

УДК 621.313.3

UDC 621.313.3

**МЕТОДИКА РАСЧЁТА АМПЛИТУДЫ
КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
В СИСТЕМЕ АСИНХРОННЫЙ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ – КАБЕЛЬ
УЧИТЫВАЮЩАЯ УСЛОВИЯ
КОММУТАЦИИ СИЛОВЫХ КОНТАКТОВ
МАГНИТНОГО ПУСКАТЕЛЯ**

**METHOD PROCEDURE OF AMPLITUDE OF
SWITCHING OVERVOLTAGES IN THE
SYSTEM OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC
MOTOR – CABLE CONSIDERING THE
CONDITIONS OF SWITCHING OF POWER
CONTACTS OF THE SOLENOID STARTER**

Максаев Иван Николаевич
аспирант

*Азово-Черноморская Государственная
Агроинженерная Академия, г. Зерноград, Россия*

Maksaev Ivan Nikolaevich
postgraduate student

*Azov-Black Sea State Agroengineering Academy,
Zernograd, Russia*

В статье описывается методика расчёта, позволяющая определить амплитуду коммутационного перенапряжения при коммутации магнитным пускателем асинхронного электродвигателя

In the article, the method procedure, allowing to define the amplitude of a switching overstrain is described when switching by the solenoid starter of the asynchronous electric motor

Ключевые слова: ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА, ВРЕМЯ РАЗНОВРЕМЕННОЙ КОММУТАЦИИ, МЕТОД, МАГНИТНЫЙ ПУСКАТЕЛЬ, АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Keywords: OVERVOLTAGE, ELECTRIC CIRCUIT, TIME SWITCHING OCCURRING AT DIFFERENT TIMES, METHOD, SOLENOID STARTER, ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR

До настоящего времени, задача расчёта коммутационных перенапряжений при коммутации сложной активной, индуктивной и ёмкостной нагрузки с учётом угла коммутации и процессов на силовых контактах магнитного пускателя окончательно не решена. Это связано с тем, что существующие методики не позволяют вычислить параметры коммутационных перенапряжений (КП) при каждой коммутации, ограничиваясь лишь вычислением максимально возможной амплитуды КП [1-5].

Задача определения параметров КП при каждой коммутации довольно сложная с расчётной и экспериментальной точки зрения, т.к. связана с громоздкими расчётами и обширными экспериментальными исследованиями. С учётом вышеизложенного, целью данной статьи является составление метода расчёта для более точного описания переходных процессов, протекающих при коммутациях в асинхронном электроприводе, позволяющего определять амплитуду КП при каждой

коммутации в зависимости от условий коммутации, включающих в себя угол коммутации и время разновременной коммутации силовых контактов (СК) магнитного пускателя (МП).

Для осуществления поставленной цели разработана схема замещения, учитывающая все ёмкостные и индуктивные связи не только в кабельной линии, но и с заземлёнными токопроводящими конструкциями. Причём, в данной схеме замещения, по правую сторону от МП рассматриваются только единичные КЛ и АД, рисунок 1. Схема замещения строится для одной фазы и представляет собой П-образные схемы замещения элементов ветви электропривода, рисунок 1.

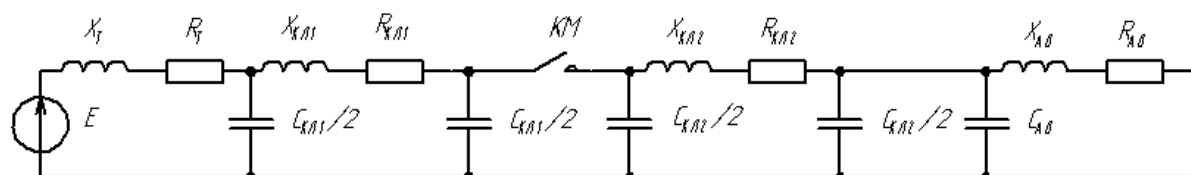


Рисунок 1 - Схема замещения электропривода «П»-образная

Расчёт напряжений при коммутациях проводится классическим методом. Для расчётов данная схема излишне громоздка, следовательно, группы некоторых элементов заменяются их электрическими эквивалентами, кроме того, составляются уравнения для выполнения расчёта переходного процесса классическим методом по схеме, представленной на рисунке 2.

