

УДК 621.365.5

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА РЕАКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАССЕЯНИЯ В ИНДУКТОРАХ С МАГНИТОПРОВОДАМИ

©Романов С. В.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про автора:

Романов Сергій Валерійович: ORCID: 0000-0003-3770-1241; svrom@rambler.ru; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

При расчёте индукционных нагревательных устройств, применяемых для сборки и разборки соединений с натягом, они рассматриваются как совокупность электрических и магнитных цепей с сосредоточенными параметрами. Нагреваемые детали представляют собой часть магнитной системы и поэтому оказывают существенное влияние на её конструкцию и размеры.

В работе разработаны рекомендации по учету в методике расчета индуктора реактивного сопротивления рассеяния для двух основных типов индукторов: с С-образным магнитопроводом и индуктора соленоидного типа с несколькими магнитопроводами, равномерно распределенными по окружности обмотки возбуждения.

Расчеты выполнялись для конкретных установок, что давало возможность путем сопоставления теоретических и экспериментальных данных определить расхождение между ними и судить о достигнутой точности расчета.

Ключевые слова: индуктор; индукционный нагрев; реактивное сопротивление рассеяния; магнитная система.

Романов С. В. «Особливості розрахунку реактивного опору розсіювання в індукторах з магнітопроводами».

При розрахунку індукційних нагрівальних пристроїв, застосовуваних для збирання і розбирання з'єднань з натягом, вони розглядаються як сукупність електричних і магнітних кіл із зосередженими параметрами. Деталі, які нагріваються, являють собою частину магнітної системи і тому істотно впливають на її конструкцію і розміри.

У роботі розроблені рекомендації з обліку в методиці розрахунку індуктора реактивного опору розсіювання для двох основних типів індукторів: з С-подібним магнітопроводом та індуктора соленоїдного типу з декількома магнітопроводами, рівномірно розподіленими по колу обмотки збудження.

Розрахунки виконувалися для конкретних установок, що давало можливість шляхом зіставлення теоретичних і експериментальних даних визначити розбіжність між ними і судити про досягнуту точності розрахунку.

Ключові слова: індуктор; індукційний нагрів; реактивний опір розсіювання; магнітна система.

Romanov S. “Features of the calculation of reactive resistance of scattering in inductors with magnetic waves”.

When calculating the induction heating devices used to assemble and disassemble the connections with interference, they are considered as a set of electric and magnetic circuits with lumped parameters. The heated parts are part of the magnetic system and therefore have a significant effect on its design and dimensions.

The paper developed recommendations on how to take into account in the calculation procedure of the inductor of the reactive scattering resistance for two main types of inductors: with a C-shaped magnetic core and a solenoid-type inductor with several magnetic circuits uniformly distributed along the circumference of the excitation winding.

Calculations were carried out for specific installations, which made it possible to determine the discrepancy between them by comparing theoretical and experimental data and to judge the accuracy achieved in the calculation.

Key words: inductor; induction heating; reactive scattering resistance; magnetic system.

1. Постановка проблемы

При проектировании индукционно-нагревательных устройств для нагрева охватывающих деталей при сборке и разборке соединений с натягом важно определить оптимальную форму магнитной системы, особенно при разработке универсальных индукционно-нагревательных устройств.

При расчете магнитной системы и индуктора нагревательного устройства необходимо учитывать мощность, напряжение на индукторе и силу тока, конфигурацию магнитной системы. Кроме этого большое значение имеет общее сопротивление системы «индуктор-деталь».

Таким образом, проектирование нагревательных устройств сводится к анализу свойств множества конструктивных схем при заданных удельных нагрузках и геометрических размерах и к разработке методов оптимизации размеров и удельных нагрузок при заданной полезной мощности для нагрева определенной детали.

2. Анализ последних исследований

Одним из ключевых моментов расчета индуктора является определение числа витков обмотки возбуждения W , от которого зависит сила тока I_u и мощность P , выделяемая в виде тепла в нагреваемой детали. В известных формулах для определения числа витков W не учитывается магнитный поток рассеяния Ψ_s , силовые линии которого замыкаются по воздуху и не участвуют в образовании Э.Д.С. [1]:

$$W = \frac{\sum H_i \cdot l_i}{I_u}, \quad (1)$$

где H_i – действующее значение напряженности магнитного поля на участке магнитопровода длиной l_i , А/м;

I_u – действующее значение тока, А.

