

Расчет компенсационных витков для катушек Роговского

Инженерный центр «Энергосервис», Андреев П. И.

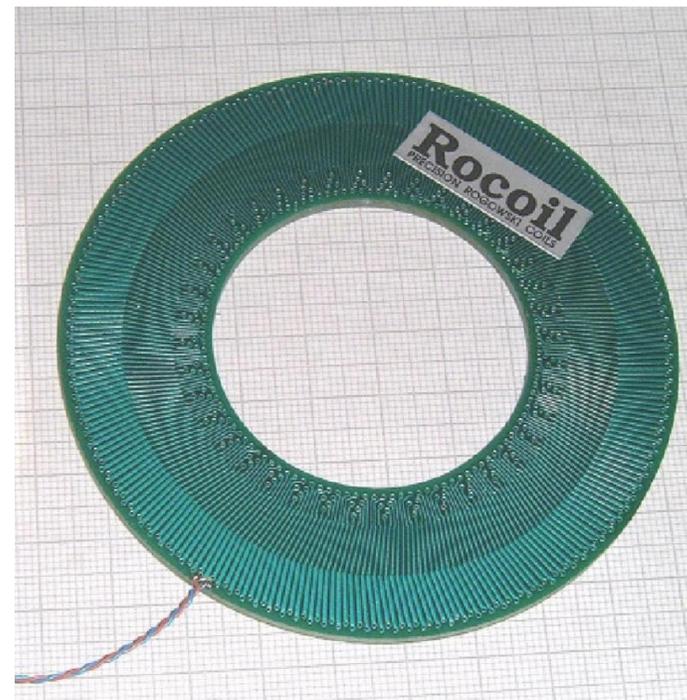
Архангельск
2024



С гибким сердечником



С жестким сердечником



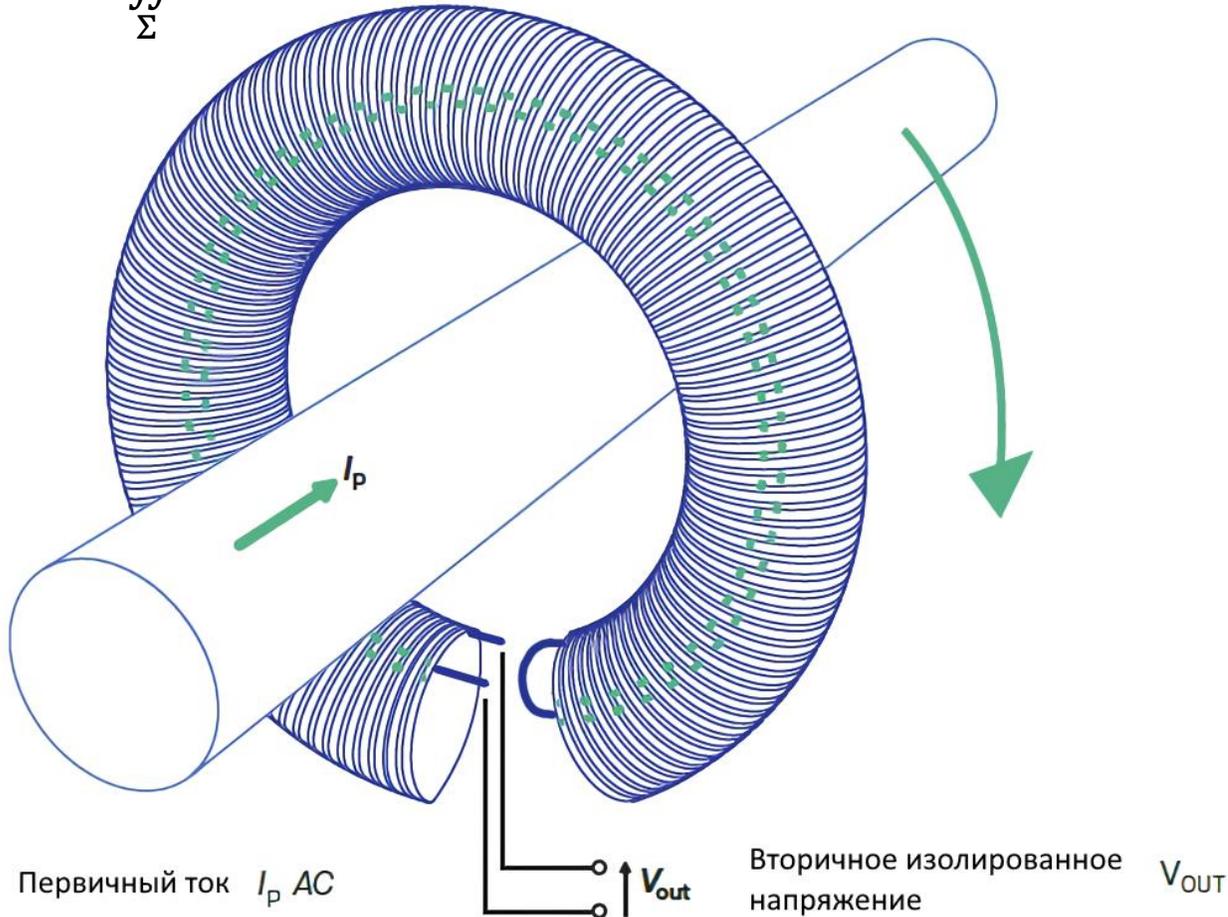
На печатных платах