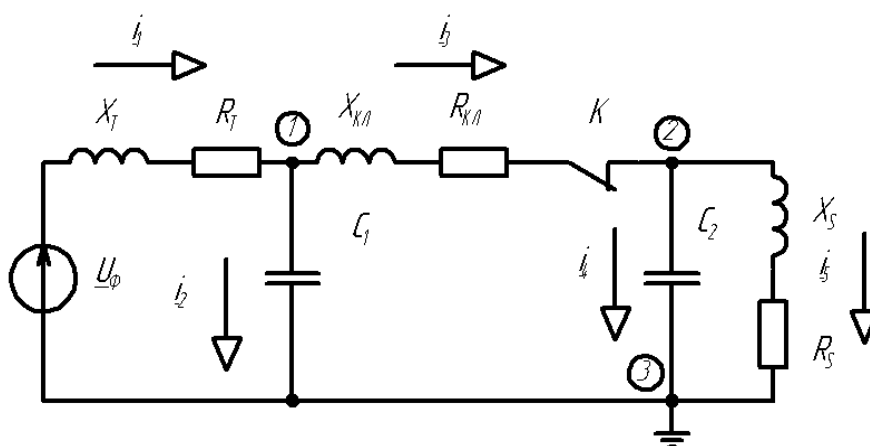


Рисунок 2 – Упрощённая схема замещения для расчёта

Перед расчётом переходного процесса при размыкании, необходимо определить начальные условия в цепи до коммутации. Для этого определяются токи и напряжения в ветвях электрической цепи. Для упрощения расчёта элементы цепи заменяются комплексными эквивалентами. На рисунке 3 приведена схема для расчёта нулевых условий.

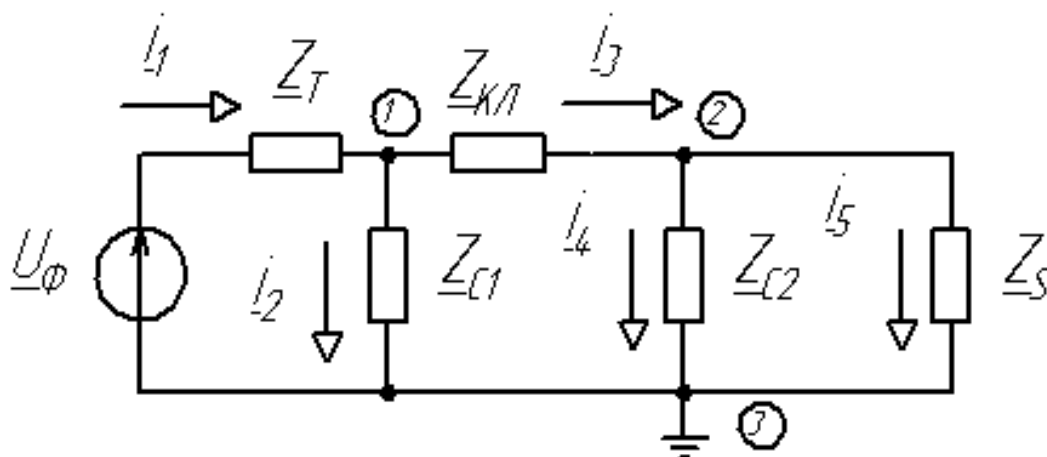


Рисунок 3 - Схема для расчёта нулевых условий

Комплексным сопротивлениям элементов соответствуют комплексные проводимости. Далее решение выполняется методом узловых потенциалов [6].

Для узла №1 выражение будет иметь вид:

$$Y_{11} = Y_T + Y_{C1} + Y_{\dot{E}\dot{E}}; \quad (1)$$

Для узла №2 выражение будет иметь вид:

$$Y_{22} = Y_S + Y_{C2} + Y_{\dot{E}\dot{E}}; \quad (2)$$

Для ветви соединяющей оба узла:

$$Y_{12} = Y_{21} = Y_{\dot{E}\dot{E}}; \quad (3)$$

С учётом выведенных выше выражений составляется система уравнений.

$$\begin{cases} j_{\underline{1}} \cdot Y_{11} - j_{\underline{2}} \cdot Y_{12} = Y_T \cdot \underline{E}; \\ -j_{\underline{1}} \cdot Y_{21} + j_{\underline{2}} \cdot Y_{22} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

По данной системе уравнений составляются определители для решения методом Крамера.

Далее вычисляются узловые потенциалы. Третий узел заземлён, следовательно, потенциалы узлов №1 и №2 (рисунок 3) будут равны напряжениям между данными узлами и узлом №3.

