивление обратной последовательности параллельного разветвления по оси обмотки Y | x'_{y2} | $\frac{x_{\text{тн}} \cdot r_{\text{э}}^2}{r_{\text{э}}^2 + (1+\nu)^2 \cdot x_{\text{тн}}^2}$ | Ω |
| 4.23. | Эквивалентное активное сопротивление прямой последовательности по оси обмотки B | r'_{b1} | $\left(\frac{W_b}{W_y}\right)^2 \cdot r'_{y1}$ | Ω |
| 4.24. | Эквивалентное реактивное сопротивление параллельного разветвления прямой последовательности по оси обмотки B | x'_{b1} | $\left(\frac{W_b}{W_y}\right)^2 \cdot x'_{y1}$ | Ω |
| 4.25. | Эквивалентное активное сопротивление обратной последовательности по оси обмотки B | r'_{b2} | $\left(\frac{W_b}{W_y}\right)^2 \cdot r'_{y2}$ | Ω |

| I | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
|---|---|---|---|---|

- 4.26. Эквивалентное реактивное сопротивление параллельного разветвления обратной последовательности по оси обмотки В
- 4.27. Полное сопротивление схемы замещения прямой последовательности по оси обмотки У
- 4.28. Полное сопротивление схемы замещения обратной последовательности по оси обмотки У
- 4.29. Полное сопротивление схемы замещения прямой последовательности по оси обмотки В
- 4.30. Полное сопротивление схемы замещения обратной последовательности по оси обмотки В

| | | |
|-----------|---|----------|
| x'_{b2} | $\left(\frac{W_b}{W_y}\right)^2 \cdot x'_{y2}$ | Ω |
| Z_{y1} | $(r_y + r'_{y1}) + j(x_{\sigma y} + x'_{y1})$ | Ω |
| Z_{y2} | $(r_y + r'_{y2}) + j(x_{\sigma y} + x'_{y2})$ | Ω |
| Z_{b1} | $(r_b + r'_{b1}) + j(x_{\sigma b} - x_c + x_{b1})$ | Ω |
| Z_{b2} | $(r_b + r'_{b2}) + j(x_{\sigma b} - x_c + x'_{b2})$ | Ω |

Расчет механических и регулировочных характеристик

Расчет механических и регулировочных характеристик проводится аналогично общеизвестной методике, которая применяется для исполнительных двигателей [4,5,6,7]. Поэтому формулы расчета механических и регулировочных характеристик в данном формуляре не приводятся.

Заключение

Приведенная в данном формуляре методика расчета основных электромагнитных и геометрических параметров исполнительного двигателя с аксиальным рабочим потоком была использована в теоретических и экспериментальных исследованиях, а также в курсовом и дипломном проектировании на кафедре основ электротехники в ТПИ.

Экспериментальные исследования опытных образцов двигателей подтверждают хорошую сходимость результатов расчета и эксперимента.

Л и т е р а т у р а

1. Варик Л.Э., Самолевский Г.К. О некоторых особенностях электромагнитных процессов двухфазного асинхронного исполнительного двигателя с аксиальным потоком. "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", № 337, 1973.

2. Варик Л.Э., Самолевский Г.К. Об обеспечении линейности регулировочных характеристик и отсутствия самохода двухфазного асинхронного исполнительного двигателя с аксиальным потоком. "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", № 337, 1973.

3. Варик Л.Э., Самолевский Г.К. Об определении основных геометрических параметров магнитной системы двухфазного асинхронного исполнительного двигателя с аксиальным потоком. "Тр. Таллинск. политехн. ин-та", №369, 1974.

4. Ермолин Н.Н. Электрические машины малой мощности. "Высшая школа", М., 1965.

5. Лопухина Е.М., Сомихина Г.С. Асинхронные микромашины с полым ротором. "Энергия", М., 1967.

6. Лопухина Е.М., Сомихина Г.С. Проектирование асинхронных микромашин с полым ротором. "Энергия", М., 1968.

7. Чечет Ю.С. Электрические микромашины автоматических устройств. "Энергия", М.-Л., 1964.

L. Varik, G. Samolevski

The List for Checking the Basic Electromagnetic
and Geometric Parameters of the Two-Phase
Axial Magnetic Flux Asynchronous Servomotor

Summary

In this paper the list for checking the basic electromagnetic and geometrical parameters of the two-phase axial magnetic flux asynchronous servomotor has been worked out.

УДК 621.318.435:621.2.013

А.Н.Юегин, Я.Я.Ярвик

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ С ВРАЩАЮЩИМСЯ
МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Введение

Современные электрические системы характеризуются сложной и разветвленной электрической сетью. Важными задачами управления режимами таких систем являются поддержание напряжения в узловых точках на заданном уровне и управление потоками реактивной мощности, способствующих надежной работе, повышение качества и уменьшение потерь электроэнергии.

Для этой цели успешно используются компенсирующие устройства. Наряду с нерегулируемыми применяются ступенчато регулируемые реактивные элементы. Однако часто наивысший эффект получается при быстродействующем плавном регулировании параметров компенсирующих устройств. Таким элементом может служить управляемый реактор (УР) с вращающимся магнитным полем (ВМП). Он представляет собой электромагнитный аппарат, индуктивное сопротивление которого плавно регулируется подмагничиванием магнитопровода обмоткой постоянного тока.

Классической конструкцией УР с ВМП следует считать развитую конструкцию докт. техн. наук М.С. Либкинда [1]. Применение обмоток управления, охватывающих наружную и внутреннюю часть магнитопровода позволяет повышать эффективность управления и конструкция получается виброустойчивой при любом числе пар полюсов.

Применение управляемых ферромагнитных устройств с ВМП находится в начальной стадии, как в СССР, так и за рубежом. Поэтому первый опыт промышленной эксплуатации [2], подтверждающая целесообразность и эффективность использования таких

устройств, не позволяет дать типовые решения многих задач их электромагнитного расчета.

Сложность аналитического решения системы уравнений, описывающих электромагнитное поле электрической машины, заставляет решать многие электротехнические задачи экспериментально с использованием полужемпирических формул и приемов, основанных на обобщениях накопленного опыта. При проектировании новых типов машин с высокими значениями электромагнитных нагрузок, когда учет насыщения ферромагнитной среды становится существенным для повышения качества расчетов, возникает необходимость более строгого учета физических процессов и отказа от классических методов расчета магнитной цепи и характеристик машины.

К числу таких машин относятся управляемые ферромагнитные устройства с вращающимся магнитным полем (ВМП), в магнитопроводе которых действуют одновременно вращающийся и однонаправленный магнитные потоки. Первый создается, как в электрической машине, трехфазной рабочей обмоткой, второй — обмоткой управления, осуществляющей подмагничивание магнитопровода. При этом переменный ток, потребляемый из сети, за счет известных свойств трехфазных обмоток электрических машин, остается практически синусоидальным при любой степени подмагничивания.

Целью данной работы является уточнение и совершенствование существующей математической модели магнитной цепи и создание на этой базе программы уточненного расчета магнитной цепи на ЦВМ. При этом исходим, что связь между тангенциальной и радиальной составляющими индукции выражается в дифференциальном виде. Определение этой связи усложняется прерывистым характером пазового слоя, т.е. наличием пазов. Для исследования магнитной цепи на ЦВМ необходимо построить математическую модель, отражающую как можно точнее реальный характер магнитных распределений и в то же время не требующую чрезвычайно больших затрат машинного времени. Поэтому, при исследовании магнитной цепи на ЦВМ в [3,4,5] определились фиктивные магнитные величины, соответствующие реальным. На основании фиктивных величин окончательные результаты расчета (зависимости нескольких гармоник фазного напряжения от первой гармоники тока) получались с удовлет-

ворительной точностью. В данной работе ставится задача получить не только несколько первых гармоник фазного напряжения, но и гармоники высокого порядка (зубца). Для этого необходимо найти связь между фиктивными и реальными магнитными величинами.

Замена реальных величин фиктивными

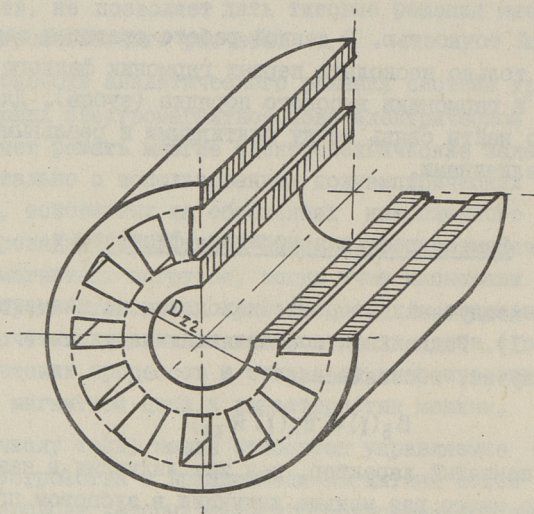
У УР воздушный зазор δ находится на диаметре D_{22} (см. фиг. 1). Радиальная составляющая индукции в воздушном промежутке, обозначаемая

$$B_{\delta}(\gamma) = B_R(\gamma, R_{22}), \quad (I)$$

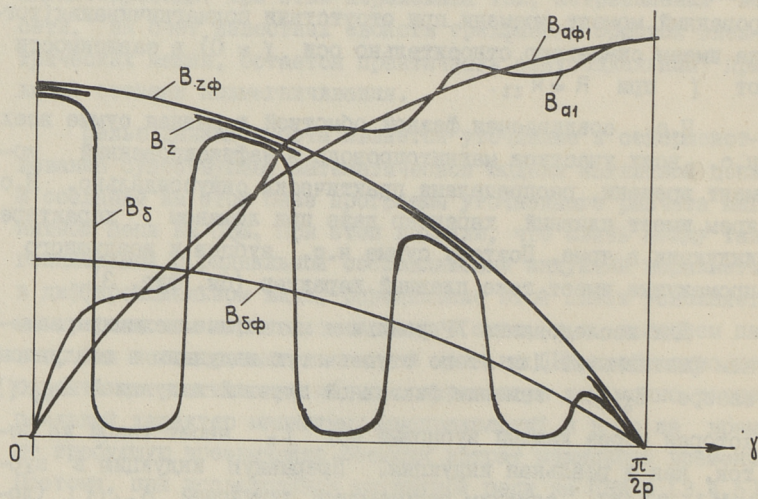
имеет ступенчатый характер, так как индукция в пазовом промежутке во много раз меньше индукции в зубцовом промежутке (в зазоре). Поэтому средняя индукция в ярме $B_a(\gamma)$ имеет ломаный характер (в пазовом промежутке $\frac{\partial B_a}{\partial \gamma} \approx 0$). Индукция в зубцах имеет прерывистый характер. На фиг. 2 показаны индукции в воздушном промежутке, в зубцах и ярме в зафиксированный момент времени при отсутствии подмагничивания (тогда имеем симметрию относительно оси $\gamma = 0$) в зависимости от γ при $R = R_{22}$.