Магнитный поток рассеяния, это поток, который существует в индукторе, когда в обмотке возбуждения и в детали протекают токи противоположного направления.

Отношение $L_S = \frac{\Psi_s}{I}$, Гн называется индуктивностью.

Сопротивление рассеяния, согласно [2] равно

$$x_S = \omega \cdot L_S = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_S, \text{ Ом} . \quad (2)$$

Сопротивление рассеяния оказывает существенное влияние на режим работы индуктора, поскольку по закону Ома сила тока в схеме замещения определяется как отношение

$$I_u = \frac{U}{Z_\Sigma}, \text{ А}, \quad (3)$$

Технологія машинобудування

где U – действующее значение напряжения, B ;

Z_{Σ} – суммарное (полное) приведенное сопротивление индуктора, $Ом$.

Если не учитывать ток холостого хода, приняв $I_0 = 0$, Z_{Σ} определяется как

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2' + x_S)^2}, \quad (4)$$

где r_1, x_1 – активное и реактивное сопротивления обмотки возбуждения, $Ом$;

r_2', x_2' – активное и реактивное сопротивления нагрузки, приведенные к току индуктора, $Ом$;

x_S – реактивное сопротивление рассеяния, $Ом$;

$$r_2' = r_{2,m}' \cdot W^2; \quad x_2' = x_{2,m}' \cdot W^2.$$

Анализ показывает, что сопротивление обмотки возбуждения (r_1 и x_1) составляет всего лишь несколько процентов от приведенного сопротивления нагрузки индуктора (r_2' и x_2').

Если первыми пренебречь и выразить реактивное сопротивление нагрузки через активное

$x_2' = \frac{r_2'}{1,37}$, то формула (4) приобретает вид:

$$Z_{\Sigma} \approx \sqrt{(r_{2,m}' \cdot W^2)^2 + \left(\frac{r_{2,m}' \cdot W^2}{1,37} + x_S\right)^2} = r_{2,m}' \cdot W^2 \cdot \sqrt{1 + \left(0,73 + \frac{x_S}{r_{2,m}' \cdot W^2}\right)^2}$$

Можно обозначить $\sqrt{1 + \left(0,73 + \frac{x_S}{r_{2,m}' \cdot W^2}\right)^2} = K_Z$,

тогда

$$Z_{\Sigma} = K_Z \cdot r_{2,m}' \cdot W^2, \quad (5)$$

где K_Z – безразмерный коэффициент, учитывающий сопротивление x_S .

Сила тока в индукторе выражается как функция активного сопротивления нагрузки

$$I_u = \frac{U}{K_Z \cdot r_{2,m}' \cdot W^2}. \quad (6)$$

Решив совместно уравнения (1) и (4), получаем формулу для определения W , учитывающую потери от поля рассеяния магнитного потока в воздухе.

$$W = \frac{U}{K_Z \cdot r_{2,m}' \cdot \sum H_i \cdot l_i}. \quad (1)$$

3. Основная часть

Данные о режиме работы реальных нагревательных установок дали возможность определить фактические составляющие полного сопротивления Z_{Σ} и количественно оценить величину реактивного сопротивления рассеяния, чтобы сопоставить его с активным сопротивлением нагрузки, создающим полезную мощность.

Полное сопротивление по замеренным параметрам U_{Φ} и I_{Φ} равно

$$Z_{\Sigma\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{I_{\Phi}}, \quad Ом. \quad (8)$$

$$Z_{\Sigma\phi} = \sqrt{(r'_{2\phi})^2 + (x'_{2\phi} + x_s)^2} = \sqrt{(r'_{2\phi})^2 + (0,73 \cdot r'_{2\phi} + x_s)^2},$$

где $x'_{2\phi} \approx 0,73 \cdot r'_{2\phi}$.