Для первого узла напряжение на конденсаторе до коммутации

$$\underline{U}_{C1} = \underline{j}_{1} = \frac{\underline{U}_{\dot{o}} \cdot \underline{Y}_T \cdot \underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{11} \cdot \underline{Y}_{22} - \underline{Y}_{12}^2} = U_{C1} \cdot e^{jj_1} \quad (5)$$

Для второго узла напряжение на конденсаторе до коммутации

$$U_{C2} = \underline{j}_{2} = \frac{\underline{U}_{\dot{o}} \cdot \underline{Y}_T \cdot \underline{Y}_{12}}{\underline{Y}_{11} \cdot \underline{Y}_{22} - \underline{Y}_{12}^2} = U_{C2} \cdot e^{jj_2} \quad (6)$$

Расчёт нулевых условий по напряжениям

$$u_{C1}(0) = U_{C1} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(j_{C1}), \quad (7)$$

$$u_{C2}(0) = U_{C2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(j_{C2}). \quad (8)$$

Нулевые условия по токам в контурах, буквенные обозначения по схеме 3

$$i_1(0_-) = i_1(0_+) = I_1 \sqrt{2} \sin(a_1), \quad (9)$$

$$i_2(0_-) = i_2(0_+) = I_2 \sqrt{2} \sin(a_2). \quad (10)$$

Токи в контурах до коммутации

$$I_1 = \frac{\underline{U}_{\dot{o}} - \underline{U}_{C1}}{\underline{Z}_T} = I_{1M} \cdot e^{ja_1}, \quad (11)$$

$$I_2 = \frac{\underline{U}_{C2}}{\underline{Z}_S} = I_{2M} \cdot e^{ja_2}. \quad (12)$$

Закон зависимости функции напряжения от времени и тока, а также угла коммутации

$$u_{C1}(t) = \frac{1}{C_1} \int i_1(t) dt, \quad (13)$$

$$u_{C2}(t) = \frac{1}{C_2} \int i_2(t) dt. \quad (14)$$

Далее выполняется расчёт переходного процесса классическим методом.

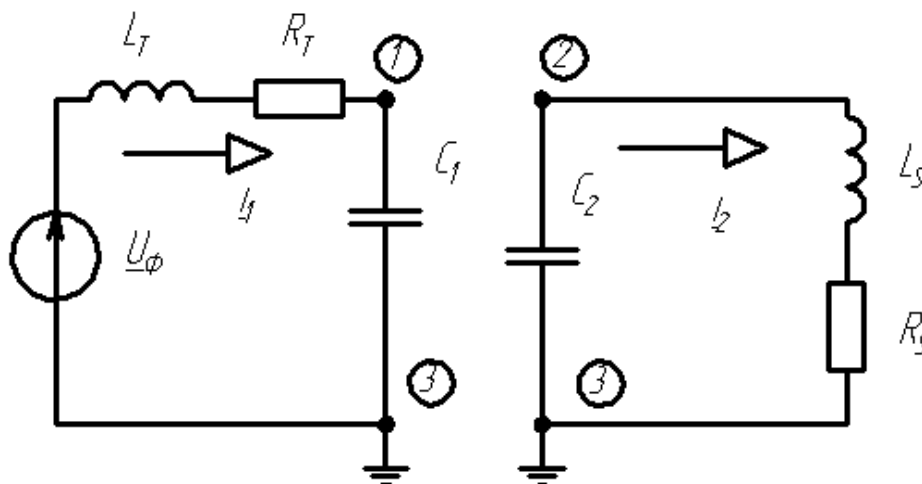


Рисунок 4 - Схема для расчёта классическим методом переходного процесса при размыкании

Уравнение для первого узла имеет следующий вид

$$u_{\phi} = i_1 \cdot R_T + L_T \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt. \quad (15)$$

Уравнение для второго узла имеет следующий вид

$$0 = i_2 R_S + L_S \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt. \quad (16)$$

Для дальнейшего расчёта необходимо определить принуждённые составляющие токов в контурах электрической цепи.

Переходные токи, содержащие в себе свободные и принуждённые составляющие, находятся следующим образом

Для первого контура

$$i_1(t) = i_{1FD} + i_{1CB}. \quad (17)$$

Для второго контура

$$i_2(t) = i_{2CB}. \quad (18)$$

Во втором контуре отсутствует принуждённая составляющая тока, т.к. отсутствует источник ЭДС.

Фазное напряжение представляет собой синусоидальную функцию и имеет следующий вид

$$u_{\phi} = U_{\phi i} \cdot \sin(\omega t + \alpha), \quad (19)$$

где α - угол коммутации;

φ - аргумент комплексного сопротивления.

Причём принуждённая составляющая тока протекающая в первой ветви описывается следующим выражением

$$i_{iD} = I_{iD} \cdot \sin(\omega t - j). \quad (20)$$

Максимальное значение принуждённого тока в первом контуре

$$I_{1M} = \frac{U_{\phi i}}{\sqrt{R_T^2 + \left(\omega L_T - \frac{1}{\omega C_1} \right)^2}}. \quad (21)$$

Аргумент комплексного сопротивления определяется по следующей формуле

$$j = \arctg \frac{\omega L_T - \frac{1}{\omega C_1}}{R_T}. \quad (22)$$

Определение свободных составляющих токов в контурах электрической цепи, составление характеристического уравнения.