Магнитный поток

$$\Phi_B = \iint_{\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

Закон Фарадея

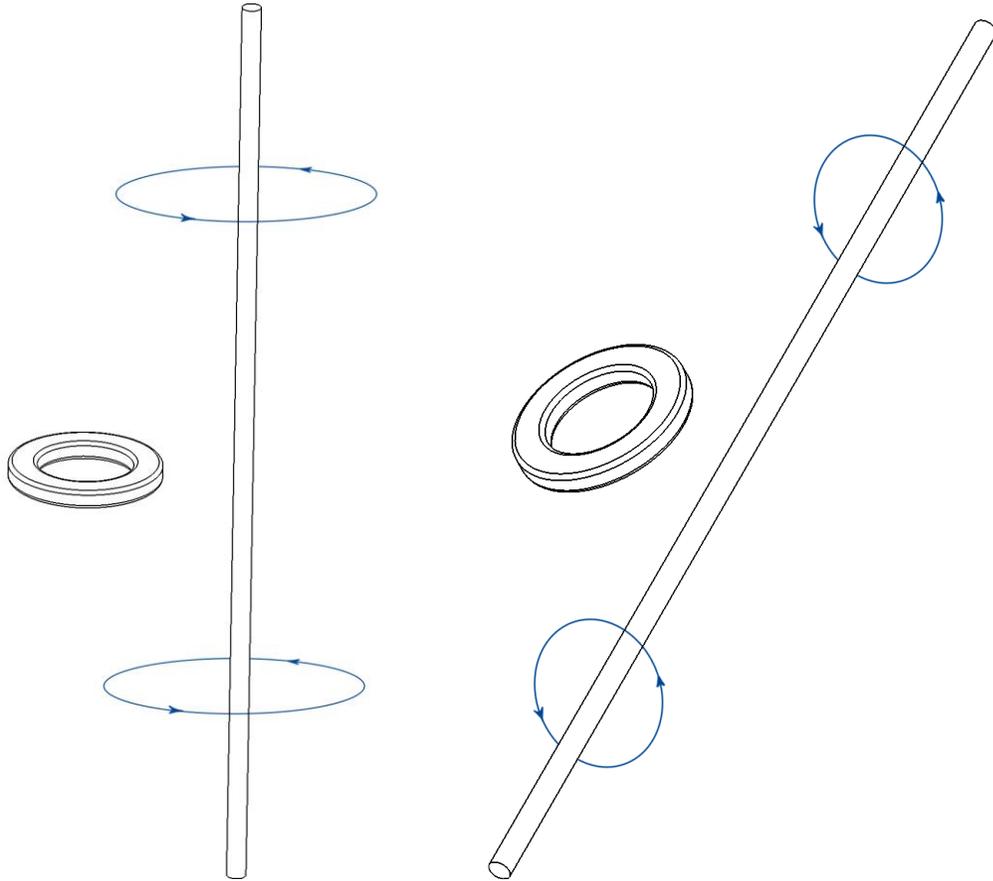
$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$



Катушка без сердечника (каркаса) или на каркасе из немагнитного материала.