Отсюда можно определить фактическое значение сопротивления рассеяния

$$x_{s\phi} = \sqrt{Z_{\Sigma\phi}^2 - (r'_{2\phi})^2} - 0,73 \cdot r'_{2\phi},$$

или

$$\frac{x_{s\phi}}{W^2 \cdot r_{2\phi}} = \frac{\sqrt{Z_{\Sigma\phi}^2 - (r'_{2\phi} \cdot W^2)^2}}{W^2 \cdot r_{2\phi}} - 0,73, \quad (9)$$

а также численное значение потенциала

$$K_{Z_\phi} = \sqrt{1 + \left(0,73 + \frac{x_s}{W^2 \cdot r_{2\phi}}\right)^2}. \quad (10)$$

Рассчитанные по формулам (8)–(10) составляющие полного сопротивления индуктора и коэффициента K_{Z_ϕ} для рассмотренных установок приведены в таблице 1. Объекты в таблице расположены в порядке возрастания мощности.

Таблица 1 – Составляющие полного приведенного сопротивления индуктора по результатам лабораторных испытаний установок

№ п/п	№ объекта (установки) Параметры	VI	I	III	V	II	IV	
		Ш-образный магнитопровод	Соленоидный без зазора (для съема)	С-образный магнитопровод	Соленоидный с зазором	Соленоидный с зазором	Соленоидный без зазора	
							IVa	IVб
1	$P_{2\phi}, \text{ кВт}$	13,5	19,5	26,5	45	58	57	84
2	$U_\phi, \text{ В}$	360	363	366	378	387	378	384
3	$I_\phi, \text{ А}$	130	156	235	290	260	270	390
4	W	70	65	90	36	30	32	27
5	$Z_{\Sigma\phi} = \frac{U_\phi}{I_\phi}, \text{ Ом}$	2,77	2,32	1,56	1,3	1,49	1,4	0,98
6	$r_{2\phi} = \frac{P_{2\phi} \cdot 10^3}{I_\phi^2 \cdot W^2}, \text{ Ом}$	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$1,93 \cdot 10^{-4}$	$0,59 \cdot 10^{-4}$	$4,13 \cdot 10^{-4}$	$8,9 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$
7	$r_{2\phi} \cdot W^2, \text{ Ом}$	0,8	0,81	0,48	0,53	0,8	0,81	0,57
8	$\frac{x_{s\phi}}{r_2 \cdot W^2}, \text{ Ом}$ формула (14)	2,58	1,97	2,36	1,4	0,84	0,77	0,66
9	K_{Z_ϕ} формула (15)	3,46	2,87	3,24	3,13	1,86	1,69	2,72
10	$x_{s\phi}, \text{ Ом}$	2,06	1,58	1,14	0,79	0,67	0,62	0,375

Технологія машинобудування

На рис. 1 графически представлены соотношения между составляющими полного сопротивления для индукторов с С-образным магнитопроводом и соленоидного типа. На рис. 2 – значения безразмерного коэффициента $K_{Z\phi}$, полученные путем обработки экспериментальных данных. Учитывая принятые при выводе формул (4) и (10) допущения, погрешность вычисления $x_{S\phi}$ может достигать 20-25 %. Но все же результат испытаний свидетельствует, что сопротивление рассеяния x_S по величине близко к приведенному активному сопротивлению нагрузки $r'_2 = r_2 \cdot W^2$, а иногда и значительно превышает его. Оно оказывает существенное влияние на режим работы индуктора.