Н.с., создаваемая фазной обмоткой и равная сумме всех н.с. всех участков магнитопровода в зафиксированный момент времени, распределена практически синусоидально. Н.с. ярма имеет плавный характер даже при ломаном характере индукции в ярме. Поэтому сумма н.с. зубцов и воздушного промежутка имеет тоже плавный характер (см. фиг. 3).

Для исследования УР реальные магнитные величины заменим фиктивными. Для этого ступенчатую индукцию в воздушном зазоре $B_{\delta}(\gamma)$ заменим фиктивной плавной индукцией $B_{\delta\phi}(\gamma)$, которая через каждый зубцовый шаг t_z несет такой же поток, как и реальная индукция. Прерывную индукцию в зубцах $B_z(\gamma)$ заменим непрерывной индукцией $B_{z\phi}(\gamma)$ (дополним промежутки, приходящиеся на паз). Чтобы получить сумму н.с. зубцов и зазора, совпадающую с реальной, необходимо при подсчете н.с. сделать поправку с помощью коэффициента Картера k_{δ} :



Фиг. 1. Магнитопровод управляемого реактора.



Фиг. 2. Распределение индукции в воздушном промежутке (реальной B_{δ} и фиктивной $B_{\delta\phi}$, индукции в зубцах на радиусе R_{z2} (реальной B_{z2} и фиктивной $B_{z\phi}$) и средней индукции в наружном ярме (реальной B_{a1} и фиктивной $B_{a\phi1}$).

$$F_{\delta\phi} = \frac{B_{\delta\phi}}{\mu_0} \delta \cdot k_{\delta} \cdot k_{Fe}, \quad (2)$$

где k_{Fe} — коэффициент заполнения магнитопровода сталью, учитывающий, что индукция в зазоре несколько меньше, чем индукция в стали $B_R(\gamma, R_{z2})$ (на том же диаметре).

В принятой математической модели ломаная индукция в ярме заменится плавной кривой $B_{\alpha\phi_1}(\gamma)$ (см. фиг. 2).

Фиктивные индукции описываются уравнениями и определяются значительно проще, чем реальные. После определения фиктивной индукции $B_{\delta\phi}(\gamma)$ можно приблизительно определить реальную индукцию $B_{\delta}(\gamma)$. При отсутствии воздушного зазора линии скалярного магнитного потенциала пойдут параллельно друг другу (см. фиг. 4). Линии магнитной индукции в зубце идут чаще, чем в зазоре, вследствие высокой магнитной проницаемости. Магнитное напряжение зубца и паза на протяжении зубцового шага примерно одинаковое и равно $F_{z\phi}(\gamma)$. Напряженность поля в пазу

$$H_{\delta n} = \frac{F_{z\phi}(\gamma)}{h_n}, \quad (3)$$

индукция в пазу

$$B_{\delta n} = \mu_0 H_{\delta n}. \quad (4)$$

Буква "δ" в индексе означает, что рассматриваемая величина определяется там, где обычно находится зазор, т.е. на диаметре D_{z2} . Определяем $B_{\delta z}$ исходя из соотношения

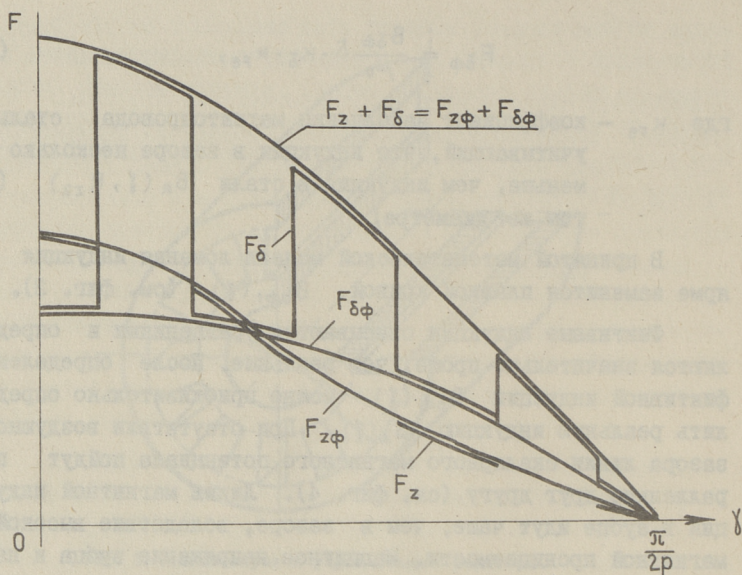
$$b_n B_{\delta n} + b_z B_{\delta z} = t_z B_{\delta\phi}; \quad (5)$$

$$B_{\delta z} = \frac{t_z B_{\delta\phi} - b_n B_{\delta n}}{b_z} = \frac{t_z}{b_z} B_{\delta\phi} - \frac{b_n}{b_z} B_{\delta n}. \quad (6)$$

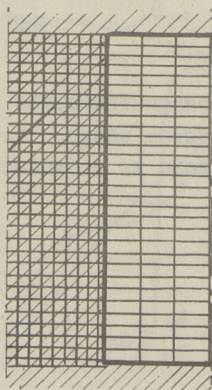
Таким образом получили реальную ступенчатую индукцию в "зазоре":

$$B_{\delta n} = \mu_0 \frac{F_{z\phi}(\gamma)}{b_n}; \quad (7)$$

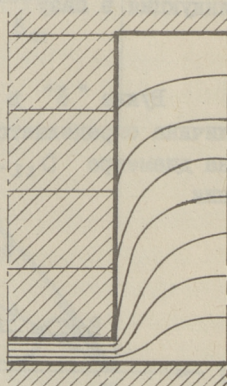
$$B_{\delta z} = \frac{t_z}{b_n} B_{\delta\phi}(\gamma) - \frac{b_n}{b_z} B_{\delta n}(\gamma). \quad (8)$$



Фиг. 3. Реальные и фиктивные намагничивающие силы зубцов и воздушного зазора.



Фиг. 4.
Картина поля в зубцево-пазовом слое при отсутствии зазора.



Фиг. 5.
Линии скалярного магнитного потенциала в зубцево-пазовом слое при наличии зазора.

При относительно небольшом зазоре или сильном насыщении стали будем иметь картину, грубо изображенную на фиг. 5 (изображены только линии скалярного магнитного потенциала). Индукцию в зазоре можно грубо определить аналогично формулам (7) и (8), т.е.

$$B_{\delta n}(\gamma) \approx \mu_0 \frac{F_{z\phi}(\gamma) + \frac{B_{\delta\phi}}{\mu_0} \delta \cdot k_{\delta} k_{Fe}}{h_n}; \quad (9)$$

$$B_{\delta z}(\gamma) \approx \frac{t_z}{\delta_z} B_{\delta\phi}(\gamma) - \frac{\delta_n}{\delta_z} B_{\delta n}(\gamma). \quad (10)$$

Индукция в зубцовом промежутке $B_{\delta z}$ несколько завышена по формуле (10), а в пазовом промежутке занижена по формуле (9). Кроме того реальная индукция не имеет ярко выраженной ступенчатой формы, т.е. "ступеньки" не имеют острых углов.

Теперь поставим задачу определения фиктивных магнитных величин $B_{\delta\phi}$, $B_{z\phi}$, $B_{\phi 1}$. В дальнейшем букву "ф" в индексе будем опускать.

Дифференциальные уравнения магнитной цепи

Автором [5] впервые был предложен метод исследования на ЦВМ нелинейной магнитной цепи с ВМП, т.е. цепи с небольшим воздушным зазором (или его отсутствием) и несинусоидальным распределением индукции в зазоре. Коротко охарактеризуем идею метода.

Математическая модель представлена дифференциальными уравнениями, описывающими связь между индукцией в зазоре и средней тангенциальной составляющей индукции в ярме. Эти величины в виде гармонического ряда с конечным числом членов (обычно 7-12 гармоник). Задача сводится к решению 7... 12 нелинейных уравнений, численным методом на ЦВМ относительно членов гармонического ряда.

Этот метод теоретически всесторонне развит и обобщен в работе [6]. В [3 и 4] этот метод применяется по отноше-

нию к УР. Следовательно, в настоящее время сформировалась тенденция базировать расчеты нелинейных магнитных цепей с ВМП на гармоническом анализе.

Недостатком этого метода является необходимость ограничиваться при расчете определенным количеством членов гармонического ряда. Увеличение числа определяемых членов на единицу приводит к увеличению порядка нелинейной системы и резкому увеличению затрат машинного времени. Поэтому существует определенный предел числа определяемых членов ряда (примерно 12 гармоник). Следовательно, зубцовые гармоники, имеющие высокий порядок, могут быть не определены.

В настоящей работе предлагается иной путь исследования на ЦВМ математической модели нелинейной магнитной цепи с ВМП, который не базируется на гармоническом анализе. Основным достоинством этого пути является получение искомых данных в виде функций, а не в виде гармонического ряда с ограниченным числом членов. Тем самым решение будет получено в виде бесконечного числа членов гармонического ряда.

Новизна метода заключается в решении проблемы определения начальных условий дифференциальных уравнений математической модели магнитной цепи (этот вопрос подробно рассматривается ниже).

Основные аналитические выражения, описывающие магнитную цепь, получены в [5]. Теперь поставим задачу получить уравнения, подлежащие непосредственному исследованию на ЦВМ.

Согласно формулам [5] радиальная составляющая индукции на радиусе внутреннего дна пазов

$$B_R(\gamma, R_{z2}) = \frac{h_1}{R_{z2}} \frac{dB_{a1}}{d\gamma},$$

или

$$B_\delta(\gamma) = \frac{h_1}{R_{z2}} \frac{dB_{a1}}{d\gamma},$$

откуда

$$\frac{dB_{a1}}{d\gamma} = \frac{R_{z2}}{h_1} B_\delta(\gamma). \quad (II)$$

Связь тангенциальных составляющих индукции в ярмах определяется по формуле

$$B_{a1}(\gamma) = -\frac{h_2}{h_1} B_{a2}(\gamma) + \Delta B',$$

или

$$B_{a2}(\gamma) = -\frac{h_1}{h_2} B_{a1}(\gamma) + \Delta B', \quad (I2)$$

где $\Delta B'$ — некоторая постоянная, зависящая от степени намагничивания.

В уравнение (II) входят две неизвестные функции — $B_5(\gamma)$ и $B_{a1}(\gamma)$. Для получения этих функций требуется получить еще одно уравнение, связывающее величины $B_5(\gamma)$ и $B_{a1}(\gamma)$, которое будет решаться совместно с уравнением (II). Для получения этого уравнения проведем ряд преобразований.