- Отсутствие сердечника приводит к отсутствию проблем с насыщением.
- На диапазоне частот до резонансной обеспечивается высокая линейность и стабильность угла.
- Катушка имеет малый выходной сигнал (мВ/А) и мощность.
- Выходной сигнал катушки дифференцированный и требует интегратора для восстановления изначального сигнала.

Тесты

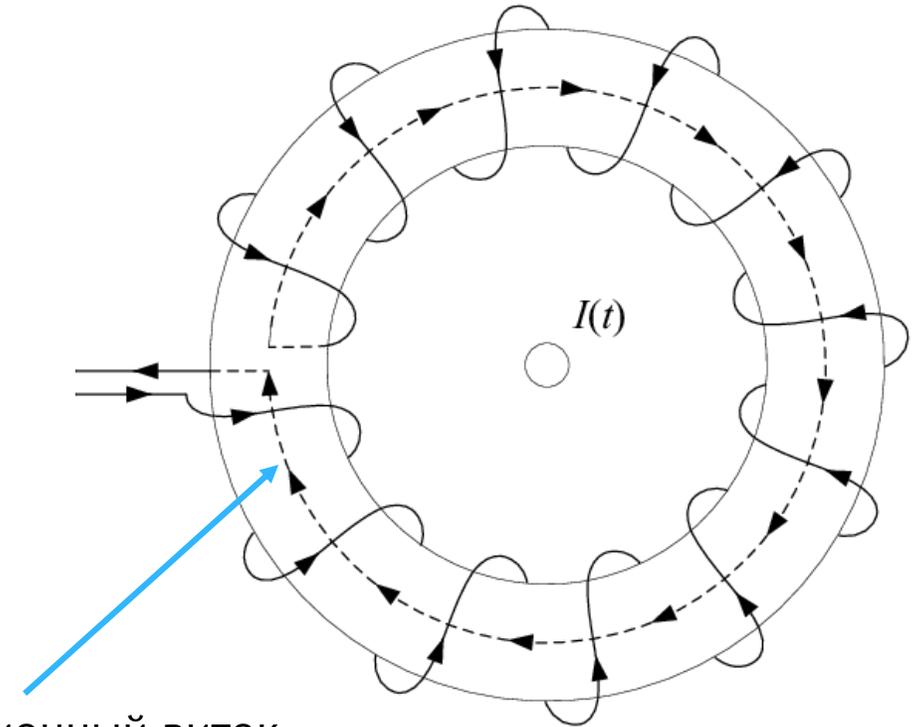


Перпендикулярный

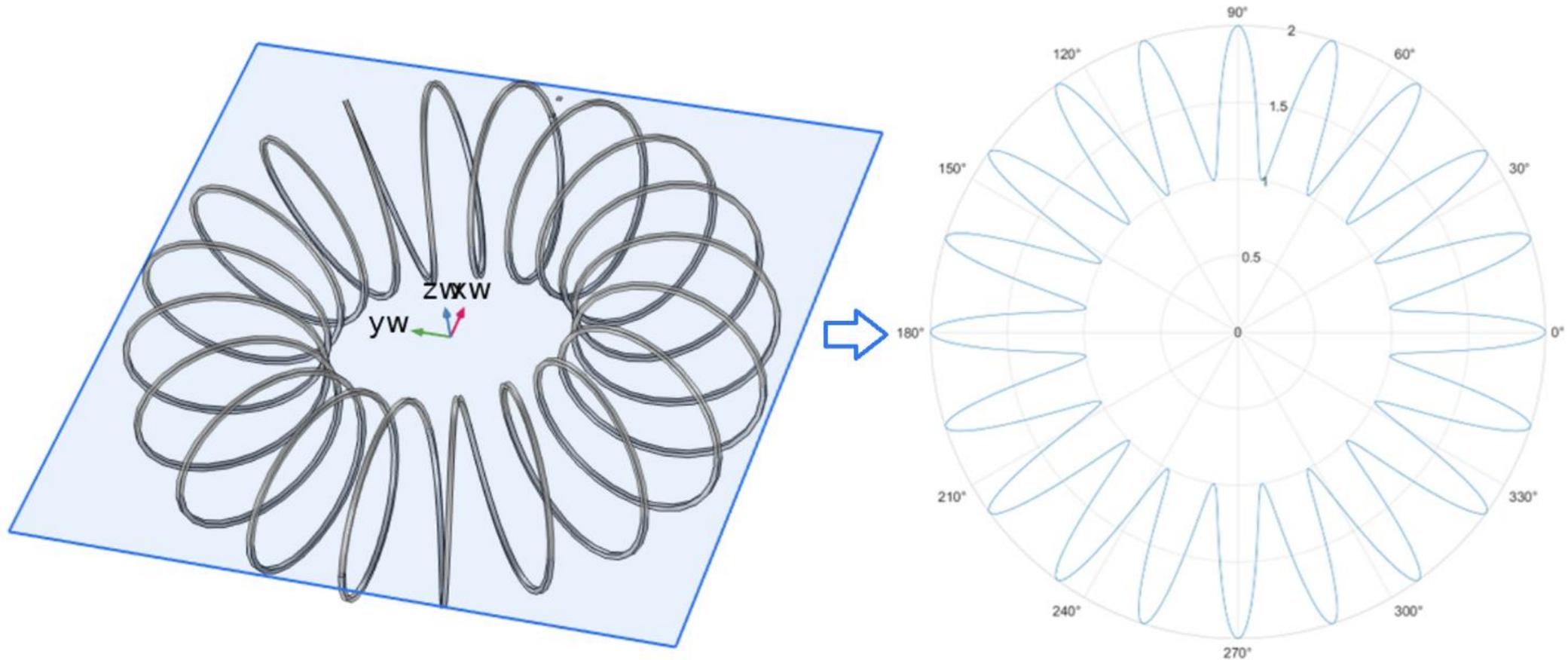
Параллельный

Стандарт IEC 61869-8 нормирует допустимую величину внешней наводки.

Одним из способов компенсации внешней наводки является добавление в конструкцию компенсационного витка.



Компенсационный виток



$$r_{fun}(\theta, r_c, R_c, N) = r_c + \frac{R_c - r_c}{2} + \frac{R_c - r_c}{2} \cos(N \theta) = \frac{R_c + r_c}{2} + \frac{R_c - r_c}{2} \cos(N \theta)$$

Для расчета компенсационного витка в однородном поле достаточно обеспечить равенство площадей компенсационного витка и контура катушки.