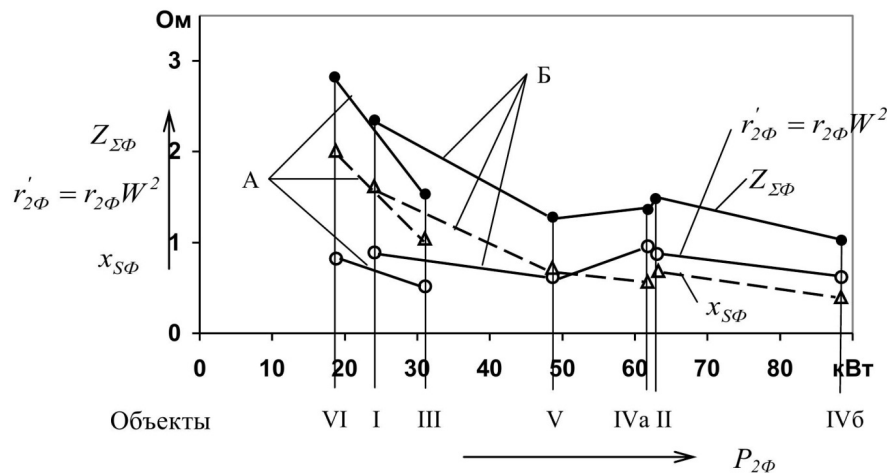


Рис. 1 – Составляющие полного сопротивления для индукторов разной мощности: А – для индукторов с С-образным магнитопроводом; Б – для индукторов соленоидного типа

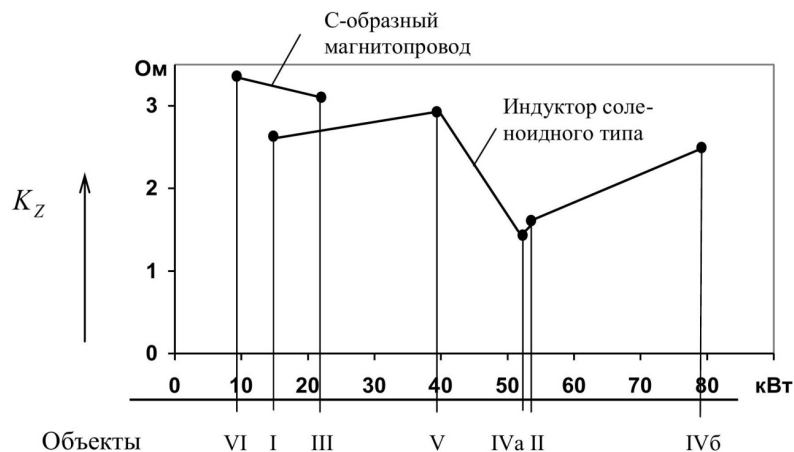


Рис. 2 – Значение коэффициента K_Z для индукторов различных типов

Был рассмотрен подробнее вопрос о расчете x_S и факторах, определяющих его величину.

Как в обычном трансформаторе, магнитный поток в индукторе можно разделить на две части: основной поток, замыкающийся в основном по железному сердечнику, и поток рассеяния, силовые линии которого замыкаются в воздушных зазорах. Отношение потока рассеяния Ψ_S к силе тока в обмотке называется индуктивностью рассеяния $L_S = \frac{\Psi_S}{I}$, Гн.

Сопротивление рассеяния равно

$$x_S = \omega \cdot L_S = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_S, \text{ Ом.} \quad (11)$$

В общей теории трансформаторов сопротивление рассеяния учитывается как реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, выраженная в процентах

$$U_p = \frac{x_S \cdot I_H}{U_H} \cdot 100\%. \quad (12)$$

где U_H и I_H – номинальные напряжение и ток в трансформаторе;

$x_S = x_K = x_1 + x_2'$ – реактивное сопротивление короткого замыкания, приведенное к первичной обмотке.

При концентрическом расположении обмоток (рис. 3) x_S выражается формулой:

$$x_S = \frac{7,92 \cdot f \cdot W^2 \cdot \pi \cdot d_{12}}{l} \cdot a_p \cdot K_p \cdot 10^{-8}, \text{ Ом,} \quad (13)$$

где d_{12} – средний размер воздушного канала между обмотками, см;

a_p – ширина приведенного канала рассеяния, см;

l – высота обмотки, см ($l_1 = l_2$);

K_p – коэффициент, учитывающий отклонение реального потока рассеяния от идеального потока, вызванное конечным значением осевого размера обмоток.

Когда радиальные размеры обмоток мало отличаются друг от друга, ширина приведенного канала рассеяния

$$a_p \approx a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}, \text{ см,} \quad (14)$$

где a_{12} – средняя ширина канала между обмотками, см.