Характеристическое уравнение для первого контура

$$R_T + pL_T + \frac{1}{pC_1} = 0. \quad (23)$$

Разделив все члены уравнения на pC_1 , получим следующее выражение

$$p^2 L_T C_1 + p R_T C_1 + 1 = 0. \quad (24)$$

Характеристическое уравнение для второго контура имеет аналогичный вид

$$p^2 L_S C_2 + p R_S C_2 + 1 = 0. \quad (25)$$

Коэффициент затухания для первого и второго уравнений будет иметь вид

$$d_1 = \frac{R_T C_1}{2}, \quad (26)$$

$$d_2 = \frac{R_S C_2}{2}. \quad (27)$$

Собственная частота обоих контуров рассчитывается следующим образом

$$w_{01} = \sqrt{\left| \frac{1}{L_T \cdot C_1} - \left(\frac{R_T}{2 \cdot L_T} \right)^2 \right|}, \quad (28)$$

$$w_{02} = \sqrt{\left| \frac{1}{L_S \cdot C_2} - \left(\frac{R_S}{2 \cdot L_S} \right)^2 \right|}. \quad (29)$$

При этом характеристическое уравнение может иметь вещественные равные различные корни, вещественные равные корни и комплексные сопряжённые корни [6].

$$i(t) = i_{i\delta} + Ae^{-dt} \sin(w_0 t + n). \quad (30)$$

Данное уравнение, в следствии определённых параметров элементов схемы замещения, будет иметь комплексно сопряжённые корни. С учётом вышесказанного, проводится расчёт уравнений для свободной составляющей.

Общий вид уравнения для тока в первом контуре с учётом комплексно сопряжённых корней

$$i_1(t) = i_{i\delta} + Ae^{-dt} \sin(w_0 t + n). \quad (31)$$

Токи в цепи с индуктивностью по первому закону коммутации не изменяются после коммутации

$$i_1(0_-) = i_1(0_+). \quad (32)$$

Напряжения в цепи с ёмкостью по второму закону коммутации не изменятся после коммутации

$$u_{C1}(0_-) = u_{C1}(0_+). \quad (33)$$

Уравнение для принуждённой составляющей тока

$$i_{I_{D1}}(0) = I_{1M} \cdot \sin(a - j). \quad (34)$$

Фазное напряжение имеет следующий вид

$$u_{\phi} = i_1 R + L \frac{di_1}{dt} + u_C. \quad (35)$$

Уравнение для тока в первом контуре

$$i_1(t) = i_{I_{D1}} + A e^{-dt} \sin(w_0 t + n). \quad (36)$$

Свободная составляющая тока

$$i_{1CB} = A e^{-dt} \sin(w_0 t + n). \quad (37)$$

После дифференцирования, данное выражение принимает вид

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{di_{I_{D1}}}{dt} - dA \cdot e^{-dt} \sin(w_0 t + n) + Aw_0 \cdot e^{-dt} \cos(w_0 t + n). \quad (38)$$

При $t \rightarrow 0$ выражение для тока будет иметь следующий вид

$$i_1(0) = i_{I_{D1}}(0) + A \cdot \sin(n). \quad (39)$$

После дифференцирования, данное выражение принимает вид

$$\left. \frac{di_1}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{di_{I_{D1}}}{dt} \right|_{t=0} - dA \cdot \sin(n) + Aw_0 \cdot \cos(n). \quad (40)$$

От выражения для принуждённой составляющей тока берётся производная по времени

$$i'_{I_{D1}} = [I_{1M} \cdot \sin(wt + j)]' = w \cdot I_{1M} \cdot \cos(wt + j), \quad (41)$$

$$\left. \frac{di_{I_{D1}}}{dt} \right|_{t=0} = w \cdot I_{1j} \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(wt + j), \quad (42)$$

$$\left. \frac{di_1}{dt} \right|_{t=0} = \frac{u_{\phi}(0) - u_C(0) - i_1(0) \cdot R}{L}. \quad (43)$$

Система уравнений для первого контура

$$\begin{cases} i_1(0) = i_{I_{D1}}(0) + A \cdot \sin(n), \\ \left. \frac{di_1}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{di_{I_{D1}}}{dt} \right|_{t=0} - d \cdot A \cdot \sin(n) + A \cdot w_0 \cdot \cos(n); \end{cases} \quad (44)$$