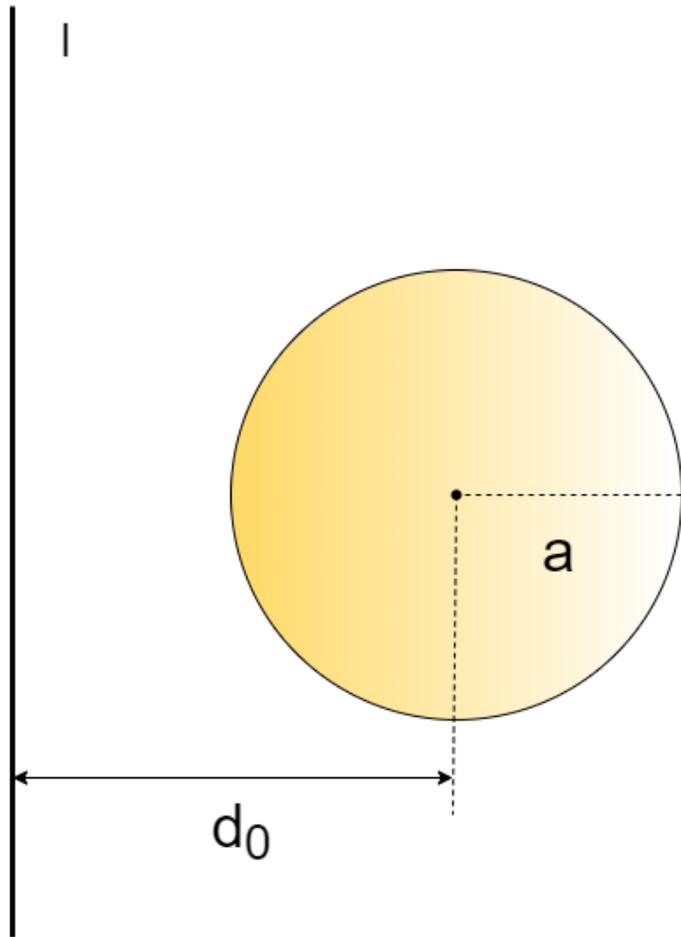
$$\begin{aligned}
 S &= \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{fun}} r \, dr \, d\theta = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{R_c + r_c}{2} + \frac{R_c - r_c}{2} \cos(N\theta) \right)^2 d\theta = \\
 &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{R_c + r_c}{2} \right)^2 d\theta + \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} 2 \frac{R_c + r_c}{2} \frac{R_c - r_c}{2} \cos(N\theta) d\theta + \\
 &+ \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{R_c - r_c}{2} \right)^2 \cos^2(N\theta) d\theta.
 \end{aligned}$$

Решение интеграла:

$$S = \pi \frac{3R_c^2 + 2r_c R_c + 3r_c^2}{8}$$

Компенсационный виток из условия равенства площадей:

$$r_{comp} = \sqrt{\frac{3R_c^2 + 2r_c R_c + 3r_c^2}{8}}$$



Поле от бесконечного прямого провода в однородной магнитной среде:

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2 \pi r}.$$

Магнитный поток для открытого контура:

$$\Phi_B = \iint_{\Sigma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}.$$

Магнитный поток через замкнутый контур с радиусом a и на расстоянии d_0 от проводника:

$$\Phi_B = \frac{\mu_0 \mu I}{2 \pi} \int_0^{2\pi} \int_0^a \frac{r dr d\theta}{d_0 + r \cos\theta}.$$

Решение интеграла:

$$\Phi_B = \mu_0 \mu I \left(d_0 - \sqrt{d_0^2 - a^2} \right).$$

Для неоднородного поля необходимо обеспечить равенство магнитного потока компенсационного витка и контура катушки.

Магнитный поток для контура катушки:

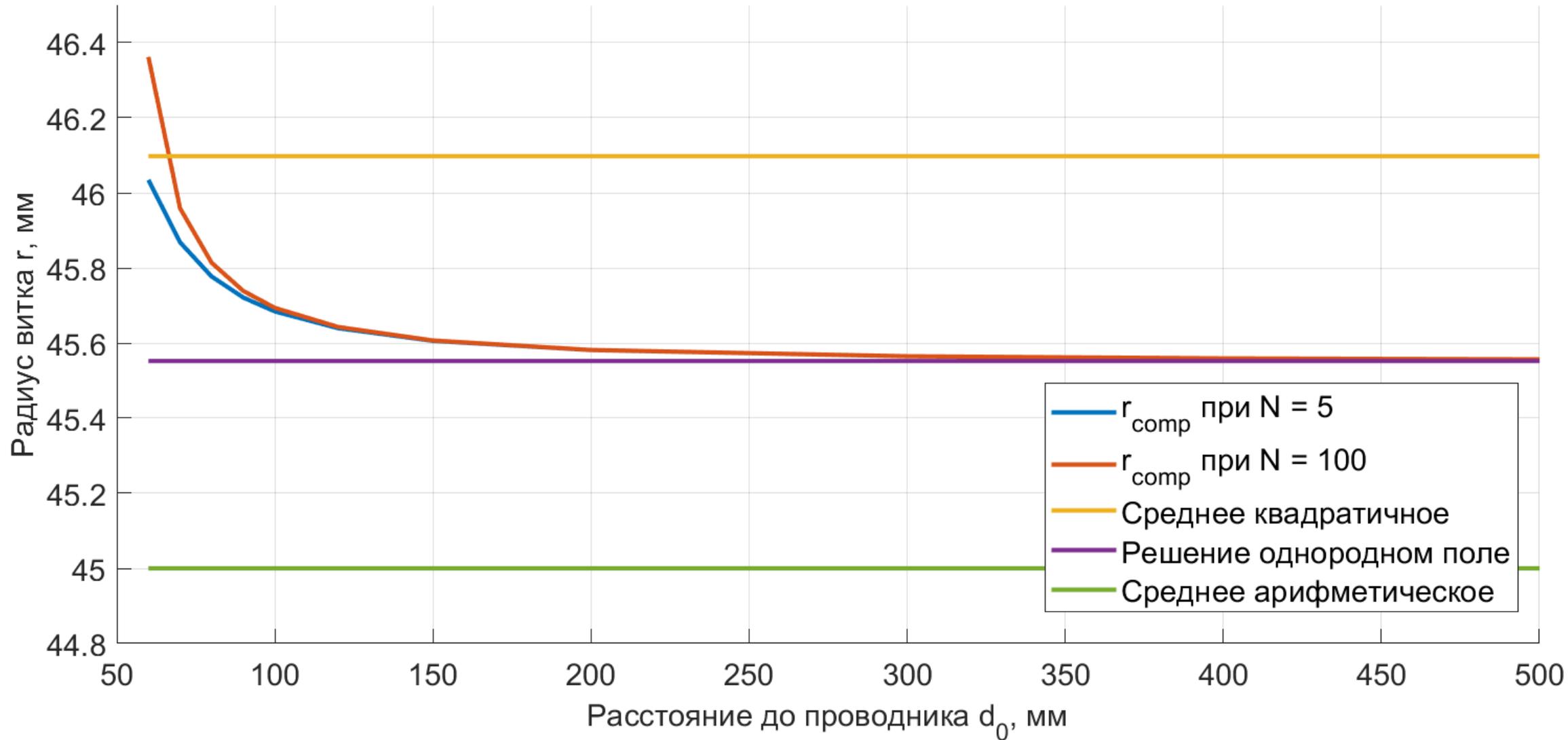
$$\Phi_B = \frac{\mu_0 \mu I}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{fun}} \frac{r dr d\theta}{d_0 + r \cos\theta}.$$

Решение данного интеграла аналитически довольно проблематично. Но для него можно получить итоговые значения путем численного интегрирования на интервале.

Из условия равенства магнитного потока радиус компенсационного витка:

$$r_{comp} = \sqrt{d_0^2 - \left(d_0 - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{fun}} \frac{r \cdot dr \cdot d\theta}{d_0 + r \cdot \cos\theta} \right)^2},$$

где вместо интеграла подставляется значение, полученное численным интегрированием.



- Добавление компенсационного витка в конструкцию катушки позволяет понизить уровень наводки от внешних полей и уменьшить влияние на точность измерений катушки.
- Для компенсации катушки, намотанной на круглый сердечник, компенсационного витка, рассчитанного по среднему арифметическому между диаметрами, недостаточно. Недокомпенсация тем сильнее, чем больше разница между внешним и внутренним диаметром.
- В неоднородном поле от проводника с током наводка в ближнем поле сильнее, а в дальнем поле стремиться к значению для однородного поля.
- Упрощенный расчет по среднеквадратичному между внешним и внутренним радиусом, используемый в научных статьях*, подходит для компенсации наводки в ближнем поле, но в дальнем поле дает ошибку компенсации.

* J. D. Ramboz, "Machinable Rogowski coil, design, and calibration," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 45, no. 2, pp. 511-515, April 1996, doi: 10.1109/19.492777.