Запишем выражения н.с. всех участков магнитопровода. Н.с. воздушного зазора определяется по формуле (2):

$$F_\delta = \frac{B_5}{\mu_0} \delta \cdot k_\delta \cdot k_{F\delta}.$$

Н.с. наружного яра в тангенциальном направлении определяется по формуле

$$F_{ja1}(\gamma) = \int_{\gamma}^{\frac{\pi}{2p}} H(B_{a1}) R_{i1} d\gamma,$$

или

$$F_{ja1}(\gamma) = -\int_{\frac{\pi}{2p}}^{\gamma} H(B_{a1}) R_{i1} d\gamma. \quad (I3)$$

Н.с. внутреннего яра в тангенциальном направлении определяется по формуле:

$$F_{ja2}(\gamma) = \int_{\gamma}^{\frac{\pi}{2p}} H(-B_{a2}) R_{i2} d\gamma.$$

Подставляя в последнее выражение (I2), получаем

$$F_{ja2}(\gamma) = \int_{\gamma}^{\frac{\pi}{2p}} H\left(\frac{h_1}{h_2} B_{a1} - \Delta B'\right) R_{i2} d\gamma. \quad (I4)$$

или

$$F_{ja2}(\gamma) = -\int_{\frac{\pi}{2p}}^{\gamma} H\left(\frac{h_1}{h_2} B_{a1} - \Delta B'\right) R_{i2} d\gamma. \quad (I5)$$

Н.с. зубца будем определять с помощью характеристики зубца, которая получена предварительно по известной геометрии реактора. Характеристика представлена массивом, который будет аппроксимировать отрезками прямых

$$F_z = F_z(B_\delta). \quad (16)$$

Будем считать, что н.с. ярем в радиальном направлении характеристики $F_{jR1}(\gamma)$ и $F_{jR2}(\gamma)$, уже известны. После определения распределения величин $B_\delta(\gamma)$ и $B_{a1}(\gamma)$ методом, изложенным ниже, можно характеристики $F_{jR1}(\gamma)$ и $F_{jR2}(\gamma)$ уточнить. Если разница уточненных характеристик с предварительными велика, то заново получаем распределение величин $B_\delta(\gamma)$ и $B_{a1}(\gamma)$ на основании уточненных характеристик и опять уточняем характеристики. Так делаем до тех пор, пока разница между уточненными и предварительными характеристиками будет незначительной.

Самые первые предварительные характеристики $F_{jR1}(\gamma)$ и $F_{jR2}(\gamma)$ можно получить, считая распределение величин $B_\delta(\gamma)$ и $B_{a1}(\gamma)$ синусоидальными. Характеристики $F_{jR1}(\gamma)$ и $F_{jR2}(\gamma)$ представляются массивами, которые будем аппроксимировать отрезками прямых

$$F_{jR1} = F_{jR1}(\gamma), \quad (17)$$

$$F_{jR2} = F_{jR2}(\gamma). \quad (18)$$

Согласно закону полного тока имеем:

$$\begin{aligned} F_{ja2}(\gamma) + F_{jR2}(\gamma) + F_\delta(\gamma) + F_z(\gamma) + F_{jR1}(\gamma) + F_{ja1}(\gamma) = \\ = F_m \cos p\gamma + \frac{W_y I_y}{2\pi} \left(\frac{\pi}{2p} - \gamma \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Дифференцируем выражение (19):

$$\frac{dF_{ja2}}{d\gamma} + \frac{dF_{jR2}}{d\gamma} + \frac{dF_\delta}{d\gamma} + \frac{dF_z}{d\gamma} + \frac{dF_{jR1}}{d\gamma} + \frac{dF_{ja1}}{d\gamma} = -p F_m \sin p\gamma - \frac{W_y I_y}{2\pi}. \quad (20)$$

В правую часть выражения (20) входят электрические величины. При расчете магнитной цепи удобнее оперировать магнитными величинами. Введем понятие средней напряженности магнитного пути:

$$H_{cp} = \frac{F_m}{l_\Sigma}, \quad (21)$$

$$l_{\Sigma} = \frac{\pi}{2\rho} (R_{i1} + R_{i2}) + R_{i1} - R_{i2}, \quad (22)$$

где l_{Σ} — суммарная длина магнитного пути.

Перепишем, только правую часть формулы (20) в виде:

$$-p F_m \sin p\gamma - \frac{W_y I_y}{2\pi} = -p H_{cp} l_{\Sigma} \sin p\gamma - H_0 R_i, \quad (23)$$

где H_0 — постоянная составляющая напряженности поля в подмагничиваемом ярме;

R_i — средний радиус подмагничиваемого ярма.

Заметим, что формула (23) справедлива при подмагничивании только одного ярма (внутреннего или наружного). При подмагничивании обоих ярм в общем случае получим:

$$\frac{W_y^* I_y}{2\pi} = H_{01} R_{i1} - H_{02} R_{i2}, \quad (24)$$

где H_{01} и H_{02} — постоянные составляющие напряженности поля в наружном и во внутреннем ярмах;

W_y^* — часть числа витков обмоток управления, попавшая в контур магнитного пути.

В частном случае, если одна обмотка управления охватывает оба ярма, то $W_y^* = 0$. В этом случае, согласно (24), имеем

$$0 = H_{01} R_{i1} - H_{02} R_{i2}, \quad (25)$$

при этом формула (23) примет более простой вид:

$$-p F_m \sin p\gamma = -p H_{cp} l_{\Sigma} \sin p\gamma. \quad (26)$$

Раскроем выражение (20):

$$\begin{aligned} -H \left(\frac{h_1}{h_2} B_{\alpha 1} - \Delta B' \right) R_{i2} + \frac{dF_{jR2}}{d\gamma} + \frac{\delta_{k\delta}}{\mu_0} k_{Fe} \frac{dB_{\delta}}{d\gamma} + \frac{dF_z}{dB_{\delta}} \frac{dB_{\delta}}{d\gamma} + \\ + \frac{dF_{jR1}}{d\gamma} - H (B_{\alpha 1}) R_{i1} = -p H_{cp} l_{\Sigma} \sin p\gamma - H_0 R_i. \end{aligned} \quad (27)$$

Из выражения (27) выражаем величину $\frac{dB_{\delta}}{d\gamma}$ и вместе с уравнением (II) получим систему дифференциальных уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dB_{\delta}}{d\gamma} &= \frac{H\left(\frac{h_1}{h_2} B_{a1} - \Delta B'\right) R_{i2} + H(B_{a1}) R_{i1} - \frac{dF_{jR}}{d\gamma} - p H_{cp} l_z \sin p\gamma - H_0 R_i}{\frac{\delta K_{\delta}}{\mu_0} K_{Fe} + \frac{dF_z}{d\delta}} \\ \frac{dB_{a1}}{d\gamma} &= \frac{R_{z2}}{h_1} B_{\delta}. \end{aligned} \right. \quad (28)$$

Здесь $\frac{dF_{jR}}{d\gamma} = \frac{dF_{jR1}}{d\gamma} + \frac{dF_{jR2}}{d\gamma}$.

Решив систему (28), получим пространственное распределение индукции в зазоре и в средней тангенциальной составляющей индукции в наружном ярме, т.е. функции $B_{\delta}(\gamma)$ и $B_{a1}(\gamma)$. Эти величины являются главными, так как исходя из них можно определить остальные величины (например, распределение радиальной составляющей поля в сечении спинки ярма). Следовательно, задача расчета магнитной цепи в основном сводится к решению системы (28).

В систему (28) входят три нелинейных функции, заданные точками (массивами):

$H(B)$ — основная кривая намагничивания стали;

$F_z(B_{\delta})$ — характеристика зубца;

$F_{jR}(\gamma)$ — характеристика ярма.

Так как функции нелинейные, систему (28) можно решить только численными методами на ЦВМ. Для этого необходимо иметь начальные условия в какой-нибудь точке $\gamma = \gamma_0$, т.е. должны быть известны значения $B_{\delta}(\gamma_0)$ и $B_{a1}(\gamma_0)$. Одна из основных трудностей всей задачи расчета магнитной цепи заключается в том, что начальные условия (н.у.) не известны. Ни в одной точке не известна величина $B_{a1}(\gamma)$, а величина $B_{\delta}(\gamma)$ известна в двух точках

$$\begin{aligned} B_{\delta}\left(-\frac{\pi}{2p}\right) &= 0; \\ B_{\delta}\left(\frac{\pi}{2p}\right) &= 0. \end{aligned} \quad (29)$$

Введем обозначения

$$B_{\delta}\left(\frac{\pi}{2p}\right) = B_{\delta 0}; \quad B_{a1}\left(-\frac{\pi}{2p}\right) = B_{a1 0}.$$

Будем решать систему (28) в следующей последовательности. Задаемся значением $B_{a1 0}$, при н.у. $B_{\delta}\left(-\frac{\pi}{2p}\right) = 0$ и

$V_{a1}(-\frac{\pi}{2p}) = V_{a10}$ решаем систему (28) численным методом (например, методом Рунге-Кутты-Фельберга пятого порядка с контролем шага интегрирования [7]). Если в результате решения системы не выполняется условие

$$|V_{\delta 0}| < \varepsilon, \quad (30)$$

где ε — заданная точность, то выбирается значение другое и система (28) решается при новых н.у. Так продолжаем до тех пор, пока не выполнится условие (30). Формируя задачу в математических терминах, необходимо решить уравнение

$$V_{\delta 0}(V_{a10}) = 0, \quad (31)$$

напомним, что $V_{\delta 0}$ — результат решения системы (28) в точке $\gamma = \frac{\pi}{2p}$ при н.у. $V_{\delta}(-\frac{\pi}{2p}) = 0$ и $V_{a1}(-\frac{\pi}{2p}) = V_{a10}$.

К уравнению (31) было применено 4 сравниваемых между собой способа решения: метод хорд, метод Ньютона, метод Стефенсона, комбинированный метод хорд и деления отрезка пополам. Ни один из методов не обеспечивает хорошей сходимости и не дает преимуществ по сравнению с остальными. Это связано с неудобным видом функции $V_{\delta 0}(V_{a10})$. В окончательном варианте принят самый надежный метод деления отрезка пополам (удовлетворительное решение находится за 20-10 приближений).

Если решено уравнение (31), то тем самым решена система (28) при требуемом условии (29).

В первое уравнение системы (28) входит неизвестная величина $\Delta V'$, которая зависит от заданной величины H_0 . Значение константы $\Delta V'$ заранее не известно, но систему (28) можно решить вышеописанным способом при любом значении $\Delta V'$. После решения системы (28) определим величину

$$H_0^* = \frac{p}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} H(V_a) d\gamma, \quad (32)$$

где $V_a(\gamma) = V_{a1}(\gamma)$ при подмагничивании наружного ярма или

$V_a(\gamma) = V_{a2}(\gamma)$ при подмагничивании внутреннего ярма.