Для сокращения записи расчётов примем следующее

$$i_1' = \frac{di_1}{dt}, \quad (45)$$

тогда

$$\frac{di_{1ID}}{dt} = i_{1ID}' = w \cdot I_{1I} \cdot \cos(wt + j), \quad (46)$$

$$\frac{di_1}{dt} = i_1' = w \cdot I_{1I} \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(wt + j), \quad (47)$$

$$\begin{cases} i_1(0) = i_{1ID}(0) + A \cdot \sin(n), \\ i_1'(0) = i_{1ID}'(0) - d \cdot A \cdot \sin(n) + A \cdot w_0 \cdot \cos(n); \end{cases} \quad (48)$$

после чего делим нижнее уравнение на верхнее уравнение

$$\frac{i_1'(0) - i_{1ID}'(0)}{i_1(0) - i_{1ID}(0)} = \frac{-d \cdot A \cdot \sin(n) + A \cdot w_0 \cdot \cos(n)}{A \cdot \sin(n)}; \quad (49)$$

$$\frac{i_1'(0) - i_{1ID}'(0)}{i_1(0) - i_{1ID}(0)} = -d + w_0 \cdot \operatorname{ctg}(v). \quad (50)$$

Из верхней строки уравнения 47 выводится постоянная интегрирования

$$A = \frac{i_1(0) - i_{1ID}(0)}{\sin(n)}. \quad (51)$$

Из уравнения 49 выводится начальная фаза

$$v = \operatorname{arccctg} \left(\frac{\frac{w_0}{\frac{i_1'(0) - i_{1ID}'(0)}{i_1(0) - i_{1ID}(0)} + d}}{\frac{i_1(0) - i_{1ID}(0)}{i_1(0) - i_{1ID}(0)}} \right). \quad (52)$$

Определение напряжений в первом контуре

Напряжение в первом контуре

$$u_{C1} = u_{C1ID} + u_{C1\tilde{N}\tilde{A}}, \quad (53)$$

$$u_{C1ID} = U_{C1ID} \cdot \sin(wt + j_1), \quad (54)$$

$$u_{C1\tilde{N}\tilde{A}} = \frac{1}{C_1} \int A e^{-dt} \sin(w_0 t + n) dt. \quad (55)$$

После дифференцирования уравнение принимает следующий вид

$$u_{C1\dot{A}} = \frac{1}{C_1} \cdot \frac{e^{-dt} \cdot A \cdot (-d \cdot \sin(tw_0 + v) - w_0 \cdot \cos(tw_0 + v))}{w_0^2 + d^2}. \quad (56)$$

Принуждённое напряжение на конденсаторе в первом контуре после коммутации находится следующим образом

$$\underline{U}_{C1\dot{B}} = \sqrt{2} \cdot \underline{I}_{\dot{B}} \cdot \underline{Z}_{C1}. \quad (57)$$

Принуждённый ток в первом контуре после коммутации находится следующим образом

$$\underline{I}_{\dot{B}} = \frac{\underline{U}_{\dot{0}}}{\underline{Z}_T + \underline{Z}_{C1}}. \quad (58)$$

Расчёт переходных токов и напряжений во втором контуре. Предварительный расчёт проводится по формулам (1-3; 6; 8; 10; 12; 27; 29), после чего проводится вычисление токов (59-62), постоянной интегрирования (63) и начальной фазы (64). Аргумент комплексного числа тока во втором контуре до коммутации используется для построения закона изменения данного тока по времени (12).

Закон изменения тока во втором контуре до коммутации

$$i_2 = I_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + a_2). \quad (59)$$

$$i_2' = \omega \cdot I_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t + a_2). \quad (60)$$

Закон изменения тока во втором контуре до коммутации при нулевых условиях

$$i_2(0) = I_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(a_2). \quad (61)$$

$$i_2'(0) = \omega \cdot I_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(a_2). \quad (62)$$

Постоянная интегрирования для второго контура

$$A_2 = \frac{i_2(0)}{\sin(n_2)}. \quad (63)$$

Начальная фаза для второго контура

$$v_2 = \text{arcctg} \left(\frac{w_{02}}{\frac{i_2'(0)}{i_2(0)} + d_2} \right). \quad (64)$$

Свободное напряжение на втором конденсаторе

$$u_{C2\dot{N}A} = \frac{1}{C_2} \cdot \frac{e^{-d_2 t} \cdot A_2 \cdot (-d_2 \cdot \sin(tw_{02} + v_2) - w_{02} \cdot \cos(tw_{02} + v_2))}{w_{02}^2 + d_2^2} \quad (65)$$

Полное переходное напряжение во втором контуре

$$u_{C2} = u_{C2CB} \quad (66)$$

С учётом вышеприведённых формул составляется алгоритм для расчёта, который включает следующие выражения для первого контура и для второго контура. Алгоритм состоит из блоков, которым принадлежат группы соответствующих формул, рисунок 5.