Разницу в размерах a_1 и a_2 можно учесть, определив a_p по формуле:

$$a_p = \frac{d_{12} \cdot a_{12} + D_{CP1} \cdot \frac{a_1}{3} + D_{CP2} \cdot \frac{a_2}{3}}{d_{12}}, \text{ см,} \quad (15)$$

где D_{CP1} и D_{CP2} – средние диаметры обмоток, см.

Коэффициент K_p рекомендуют определять по формуле

$$K_p \approx 1 - \sigma \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\sigma}} \right), \quad (16)$$

где $\sigma = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi \cdot l}$.

Формулы (13)–(16) могут быть использованы для расчета x_S в индукторах соленоидного типа, где нагреваемая деталь играет роль вторичной обмотки, расположенной концентрично с первичной.

Индукторы с С-образным магнитопроводом подобны трансформаторам с чередующимися обмотками, которые применяются для питания дуговых электрических печей и в некоторых других случаях. Поле рассеяния такого трансформатора показано на рис. 4. В этом случае сопротивление рассеяния x_S также определяется по формуле (13), но параметры d_{12} , a_{12} , a_1 , a_2 и l определяются как показано на рис. 4.

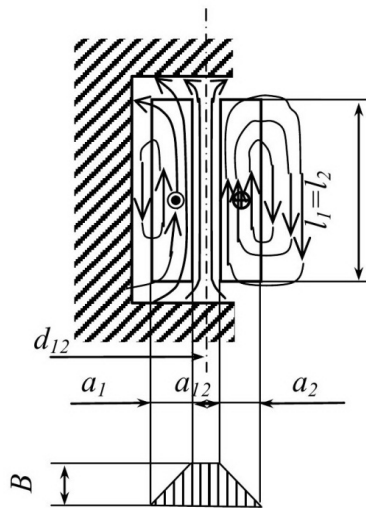


Рис. 3 – Поле рассеяния в индукторе с концентрическими обмотками

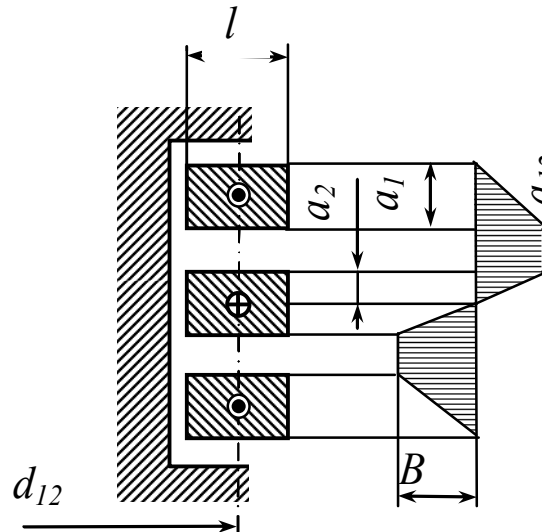


Рис. 4 – Поле рассеяния при чередующихся обмотках

Здесь d_{12} – средний диаметр обмотки, см; a_1 и a_2 – осевые размеры катушек, см; a_{12} – ширина осевого воздушного зазора между катушками и деталью, см; l – радиальный размер катушек, см.

Приведенная ширина канала рассеяния определяется по формуле

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}, \text{ см.}$$

Коэффициент K_p может быть подсчитан по формуле

$$K_p = 1 - \sigma \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\sigma}}\right) \cdot \left[1 - 0,5 \cdot e^{-S \cdot K} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\sigma}}\right)\right], \quad (17)$$

где e – основание натуральных логарифмов; $\sigma = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi \cdot l}$; $K = \frac{2}{\sigma \cdot l}$; S – расстояние от внутренней цилиндрической поверхности обмотки до внешней поверхности стержня сердечника, см, в индукторе параметр S учитывает влияние радиального зазора между сердечником магнитопровода и внутренней поверхностью детали.

Расчет по формуле (13) для индуктора с чередующимися обмотками является упрощенным. При более точном методе расчета учитывается, что реальное поле рассеяния может быть представлено в виде суммы двух полей: продольного, силовые линии которого направлены параллельно оси обмоток, и поперечного, линии которого расходятся радиально.