Если величина H_0^* отличается от заданного значения H_0 в первом уравнении системы (28), тогда выбирается новое значение $\Delta B'$ и снова повторяется весь процесс решения системы (28). Так продолжается до тех пор, пока не соблюдено условие

$$|H_0 - H_0^*| < \varepsilon. \quad (33)$$

На этом полностью закончено решение системы (28). На основе полученных величин $B_\delta(\gamma)$ и $B_{a1}(\gamma)$ можно уточнить характеристику $F_{jR}(\gamma)$, входящую в первое уравнение системы (28). Если уточненная характеристика $F_{jR}(\gamma)$ значительно отличается от принятой предварительно, то весь процесс определения основных величин $B_\delta(\gamma)$ и $B_{a1}(\gamma)$ повторяется на основании уточненной характеристики. Затем характеристика $F_{jR}(\gamma)$ снова уточняется, сравнивается с предварительной и т.д. до тех пор, пока разница между уточненной и предварительной характеристиками будет незначительной.

На этом определение основных величин $B_\delta(\gamma)$ и $B_{a1}(\gamma)$ полностью закончено и можно от фиктивных величин перейти к реальным по указанной выше методике.

Заключение

В данной работе описывается новый метод расчета нелинейной магнитной цепи с вращающимся магнитным полем, позволяющий получить распределения магнитных величин в виде числовых функций, которые можно разложить в гармонический ряд с любым числом членов. Также указывается переход от фиктивных магнитных величин к реальным, что позволяет определить гармоники высокого порядка (зубцовые). Зубцовые гармоники нельзя подавить в фазном напряжении, поэтому они несколько влияют на характеристики ферромагнитных устройств ВМП. Следовательно, актуальность задачи определения влияния зубцовых гармоник очевидна.

Л и т е р а т у р а

Г. Л и б к и н д М.С. Управляемый реактор с вращающимся магнитным полем. Авторское свидетельство № И16 И82, класс 2Иa²-55, 1959.

2. Л и б к и н д М.С. и др. Устройство с управляемым реактором для регулирования напряжения в распределительной сети 10 кВ. "Электрические станции", 1972, № 5.

3. Л е о н о в И.И. Разработка и исследование магнитной цепи управляемых ферромагнитных устройств с вращающимся магнитным полем. Автореферат дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук, Томск, 1975, с. 22.

4. З а б у д с к и й Е.И. Исследование режимов намагничивания трехфазных управляемых реакторов с вращающимся полем. Автореферат дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук, Львов, 1976, 22 с.

5. Н о в о к ш е п о в В.С., С т а р о д у б ц е в а В.А. Расчет магнитной цепи асинхронного двигателя на ЭВМ. Труды Казахского ПИ им. В.И.Ленина, "Энергетика и электрификация", вып. I, 1971.

6. М и ш и н В.И. Статические нелинейные цепи с вращающимся магнитным полем. Изд-во "Штиинца", Кишинев, 1973, 195 с.

7. Математическое обеспечение ЭВМ "Минск-32", вып. I, 6. НИЦЕВТ, Минск, 1971.

A. Julegin, J. Järvik

Numerisches Modell des Drehfeld-Magnetkreises

Zusammenfassung

Man präzisiert das matematische Modell des Magnetkreises von der gesteuerten Drehfelddrossel. Der Magnetkreis der Drehfelddrossel ist analog dem Magnetkreis der rotierenden elektrischen Maschinen.

Es wird die Raumverteilung der R, γ -Komponenten der Induktion und Feldstärke in allen Teilen des Magnetleiters mit Drehfeld analysiert. Für die präzisierte Berechnung des Magnetkreises ist der Algorithmus der Programme für die Digitalrechner ausgearbeitet.

УДК 621.318

А.Т.Ребане, А.П.Рейнер, Я.Я.Ярвик

СТАТИСТИЧЕСКИЙ КОМПЕНСАТОР РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Введение

Для снижения потерь электроэнергии и повышения качества напряжения в распределительных сетях промышленных предприятий требуются автоматические компенсаторы реактивной мощности. Это положение отражается в новой тарифной системе на электроэнергию, которая стимулирует увеличение мощностей компенсирующих установок и снабжения их автоматическими регуляторами.

В настоящее время регулирование мощности конденсаторных батарей обычно осуществляется путем включения и отключения отдельных их секций. Такое регулирование является ступенчатым и вследствие низкой эксплуатационной надежности контактных коммутационных аппаратов малоэффективным.

Как обстоит дело с автоматическими регуляторами? Для выяснения этого в 1975 году было исследовано состояние вопроса по компенсации реактивной мощности на 120 предприятиях Таллина. В это время автоматические регуляторы были установлены лишь на 8 предприятиях. Из отечественных регуляторов наиболее распространенными являются регуляторы типа "АРКОН" и "ВАКО".

Основные недостатки регуляторов "АРКОН" и "ВАКО" — у первых относительная сложность настройки, а у вторых малое число секций и, кроме того, у них при регулировании в основу не приняты положения новой тарифной системы. Согласно сказанному, дальнейшее исследование вопросов, связанных с разработкой и сравнением новых типов компенсаторов реактивной мощности, актуально и круг этих вопросов является предметом данной работы.

Тариф на электроэнергию

Исторически, при малоразвитых энергетических системах было экономически оправданным использование генераторов с низким коэффициентом мощности (0,6...0,7) и генерирование на электростанциях как активную так и реактивную мощности. В настоящее время положение в корне изменилось. В странах с развитыми энергетическими системами 65...100% реактивной мощности целесообразно генерировать в местах потребления.

Это положение учитывает также существующая тарифная система на электроэнергию [1]. Для промышленных потребителей оплата на электроэнергию определяется формулой

$$B = B_0 + B_{\varphi} = (\alpha P_m + \beta W_d)(1 \pm k_{\varphi}),$$

где оплата за электроэнергию

$$B_0 = \alpha P_m + \beta W_d$$

и за компенсации реактивной мощности

$$B_{\varphi} = \pm k_{\varphi} B_0.$$

Здесь P_m — максимальная потребляемая получасовая активная мощность потребителя во время часов максимума энергосистемы, кВт (мощность участия в максимуме энергосистемы, фиксированная в договоре предприятия с энергосбытом);

W_d — потребление активной электроэнергии, кВт.ч/год;

α, β — тарифные коэффициенты основной и дополнительной оплаты, руб/кВт, руб/кВт.ч;

k_{φ} — коэффициент, зависящий от коэффициента мощности и определяемый по шкале скидок и надбавок к плате за электроэнергию.

Согласно [1,2] с 1 января 1975 г. введена "Новая шкала скидок и надбавок к тарифам за электроэнергию за компенсацию реактивной мощности", которая в условиях ЭССР нацелена на то, чтобы все предприятия приобретали и внедряли бы автоматические компенсаторы реактивной мощности.

Для часов максимума энергосистемы для предприятия задается в договоре величина эффективного (оптимального) значения коэффициента мощности

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = Q_3 / P_m,$$

где Q_3 — эффективная величина, потребляемой мощности во время часов максимальной нагрузки энергосистемы, квар.

Величина $\text{tg } \varphi_3$ с общегосударственной точки зрения определяется проведением комплексного расчета по питающей сети энергосистемы [3]. В результате этого каждому предприятию в отдельности задается на время максимума нагрузки энергосистемы величина оптимальной $\text{tg } \varphi_3$, отвечающей минимуму приведенных затрат по этой сети при соблюдении целого ряда технических ограничений. Например, в ЭССР не допускается генерация реактивной мощности в питающую сеть.

Таким образом, энергосбыт контролирует только фактические значения реактивных мощностей в максимальном и в минимальном режимах работы предприятия. Это позволяет предприятию, получая скидку на тариф электроэнергии, осуществить компенсацию с учетом требований качества напряжения на зажимах приемников.

В ЭССР на данной стадии внедрения [II] значения $\text{tg } \varphi_3$ задается практически всем предприятиям в пределах $\text{tg } \varphi_3 = 0,4 \dots 0$ и не допускается генерация реактивной мощности в энергосистему. Характеризуем вкратце основные положения [II].

Новая шкала представляет собой таблицу, по горизонтали которой отложены значения оптимального коэффициента мощности, а по вертикали максимальная величина $\text{tg } \varphi_m$, зафиксированная во время часов максимума энергосистемы в течение одного квартала. На пересечении их указаны скидки или надбавки к тарифам. Наибольшее значение скидки соответствует условию $\text{tg } \varphi_m = \text{tg } \varphi_3$, т.е. точному выполнению задания системы. Соблюдение этого условия требует различных затрат от потребителей. Чем ближе к нулю величина задаваемого $\text{tg } \varphi_3$, тем большие затраты требуются для обеспечения такой степени компенсации. Поэтому и степень стимулирования повышается при значениях $\text{tg } \varphi_3$, приближающихся к нулю. Так, выполнение условия $\text{tg } \varphi_m = \text{tg } \varphi_3$ при заданной величине $\text{tg } \varphi_3 = 0 \dots 0,05$ дает 8%-ную скидку с тарифа, в то время как выполнение того же условия при $\text{tg } \varphi_3 = 0,8$ дает только 1%-ную скидку.

Из рассмотренного следует, что предприятиям установление автоматических регулируемых компенсаторов реактивной мощности экономически выгодно и целесообразно.

При выборе конкретного схемного решения автоматического компенсатора рекомендуется исходить из:

- экономических показателей сравниваемых вариантов;
- надежности, простоты схемы и обслуживания установки;
- требуемого диапазона регулирования.

Характеристика компенсаторов реактивной мощности.

Наряду с применением традиционных источников реактивной мощности (синхронный генератор, двигатель и компенсатор, и нерегулируемые конденсаторные батареи) имеется множество отечественных и зарубежных разработок регулируемых статических компенсаторов реактивной мощности. Например, разработки ВЭИ, МЭИ, НИИ завода "Электровыпрямитель" г. Саранск, фирмы "ASEA" (Швеция), "Brown Boveri" (Швейцария), "Westinghouse" (США), "Nokia" (Финляндия) и др.

Накопительным элементом реактивной мощности в основном служат конденсаторы или разные реакторы. Регулирование конденсаторами осуществляется контактными или бесконтактными элементами. Особую группу создают статические компенсаторы реактивной мощности (СКРМ) на базе конденсаторов или реактора и тиристорного преобразователя с искусственной коммутацией, которые искажают форму кривой тока или напряжения таким образом, что ее первая гармоника опережает или отстает по фазе от неискаженной на требуемый угол. Подобные решения наряду с положительными свойствами обладают относительно сложной схемой, требующей применения большого количества силовых полупроводниковых приборов, которые подвергаются действию коммутационных перепадов напряжений.

У остальных СКРМ накопительным элементом является батарея конденсаторов, у которых регулирование отдаваемой реактивной мощности осуществляется:

- изменением числа включенных в работу конденсаторов;

- изменением напряжения на зажимах конденсаторов;
- изменением тока параллельно подключенного реактора.

Наибольшее распространение получило изменение числа конденсаторов, к которым можно отнести конденсаторные установки Усть-Каменогорского конденсаторного завода, снабженные регуляторами типа АРКОН. Увеличение числа коммутируемых ступеней позволяет приблизиться к эффекту плавной компенсации. Применение бесконтактных коммутационных устройств увеличивает быстродействие регулирования. Такое решение принято фирмой "ASEA" (Швеция) [4] и доведено до промышленного выпуска. Недостаток - ступенчатость регулирования.