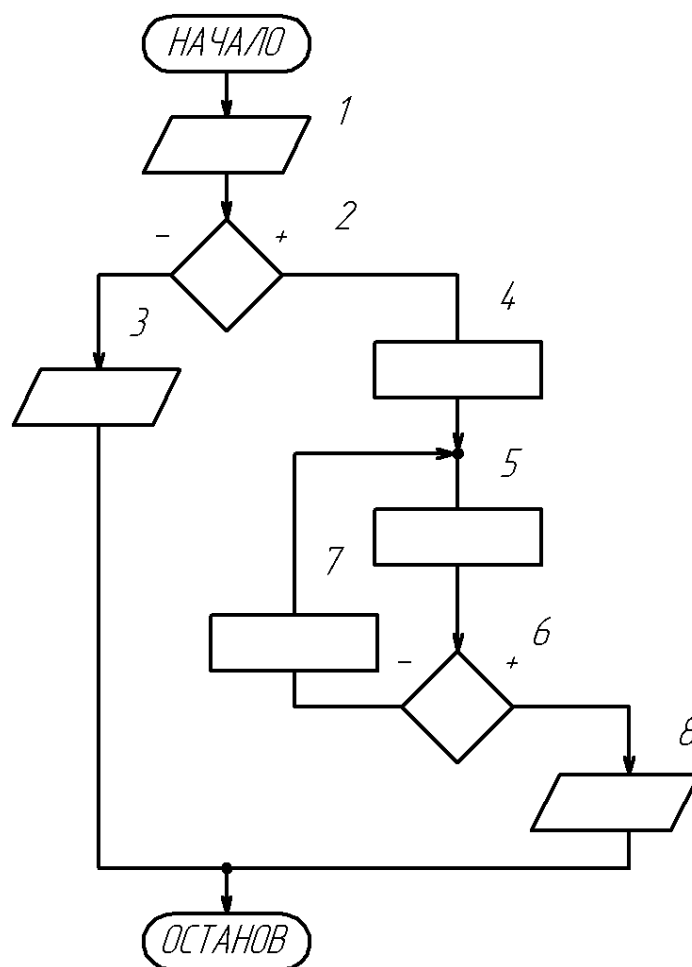


Рисунок 5 - Графическое изображение алгоритма расчёта КП для одной фазы

Блоку №1 осуществляет ввод данных и выполняет первичный расчёт по формулам (1-3; 5; 6; 26; 27), в блоке №2 выполняется сравнение, формулы (26; 27), в случае отрицательного результата выводится ошибка, блок №3. Далее, в блоке №4 происходит расчёт по формулам (5; 6; 11; 12; 58), блоку №5 принадлежат формулы (59-66; 34; 36; 37; 51-57), в блоке №6

происходит сравнение угла коммутации с предельным значением 360° , в случае превышения, расчёт завершается и данные посылаются на блок вывода №8, далее происходит завершение алгоритма. Алгоритм используется для расчёта КП каждой из фаз последовательно.

По заданным данным с помощью данного алгоритма были построены графики зависимости амплитуды перенапряжения от угла коммутации для каждой фазы А, В, С, рисунок 6, а также разновременной коммутации контактов МП, рисунок 7.