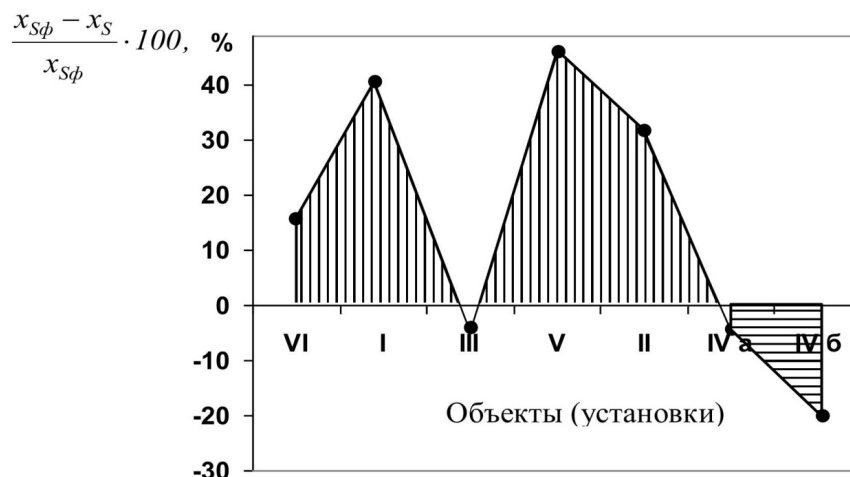
Основным является поперечное поле, а продольное – по величине меньше, но может увеличиваться при наличии большого зазора между сердечником и обмотками.

При концентрических обмотках основное поле рассеяния – продольное.

Численные значения сопротивления рассеяния, подсчитанные по формуле (13), даны в таблице 2. Для сопоставления в нее внесены и величины x_s , полученные в результате обработки экспериментальных данных. Для наглядности построена диаграмма (рис. 5), иллюстрирующая расхождение в процентах между x_s (расчетным) и $x_{s\phi}$.

Таблиця 2 – Экспериментальные и расчетные значения сопротивления рассеяния

№№ объекта	VI	I	III	V	II	IV	
						а	б
$x_S, Ом$ (расчетн.)	1,75	0,95	1,21	0,43	0,46	0,63	0,45
$x_{S\phi}, Ом$	2,07	1,58	1,14	0,79	0,67	0,6	0,375
$\frac{x_{S\phi} - x_S}{x_{S\phi}} \cdot 100, \%$	+15,4	+39,8	-6,1	+45,5	+31,3	-5,9	-20

**Рис. 5** – Диаграмма расхождения между экспериментальными и рассчитанными по формуле (13) значениями сопротивления рассеяния

На диаграмме видно, что в большинстве случаев на практике сопротивление рассеяния оказывается выше, чем получается по расчету, и расхождение иногда достигает 40%. Особенно в соленоидных индукторах, где низкие результаты расчета могут быть объяснены тем, что расчетная формула не учитывает увеличение поля рассеяния на участках между магнитопроводами.

Можно рекомендовать увеличивать расчетные значения x_S для индукторов соленоидного типа с воздушным зазором в магнитной цепи в 1,2...1,25 раза.

Несмотря на значительную погрешность расчета, формулы (13)–(17) дают возможность определить ориентировочные значения сопротивления рассеяния в индукторе и факторы, позволяющие уменьшить последнее.

Список использованных источников:

1. Андреев Г. Я. Тепловая сборка колесных пар / Г. Я. Андреев. – Харьков : Изд-во ХГУ, 1965. – 227 с.
2. Слухоцкий А. Е. Индукторы для индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, С. Е. Рыскин. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.

References

1. Andreyev, G 1965, *Teplovaya sborka kolesnykh par*, Izd-vo KhGU, Kharkiv.
2. Slukhotskiy, A & Ryskin, S 1974, *Induktory dlya induktsionnogo nagreva*, Energiya, Leningrad.

Стаття надійшла до редакції 20 листопада 2017 р.