Изменение напряжения на зажимах конденсаторов - исследовано в основном на экспериментальных установках [5] но практических реализаций до настоящего времени не имеется.

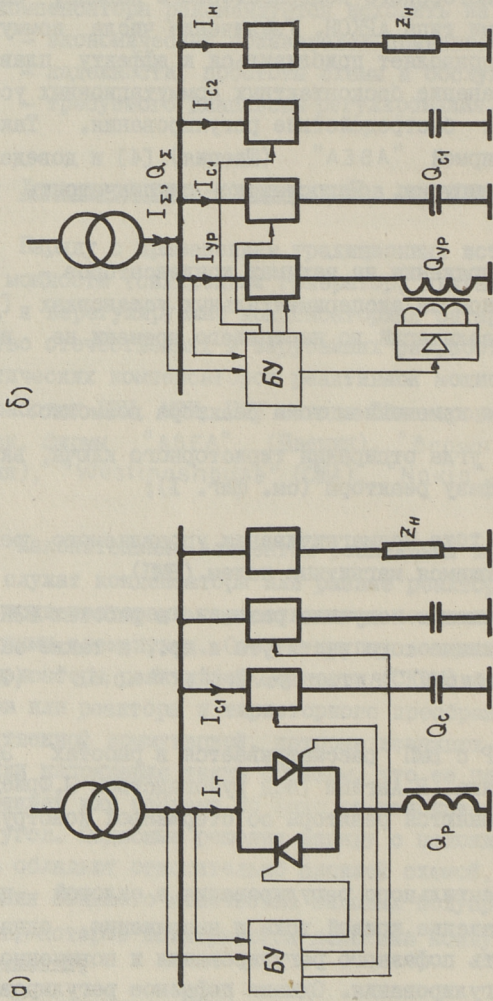
Регулирование изменением тока реактора возможно:

- изменением угла отпирания тиристорного ключа, включенного в каждую фазу реактора (см. фиг. 1);
- изменением тока подмагничивания управляемого реактора (УР) с вращающимся магнитным полем (ВМП).

Первое направление получило развитие в работах ВЭИ и Львовского политехнического института и др., а также за рубежом (например, фирмы "Brown Boveri", "Nokia" (Финляндия) и т.д.).

Применение УР с ВМП рассматривается в работах ЭНИН ЛПИ им. М.И.Калинина. В Англии (под руководством Э.Фриедлендера [6]) применяются реакторы со стержневой конструкцией.

Применение вентильного регулирования в силовой цепи обуславливает искажение кривой тока и напряжения, однако имеется возможность пофазного регулирования и повышенное быстродействие регулирования. Однако пофазное регулирование и повышение быстродействия требуются в специфических случаях. Поэтому применение УР с ВМП во многих случаях может оказаться более предпочтительным.



Фиг. 1. Схема статического компенсатора на базе конденсаторных батарей и неуправляемого (а) и управляемого (б) реактора.

Технико-экономические показатели известны [7] лишь для самих низковольтных и высоковольтных (6...10 кВ) конденсаторов: соответственно - 3,5 руб/квар и ~ 1,7 руб/квар. Для низковольтных автоматических контактно-регулируемых комплектных конденсаторов установок I4...I8 руб/квар (6..10 кВ соответственно 6...10 руб/квар). Например, удельная стоимость комплектных конденсаторных установок из серии ККУ-0,38 равна 13,5 руб/квар, а КУ-6,10 соответственно 6 руб/квар. Здесь не включена стоимость блока управления.

Из-за нехватки достоверных данных не приводим сравнения всех перечисленных СКРМ. Характеризуем лишь СКРМ с подмагничиваемым реактором и реактором с вентильным управлением. Отличие в удельных стоимостях СКРМ обусловлено различным типом реакторов. По данным ВЭИ удельная стоимость тиристоров - 0,75 руб/квар, конденсаторов - 7,93 руб/квар, реактора - 4,77 руб/квар. Очевидно, при рассмотрении стоимости конденсаторов неполностью учтены стоимость монтажа и коммутационных устройств. Поэтому в обоих сравниваемых вариантах удельную стоимость конденсаторов примем равной 13,5 руб/квар, как у ККУ-0,38. Ввиду отсутствия сведений по строительным и монтажным работами по потерям активной энергии у такого реактора, а также по системе управления СКРМ с вентильно-управляемым реактором, мы их во внимание у этого СКРМ не принимаем. Тогда $k = 19,02$ руб/квар (см. фиг. 2, кривая 2).

В случае УР с ВМП из-за отсутствия их серийного производства удельную стоимость реактора примем равной двукратной стоимости трансформатора такой же мощности. Эта величина завышена, но позволяет оценить конкурентоспособность такого решения. Удельная стоимость СКРМ на базе управляемого реактора с ростом мощности уменьшается. Здесь учитываются также все строительно-монтажные работы, потери и стоимость системы управления. Принимая мощность ступеней конденсаторных батарей Q_k и реактора $Q_p = 1,5 Q_k$, на фиг. 2 (кривая I) приведена зависимость удельной стоимости СКРМ от номинальной мощности СКРМ при номинальном напряжении 0,4 кВ. При сопоставлении выбрано наиболее дорогое решение с $Q_p = 1,5 Q_k$. Рациональная мощность УР $Q_k \leq Q_p \leq 1,5 Q_k$. При таком сравнении с фиг. 2 следует, что начиная с мощнос-

ти 940 квар СКРМ с управляемым реактором дешевле, а при напряжении 6...10 кВ вариант с управляемым реактором при любой мощности дешевле и более предпочтительнее. Поэтому в дальнейшем рассмотрим только вариант с УР с ВМП.

Кривая I на фиг. 2 построена на основе данных фиг. 6.

Статический компенсатор на базе УР с ВМП

Силовая схема СКРМ на базе управляемого реактора представлена на фиг. 1,б. Для изучения свойств СКРМ и для разработки системы управления была изготовлена лабораторная установка по схеме фиг. 1,б, содержащая 6 секций конденсаторных батарей мощностью 2,5 квар каждая и два управляемых реактора мощностью 6 квар. Система автоматического управления с СКРМ осуществлена по отклонению от заданных значений как потребляемой реактивной мощности, так и напряжения. Общий вид лабораторной СКРМ представлен на фиг. 3. В качестве коммутационных аппаратов использованы тиристорные выключатели на базе тириستоров ТЛ-160.

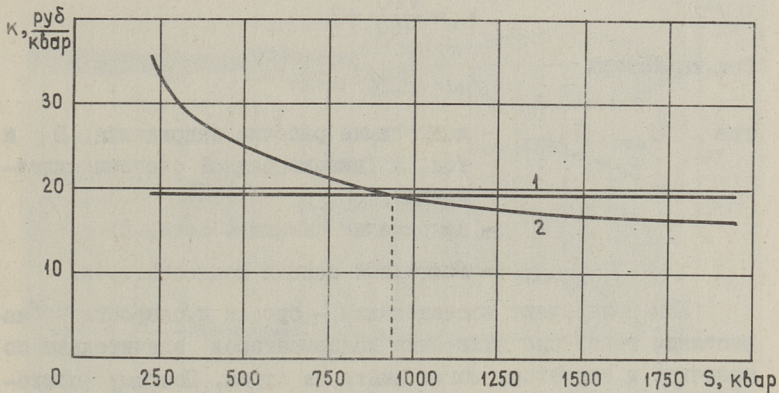
На фиг. 4 представлена осциллограмма переходного процесса включения трех секций конденсаторов при увеличении реактивной нагрузки потребителя. Нагрузка растет за время 0,1...0,25 с. Далее система управления включает поочередно требуемое количество секций конденсаторов (моменты времени 0,85; 1,35 и 1,85 с) с задержкой 0,5 с и переходит в режим плавного регулирования. На осциллограмме виден переходный процесс с некоторым перерегулированием и с последующей стабилизацией на заданном уровне. В конце осциллограммы нагрузка уменьшается и начинается следующий переходный процесс. Задержка коммутации конденсаторов регулируема от 0,2 ...40 с.

Как выбраны тиристоры для тиристорного выключателя?

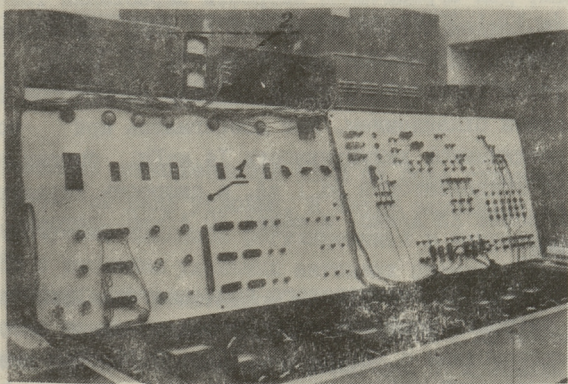
В общем случае класс тириستоров выбирается по формуле:

$$K_T = \frac{U_{\text{дон}}}{100} = \frac{2\sqrt{2}U}{100} + 2.$$

При включении конденсаторов в треугольник и при применении сопротивлений для выравнивания напряжения



Фиг. 2. Удельная стоимость статического компенсатора на базе УР с ВМП (1) и управляемого с тиристорными выключателями реактора (2).



Фиг. 3. Лабораторный статический компенсатор (1) и система автоматического управления (2).

на тиристорах

$$K_T = \frac{\sqrt{2}U}{100} + 2.$$

Ток тиристора

$$I_{\text{доп}T} \geq 0,5 I_{\text{секц}},$$

где $U_{\text{доп}}$, $I_{\text{доп}T}$ - допустимые рабочие напряжения, В и ток, А (для выбранной системы охлаждения);

U - напряжение питающей сети, В;

$I_{\text{секц}}$ - ток одной секции конденсаторов.

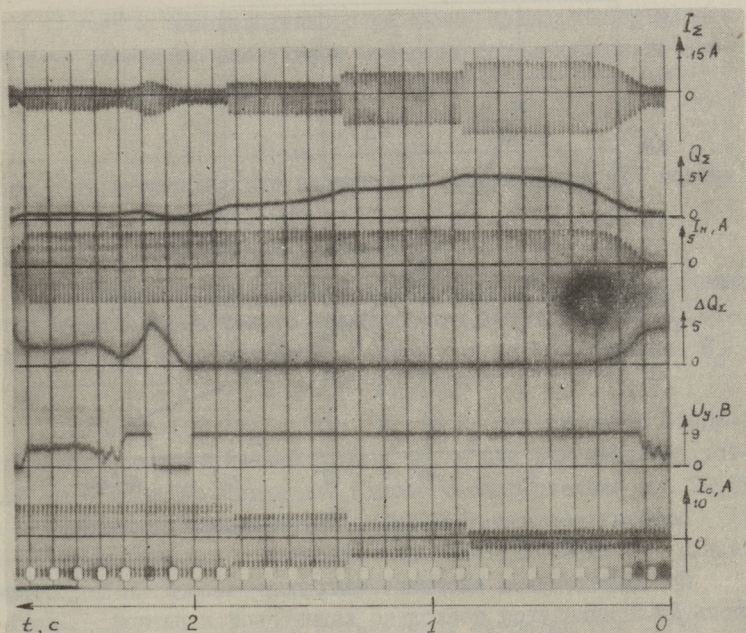
Как показывают исследования - броски и скорости нарастания токов при включении конденсаторов значительны по величине и тиристоры могут выйти из строя. Поэтому приходится использовать последовательно включенные индуктивности для уменьшения скорости нарастания тока при включении конденсатора.