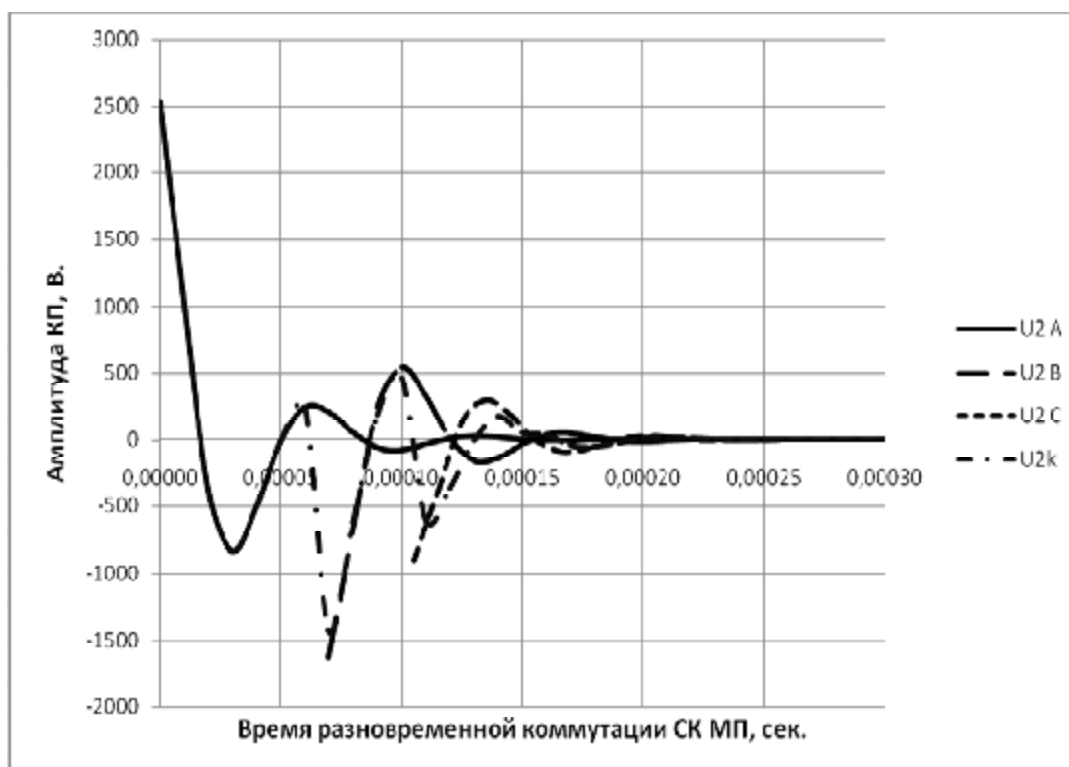


Рисунок 6 - График свободных составляющих переходного напряжения для трёх фаз

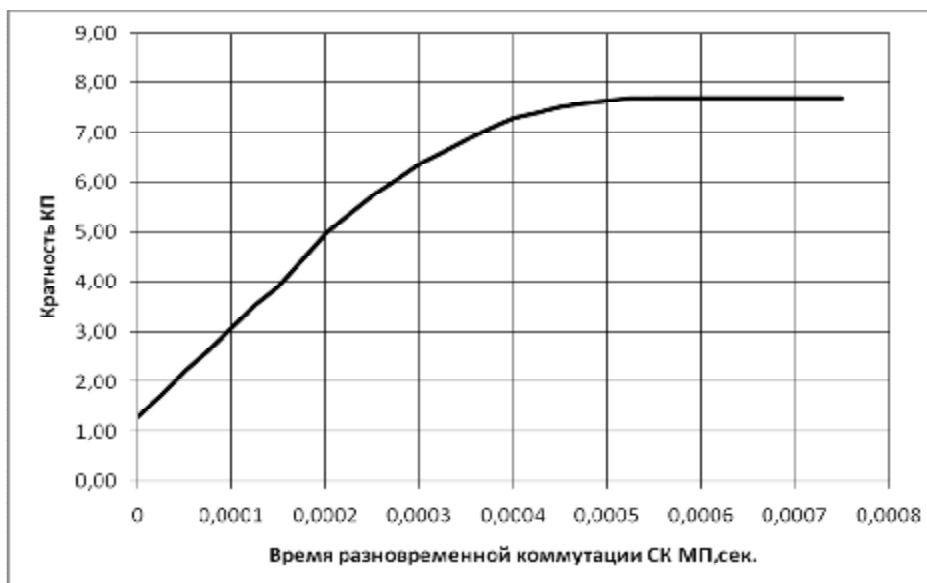


Рисунок 7 – Влияние времени разновременной коммутации силовых контактов МП на кратность КП

По алгоритму была написана программа для ЭВМ, позволяющая проводить расчёт амплитуды КП [7]. Данный результат для большей достоверности необходимо сравнить с экспериментальными данными, полученными автором ранее [8]. Графическое сравнение приведено на рисунке 8.