Например, в разработанной ступенчато-регулируемой конденсаторной установке (внедренной на Тартуском опытном заводе пластмассовых изделий), при мощности трансформаторов 2x630 кВА, для ограничения скорости нарастания тока при включении конденсаторов мощностью 50 квар применяются последовательно включенные индуктивности 14 мГн. При этом используются тиристорные ключи на базе тиристоров ТЛ-160 с естественным охлаждением. Там достигались при последовательно соединенной индуктивности 14 мГн, броски токов при включении конденсаторов до 1 кА, а скорость нарастания токов была более 15 А/мкс и менее 40 А/мкс, которая является допустимой.

Внедрение автоматического компенсатора 12x50 квар позволило улучшить коэффициент мощности во время часов максимума энергосистемы с $\text{tg } \varphi_m = 0,35$ до 0,10. При этом годовой экономический эффект составляет 25,3 тыс.рублей и срок окупаемости регулятора получился менее 0,4 года.

Определение рационального числа секций конденсаторных батарей СКРМ

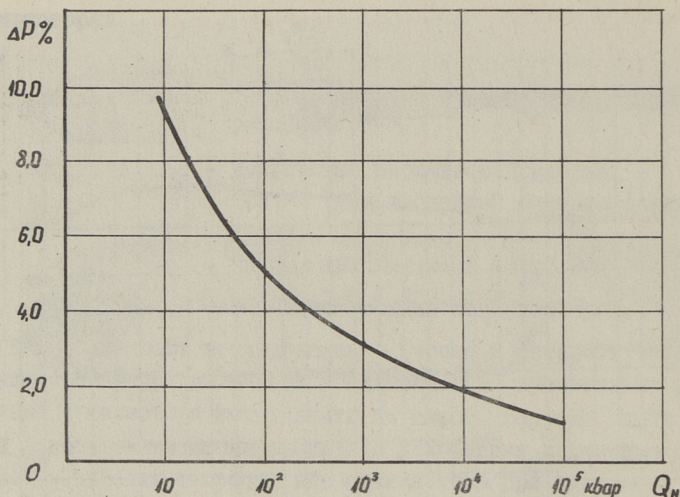
Выше было указано о целесообразности применения плавно регулируемых СКРМ. Техническая возможность и экономическая



Фиг. 4. Осциллограмма переходного процесса СКРМ. I_c ; I_n ; I_z - ток конденсатора, нагрузки и сети; U_y - напряжение управления реактора; Q_z - выходной сигнал датчика реактивной мощности В; ΔQ_x - сигнал рассогласования по Q.

целесообразность использования СКРМ на базе управляемого реактора зависит от ряда условий. К числу важнейших из них относятся требуемый диапазон регулирования в индуктивном квадранте СКРМ и величина удельных активных потерь в нем на I квар генерируемой реактивной мощности. Последняя величина определяется техническими параметрами СКРМ и является функцией режима работы управляемого реактора. В номинальном режиме, как показывают расчеты^х, величина активных потерь ΔP определенным образом зависит от номинальной мощности реактора. Эта зависимость представлена на фиг. 5.

^х Зависимость $\Delta P = f(Q_n)$ определена для оптимизированных УР инженером И.Теллинеом.



Фиг. 5. Зависимости активных потерь от мощности управляемого реактора.

При определении экономических показателей СКРМ стоимость УР принимается несколько завышенной и равной двухкратной стоимости трансформатора той же мощности. Для снижения числа коммутации конденсаторов при переходе от одной секции к другой мощность реактора выбрана $Q_p = 1,5 Q_{\text{секц}} \leq Q_{\text{ком.н.}}$. В действительности имеются определенные возможности снижения номинальной мощности Q_p , что улучшает экономические показатели СКРМ. Стоимость системы управления не зависит от ее мощности. При расчете ее стоимость примем равной стоимости системы, разработанной в ТПИ (на базе интегральных микросхем и транзисторов) и внедренной на Тартуском опытном заводе пластмассовых изделий. Последняя не включает системы управления реактора и составляет примерно $1000 + n \cdot 75$ руб, где n — число (ступеней) секций СКРМ. Приближенная стоимость блока управления реактора равна 800 рублям. Тогда стоимость системы управления составляет $1800 + n \cdot 75$ рублей. Монтаж и наладка управления составляет примерно 7% от её стоимости. Удельная стоимость конденсаторных установок серии ККУ-0,38 равна 13,5 руб/квар [8]. В [8] для конденсаторных установок приведена также стоимость монтажных и строительных работ.

С учетом вышеизложенного удельные приведенные затраты СКРМ на генерацию реактивной мощности определяются из следующего выражения [2]

$$z = \frac{3}{Q_{\text{ном}}} = (EK + I) / Q_{\text{ном}},$$

где K – капитальные вложения в сооружение и на монтаж объекта, руб.;

I – текущие затраты, руб.

Ежегодные отчисления от капитальных вложений определяются суммой нормативного коэффициента эффективности E_H , отчислений на амортизацию E_a и расходов на обслуживание E_0

$$E = E_H + E_a + E_0.$$

Согласно [2] $E_H = 12\%$; E_a и E_0 для силового оборудования – соответственно 6,3% и 4%, а для регулирующих устройств – 12 и 3%. Тогда для силового оборудования $E = 22,3\%$, а для системы управления 27%. Для СКРМ текущие затраты I состоят из потерь активной мощности и зависят от к.п.д. реактора, конденсаторов и тиристорного выключателя.

Сравним по удельным приведенным затратам три СКРМ. У первых двух ступенчатое регулирование реактивной мощности. Оно осуществляется коммутацией конденсаторов с контакторами и тиристорными выключателями. Третий СКРМ выполнен по схеме фиг. 1,б, где плавное регулирование осуществляется при помощи управляемого реактора, а коммутация конденсаторов контакторами.

Капитальные вложения конденсаторной установки с контакторами $K_{\Sigma K}$, тиристорными выключателями $K_{\Sigma T}$, управляемым реактором $K_{\Sigma UR}$ равны:

$$K_{\Sigma K} = k_k Q_{\text{ном}} + K_y;$$

$$K_{\Sigma T} = k_k Q_{\text{ном}} - n_{\text{ккУ}} K_{\text{кв}} + n_{\text{тв}} K_{\text{тв}} + K_y;$$

$$K_{\Sigma UR} = k_k Q_{\text{ном}} + K_{\text{ур}} + K_y,$$

где k_k – удельная стоимость комплексной конденсаторной установки из серии ККУ-0, 38–80, руб/квар. $k_k = 13,5$ руб/квар;

Q_n – номинальная мощность компенсатора, квар;

K_y – стоимость блока управления;

- $n_{\text{ккы}}$ - число ККУ-0,38-80, шт;
 $K_{\text{кв}}$ - стоимость контактора в ККУ-80, заменяемого тиристорным выключателем, руб. $K_{\text{кв}} = 57$ руб;
 $n_{\text{тв}}$ - число тиристорных выключателей, шт;
 $K_{\text{тв}}$ - капитальные вложения на тиристорный выключатель, руб;
 $K_{\text{ур}}$ - капитальные вложения на УР, руб.

Рассмотрим пример определения удельных приведенных затрат СКРМ на генерацию реактивной мощности. Исходные данные представим в таблице I. Пусть номинальная мощность СКРМ составляет $Q_{\text{ном}} = 240$ квар. Тогда суммарная мощность всех секций конденсаторных батарей (КБ) равна 240 квар и состоит из трех панелей ККУ-0,38-I, 80 квар.

Согласно [8] в таблице I удельные капитальные вложения для одноступенчатого компенсатора для рассматриваемых вариантов:

$$K_{\Sigma \text{к}} = \frac{1}{Q_{\text{ном}}} K_{\Sigma \text{к}} = \frac{1}{Q_{\text{ном}}} (k_{\text{к}} Q_{\text{ном}} + K_{\text{у}}) = (13,5 \cdot 240 + 1430) / 240 = 19,5 \text{ руб/квар};$$

$$K_{\Sigma \text{к}} = \frac{1}{Q_{\text{ном}}} K_{\Sigma \text{т}} = Q_{\text{ном}} (k_{\text{к}} Q_{\text{ном}} - n_{\text{ккы}} K_{\text{кв}} + n_{\text{тв}} K_{\text{тв}} + K_{\text{у}}) = (13,5 \cdot 240 - 3 \cdot 57 + 3 \cdot 350 + 1430) / 240 = 23,1 \text{ руб/квар};$$

$$K_{\Sigma \text{ур}} = \frac{1}{Q_{\text{ном}}} K_{\Sigma \text{ур}} = \frac{1}{Q_{\text{ном}}} (k_{\text{к}} Q_{\text{ном}} + K_{\text{ур}} + K_{\text{у}} + K_{\text{фм}}) = (13,5 \cdot 240 + 2560 + 2290 + 1070) / 240 + 9160 / 240 = 38,2 \text{ руб/квар}.$$

Здесь стоимость УР принимается равной двухкратной стоимости трансформатора той же мощности, а стоимость монтажа и строительной части принята как у трансформатора, равной мощности [8].

Предполагаем, что компенсатор установлен на предприятии с двухсменной работой. Тогда текущие затраты у сравниваемых вариантов следующие:

Капитальные вложения на СКРМ

| Наименования | Номинальный ток, А | Стоимость электрической части, руб | | Итого | Строительная часть | | Общая стоимость | Удельная стоимость руб/квар |
|--|--------------------|------------------------------------|----------------------|------------|-----------------------|-----------|-----------------|-----------------------------|
| | | оборудования | материалов и монтажа | | объем, м ³ | стоимость | | |
| Конденсаторная установка ККУ-0, 38-I, 80 квар | 120 | 775 | 25 | 800 | 25 | 280 | 1080 | 13,5 |
| Тиристорный выключатель с тиристорами: ТЛ-250-8 | 130 | 323 | 27 | 350 | - | - | 350 | 4,4 |
| ТЛ-160-8 | 80 | 262 | 18 | 280 | - | - | 280 | 5,6 |
| Блок управления: ступенчатого регулятора $K_y = 1000 + n \cdot 75$; | - | K_y | $0,07 K_y$ | $1,07 K_y$ | 25 | 280 | - | - |
| плавного регулятора $K_y = 1600 + n \cdot 75$ | - | K_y | $0,07 K_y$ | $1,07 K_y$ | 30 | 340 | - | - |
| Фидер питания управляемого реактора и блока выпрямителя системы управления | 1000 | 700 | 90 | 790 | 25 | 280 | 1070 | - |
| | 1500 | 940 | 90 | 1030 | 25 | 280 | 1310 | - |
| | 2000 | 1070 | 90 | 1160 | 25 | 280 | 1440 | - |

$$I_k = \eta_k Q_{\text{ном}} t_{kv} = 0,004 \cdot 240 \cdot 3232 \cdot 0,0092 = 29 \text{ руб};$$

$$I_T = \eta_{Tb} (3 \Delta U_T I_T + 6 P_y) t_{Tv} = \\ = 3 (3 \cdot 1,5 \cdot 120 + 6 \cdot 30) \cdot 3232 \cdot 0,092 = 64 \text{ руб};$$

$$I_{yp} = \eta_{yp} Q_{ypn} t_{ypv} = 0,038 \cdot 240 \cdot 2020 \cdot 0,0092 = 163 \text{ руб}.$$

Здесь t_k, t_T, t_{yp} - годовое число использования конденсаторов, тиристорных выключателей и УР.

Тогда $t_k = t_T = 0,8 \cdot 4040 = 3232$ ч/год

и $t_{yp} = 0,5 \cdot 4040 = 2020$ ч/год;

v - стоимость потерь электроэнергии, руб/кВтч. $v = 0,0092$;

$\Delta U_T, I_T$ - падение напряжения, В и ток, А, тиристорного выключателя;

P_y - потери на управление одного тиристора.

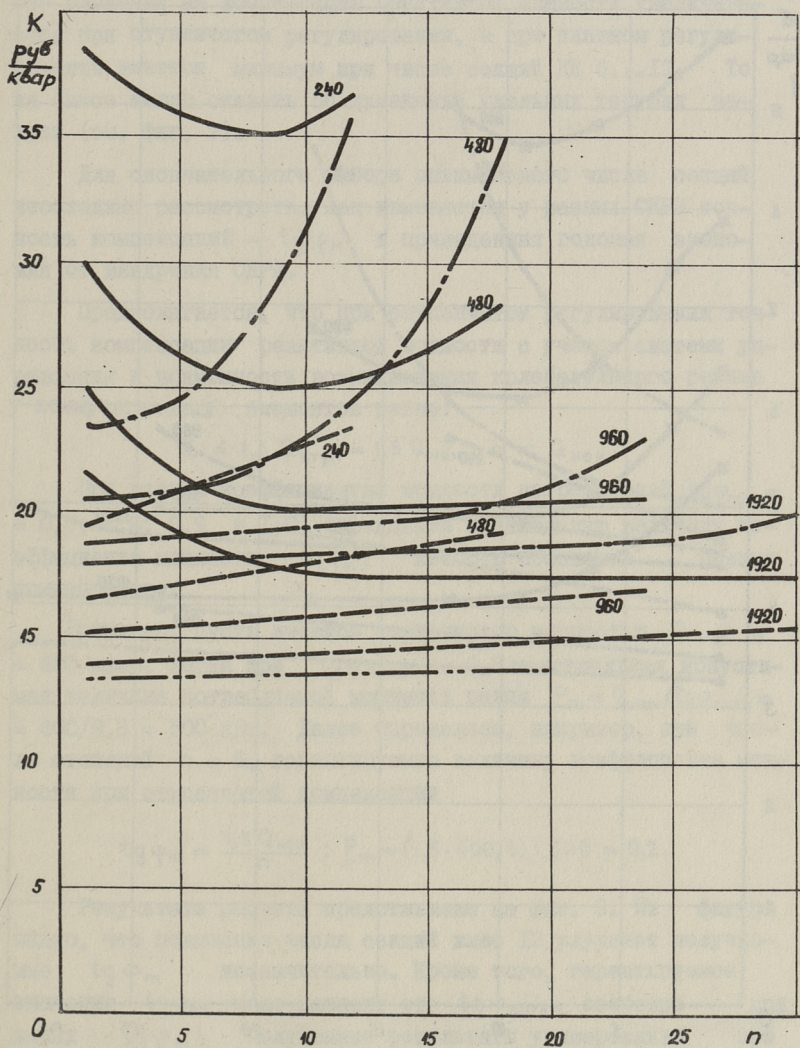
Далее определяем величину удельных приведенных затрат на генерацию реактивной мощности для трех сравниваемых вариантов:

$$z_k = [E(K_{k\varepsilon} - P_y) + E_y P_y + I_k] \cdot 1/Q_{\text{ном}} = \\ = [0,223(4670 - 1150) + 0,27 \cdot 1430 + 29] 1/240 = \\ = 4,7 \text{ руб/квар год};$$

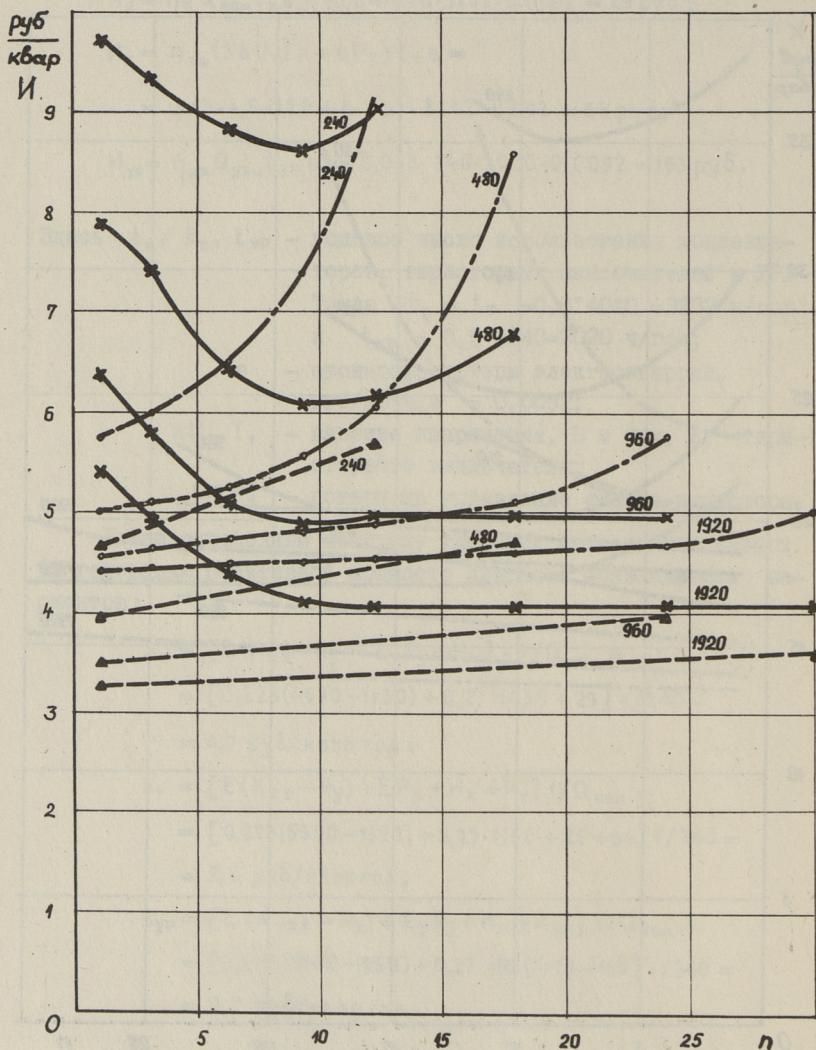
$$z_T = [E(K_{T\varepsilon} - P_y) + E_y P_y + I_k + I_T] 1/Q_{\text{ном}} = \\ = [0,223(5550 - 1150) + 0,27 \cdot 1150 + 29 + 64] 1/240 = \\ = 5,8 \text{ руб/квар год};$$

$$z_{yp} = [E(K_{yp\varepsilon} - P_y) + E_y P_y + I_k + I_{yp}] 1/Q_{\text{ном}} = \\ = [0,223(9160 - 1950) + 0,27 \cdot 1950 + 29 + 169] 1/240 = \\ = 9,7 \text{ руб/квар год}.$$

Аналогично найдены удельные капитальные вложения и удельные текущие затраты на генерацию 1 квар реактивной мощности для СКРМ, у которых число ступеней разное и равное 2 ... 30. Те же расчеты выполнены для СКРМ мощностью компенсаторов 480, 960 и 1920 квар. Результаты расчетов представлены графически на фиг. 6 и фиг. 7.



Фиг. 8. Зависимость удельной стоимости СКРМ 0,4 кВ от номинальной мощности и числа секции конденсаторной батареи.
 - - - - - СКРМ с контакторной коммутационной аппаратурой;
 - - - - - СКРМ с тиристорными выключателями;
 - - - - - СКРМ с плавным регулированием;
 - - - - - комплектная конденсаторная установка ККУ-0,38.



Фиг. 7. Зависимость удельных текущих затрат на компенсацию 1 квар от мощности СКРМ и числа секций конденсаторной батареи.
 - - - - - СКРМ с контакторными коммутационными аппаратами;
 - · - · - СКРМ с тиристорными выключателями;
 ———— СКРМ с плавным регулированием на базе УР.

Из фиг. 6 видно, что с ростом числа секций капитальные вложения на компенсацию реактивной мощности увеличиваются при ступенчатом регулировании, а при плавном регулировании имеется минимум при числе секций КБ 6...12. То же самое можно сказать об изменении удельных текущих затрат (см. фиг. 7).

Для окончательного выбора оптимального числа секций необходимо рассмотреть, как изменяется у разных СКРМ точность компенсаций — $\text{tg}\varphi_m$ и приведенная годовая экономия от внедрения СКРМ.

Предполагается, что при ступенчатом регулировании точность компенсации реактивной мощности с учетом системы управления и возможности возникновения колебательного режима у коммутационных элементов равна:

$$Q \leq 1,5 Q_{\text{ступ}} = 1,5 Q_{\text{ном}} : n \leq Q_{\text{ном}}$$

При разных коэффициентах мощности потребителей ($\text{tg}\varphi_{\text{потр}} = 0,7; 0,8; 0,9$ и $1,0$) определяем минимальную величину коэффициента мощности $\text{tg}\varphi_m$, которую обеспечат разные компенсаторы.

Например, пусть имеется компенсатор мощностью $Q_{\text{ном}} = 400$ квар. Тогда при $\text{tg}\varphi_{\text{потр}} = 0,8$ максимальная допустимая величина потребляемой мощности равна $P_m = Q_{\text{ном}}/\text{tg}\varphi_{\text{потр}} = 400/0,8 = 500$ кВт. Далее определяем, например, при числе степеней $n = 6$, гарантируемую величину коэффициента мощности при ступенчатой компенсации

$$\text{tg}\varphi_m = \frac{1,5 Q_{\text{ном}}}{n} : P_m = (1,5 \cdot 400/6) : 500 = 0,2.$$

Результаты расчета представлены на фиг. 8. Из фигуры видно, что повышение числа секций выше 12 улучшает получаемые $\text{tg}\varphi_m$ незначительно. Кроме того, гарантируемое значение $\text{tg}\varphi_m$ мало зависит от $\text{tg}\varphi_{\text{потр}}$, особенно при малых $\text{tg}\varphi_m$. Полученные результаты универсальны при любой мощности.