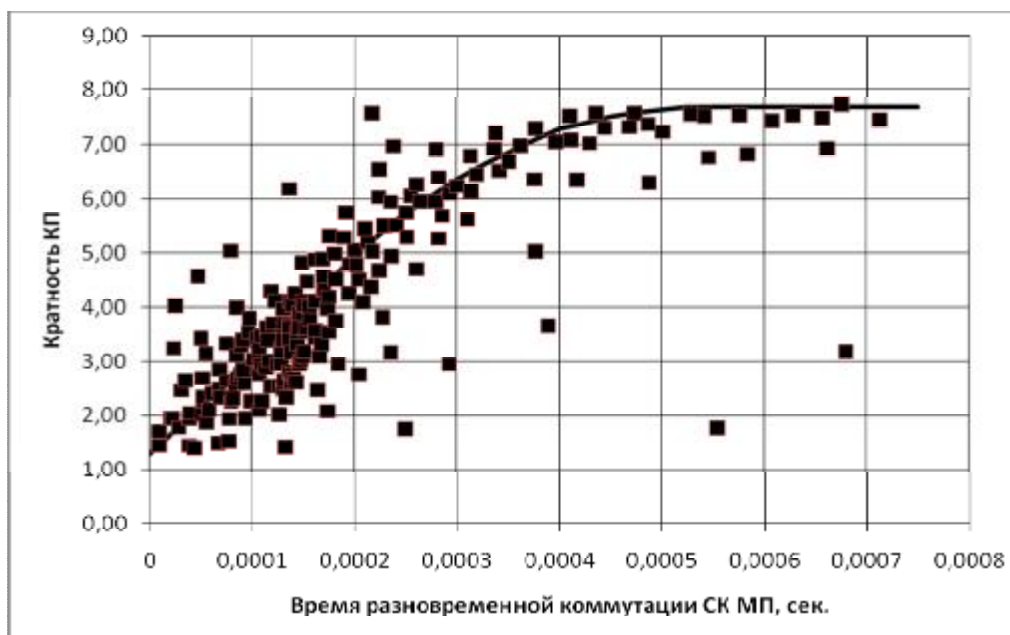


Рисунок 8 - График теоретического и экспериментального распределения для зависимости кратности КП от времени разновременной коммутации СК МП

Для оценки согласия теоретических и практических данных, был произведён анализ по критерию Пирсона [9], включающий в себя теоретическую и экспериментальную выборку, таблица 1.

Таблица 1 - Параметры для расчёта критерия согласия по Пирсону для зависимости кратности КП от суммарного времени разновременной коммутации

Наименования	Значение
ч.р.вариант	8
ч.с.свободы	5
$\chi_{кр.}$	11,10
Проверка	10,67

Как видно из таблицы, величина χ^2 меньше $\chi_{кр}$ следовательно, подтверждается соответствие экспериментальных и теоретических данных [9].

Выводы:

1. Разработанный метод для расчёта амплитуды коммутационных перенапряжений соответствует экспериментальным данным, что подтверждается проверкой по критерию согласия Пирсона.

2. Данный метод позволяет рассчитывать амплитуду коммутационных перенапряжений при каждой коммутации, в зависимости от угла коммутации и времени разновременной коммутации силовых контактов магнитного пускателя.

3. Практическая значимость данной работы заключается в повышении точности расчётов амплитуд коммутационных перенапряжений.

Библиографический список

1. Влащицкий, А.В. Коммутационные перенапряжения и защита от них автономных электроэнергетических систем напряжением до 1 кВ : дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / Влащицкий Андрей Валерьевич ; Южно-Российский гос. техн. ун-т. – Новочеркасск, 2007. – 188 с.
2. Губенков, А.В. Режимы работы пусковой аппаратуры в системе электроснабжения с электродвигательной нагрузкой : дисс. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Губенков Александр Вячеславович ; Кузбасский гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2005. – 134 с.
3. Кабдин, Н.Е. Повышение эксплуатационной надёжности асинхронных электродвигателей в сельскохозяйственном производстве : дисс. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Кабдин Николай Егорович ; Московский гос. аграрный ун-т им. В.П. Горячкина. – М., 2002. – 208 с.
4. Орлов К.В. Методы и средства диагностирования состояний коммутационных устройств электрооборудования АПК : дисс. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Орлов Кирилл Викторович ; Московский гос. аграрный ун-т им. В.П. Горячкина. – М., 2010. – 140 с.
5. Гамазин С. И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой / С. И. Гамазин, В. А. Ставцев, С. А. Цырук. - М.: изд. МЭИ, 1997
6. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники : учеб. для энергетических и электротехнических вузов / Л.А. Бессонов. – Изд. 6-е, перераб. и доп.. – М.: Высшая школа, 1973. – 752с
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № РФ ,2012г. Расчёт параметров коммутационных перенапряжений. Максаев И.Н., Литвинов В.Н., и др.
8. Максаев, И.Н. Практические измерения коммутационных перенапряжений в асинхронном электроприводе. / И.Н. Максаев, В.В. Головинов // Инновационные технологии и техника - основа повышения эффективности животноводства: сборник научных трудов по материалам 5-й Международной научно-практической конференции СКНИИМЭСХ. – зерноград, 2010. – С. 160–163.
9. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие / В.Е. Гмурман. – 12-е изд., перераб. – Москва: Высшее образование, 2006. – 479 с.:ил.