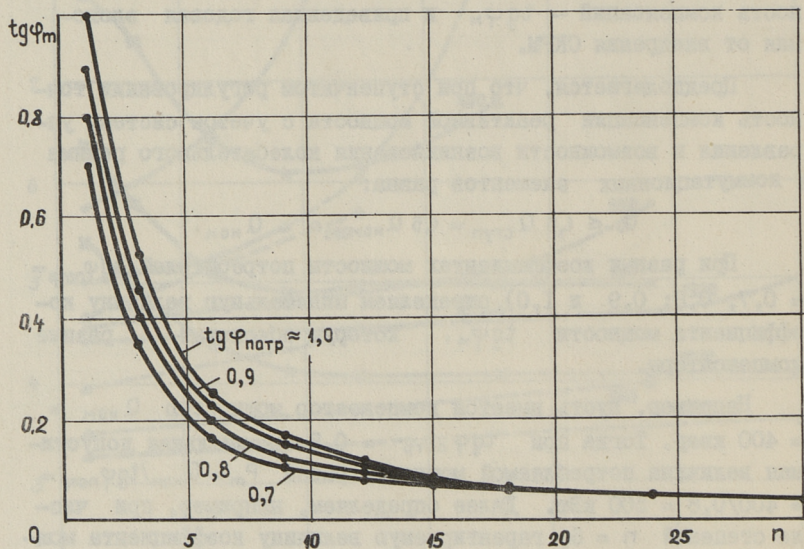
Для оценки получаемой годовой экономии от компенсации реактивной мощности, предполагаем, что на предприятии двухсменная работа и средняя нагрузка подстанции $p = 0,8 P_m$. Тогда удельная оплата за электроэнергию

$$B_0 = B_0 / Q_{\text{ном}} = (\alpha P_m + \beta W_\alpha) / Q_{\text{ном}} =$$

$$= (64,9 \cdot 500 + 0,0092 \cdot 0,8 \cdot 500 \cdot 4040) : 200 = 118,2 \text{ руб/квар}\cdot\text{год}$$

Пусть заданный оптимальный $\text{tg} \varphi_\varnothing = 0$, тогда за компенсацию реактивной мощности

$$B_\varphi = \pm K_\varphi B_0 = -0,02 \cdot 118,2 = -2,4 \text{ руб/квар}\cdot\text{год}.$$

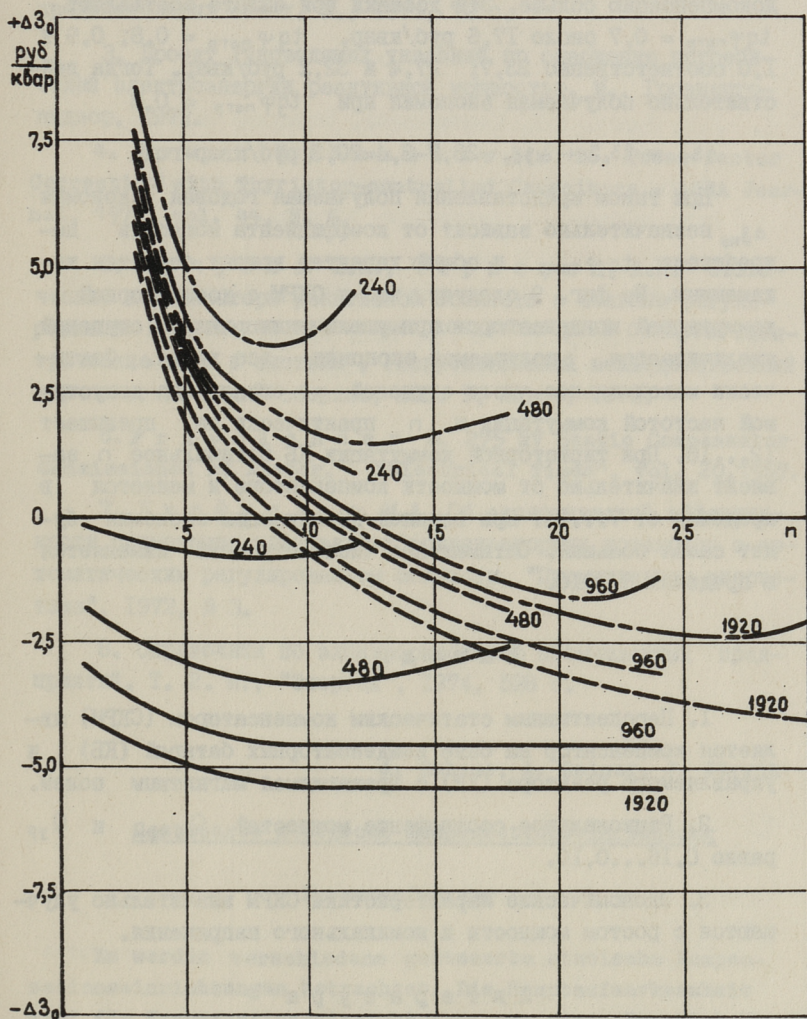


Фиг. 8. Максимально возможная точность поддержания $\text{tg} \varphi_m$ при ступенчатом регулировании СКРМ в зависимости от числа секций конденсаторной батареи.

Годовая экономия от компенсации Q определяется как разность между затратами на компенсацию z_k и экономией за счет скидки или добавки на электроэнергию v_φ

$$\Delta z_{k0} = v_\varphi - z_k = 2,4 - 5,8 = -3,4 \text{ руб/квар}\cdot\text{год}.$$

Результаты расчета представлены на фиг. 9. При оценке полученных результатов необходимо иметь в виду, что фактически полученная годовая экономия благодаря добавке за не-



Фиг. 8. Получаемый от внедрения СКРМ годовой экономический эффект.

Работа двухсменная. $\text{tg} \varphi_{\text{потр}} = 0,8$.

- СКРМ контактно-коммутационной аппаратурой;
- · - · - · СКРМ с тиристорными выключателями;
- СКРМ с плавным регулированием.

докомпенсацию больше. Эти добавки при оплате составляют $\text{tg} \varphi_{\text{потр}} = 0,7$ около 17,6 руб/квар, $\text{tg} \varphi_{\text{потр}} = 0,8$; 0,9 и 1,0 соответственно 23,7; 27,4 и 32,2 руб/квар. Тогда действительно получаемая экономия при $\text{tg} \varphi_{\text{потр}} = 0,8$

$$\Delta z_k = 23,7 + \Delta z_{\text{ко}} = 23,7 - 3,4 = 20,3 \text{ руб/квар-год.}$$

При таком представлении получаемая годовая экономия $\Delta z_{\text{ко}}$ незначительно зависит от коэффициента мощности потребителя $\text{tg} \varphi_{\text{потр}}$ и общий характер кривых остается неизменным. Из фиг. 9 следует, что у СКРМ с контакторной коммутацией конденсаторов при увеличении числа ступеней увеличивается получаемая экономия все время. Фактически максимальное число ступеней n ограничено допустимой частотой коммутации и n практически не превышает 12...16. При тиристорной коммутации КБ оптимальное n зависит значительно от мощности компенсатора и меняется в пределах от 7...24. При плавной компенсации экономия будет самая большая. Оптимальное число ступеней изменяется в пределах 6...10.

В ы в о д ы

1. Перспективным статическим компенсатором (СКРМ) является компенсатор на базе конденсаторных батарей (КБ) и управляемого реактора (УР) с вращающимся магнитным полем.

2. Рациональное соотношение мощностей $Q_{\text{скрм}}$ и $Q_{\text{ур}}$ равно 0,16...0,10.

3. Экономические характеристики СКРМ значительно улучшаются с ростом мощности и номинального напряжения.

Л и т е р а т у р а

1. Прейскурант оптовых цен № 09-01. Тарифы на электрическую и тепловую энергию, отпускаемую энергосистемами и электростанциями Министерства энергетики и электрификации СССР. М., 1966 и дополнение № 58 "Шкала скидок и надбавок к тарифам на электроэнергию за компенсацию реактивной мощности".

2. Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях. М., 1974, 72 с.

3. Проект Руководящих указаний по снабжению потребителей электроэнергии реактивной мощностью. М., Госэнергонадзор, 1972.

4. Frank H., Landström Bo. Power-factor Correction with Thyristor-controlled Capacitors.- ASEA Journal, 1971, vol. 44, N. 6.

5. Кучумов Л.А., Черновец А.К. Статические компенсаторы реактивной мощности с плавным регулированием напряжения на зажимах конденсаторной батареи. "Электрические сети и системы", Республиканский межведомственный научно-технический сборник, вып. 9, Львов, 1972.

6. Friedlander E. 275 kV Static Compensator Commissioned at Exeter. - "Electrical Times", vol. 20, 1967.

7. Лутфуллин М.А. Об экономической эффективности применения комплектных конденсаторных установок с автоматическим регулированием мощности. "Промышленная энергетика", 1972, № 3.

8. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Т. 2. М., "Энергия", 1974, 528 с.

A. Rebane, A. Reiner, J. Järvik

Gesteuerte statische Kompensationseinrichtung

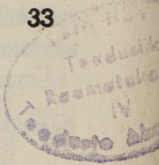
Zusammenfassung

Es werden verschiedene gesteuerte statische Kompensationseinrichtungen betrachtet. Die Hauptaufmerksamkeit wird für Kompensationseinrichtungen aus einer Parallel-Kondensatorbatterie und einer gesteuerten Drehfeldrossel zugewendet.

Es wird die optimale Sektionszahl der Kondensatorbatterie gewählt und die Ökonomiefragen der Kompensationseinrichtungen behandelt.

С о д е р ж а н и е

1. Л.Э. Варик, Г.К. Самолевский. Формуляр расчета основных электромагнитных и геометрических параметров двухфазного асинхронного исполнительного двигателя с аксиальным потоком. 3
2. А.Н. Олегин, Я.Я. Ярвик. Цифровая модель магнитной цепи с вращающимся магнитным полем. . . 17
3. А.Т. Ребане, А.П. Рейнер, Я.Я. Ярвик. Статический компенсатор реактивной мощности. 33



© ТПИ, Таллин, 1977

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Труды ТПИ № 437
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ
УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
Электромеханика УП
Редактор Р. Вырк. Техн. редактор В. Ранник
Сборник утвержден коллегией Трудов ТПИ 17 июня 1977 г.
Подписано к печати 9 янв. 1978 г. Бумага 60x90/16
Печ. л. 3,5 + 0,125 приложение. Уч.-изд. л. 3,1
Тираж 300. МВ-02201
Ротапринт ТПИ, Таллин, ул. Коскла, 2/9. Зак. № 132
Цена 47 коп.

Цена 47 коп.

EESTI AKADEEMILINE RAAMATUKOGU



1 0200 00133798 3