

**Сборник научных трудов НПП «ЭКРА»**

# **Цифровая электротехника: проблемы и достижения**

**Выпуск IV**

г. Чебоксары, 2015



Научно-производственное предприятие «ЭКРА»

# **Цифровая электротехника: проблемы и достижения**

Сборник научных трудов НПП «ЭКРА»

Выпуск IV

Чебоксары, 2015

УДК 621.31

ББК 31.2

Ц75

***Редакционная коллегия:***

**А.М. Наумов**, канд. техн. наук (главный редактор),

**Н.А. Дони**, канд. техн. наук (научный редактор),

**В.В. Исаев**,

**А.А. Шурупов**, канд. техн. наук,

**В.М. Шевцов**, канд. техн. наук (ответственный редактор).

**Ц75    Цифровая электротехника: проблемы и достижения:**  
Сборник научных трудов НПП «ЭКРА». Выпуск IV. – Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ», 2015. – 106 с.

В сборнике изложены результаты теоретических и прикладных научно-технических исследований и разработок в актуальных областях цифровой электротехники: в первую очередь, в микропроцессорных устройствах релейной защиты и автоматики, низковольтных комплектных устройствах для электроэнергетики, в современных системах цифрового управления электроприводами. Уделено внимание цифровому моделированию в системах реального времени. Предназначен для специалистов, занимающихся разработкой, внедрением в производство и эксплуатацией изделий цифровой электротехники. Будет полезен молодым инженерам, магистрантам, аспирантам, а также преподавателям и научным сотрудникам соответствующих специальностей.

*Печатается по решению научно-технического совета ООО НПП «ЭКРА»*

ISBN 978-5-9907177-1-8

УДК 621.31

© ООО НПП «ЭКРА», 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Малы́й А.П., Шурупов А.А., Дони Н.А., Кошельков И.А. . . . . .</b>	<b>5</b>
Расчёт эквивалентной длины односторонне включённой длинной линии с отпайками	
Malyi A.P., Shurupov A.A., Doni N.A., Koshelkov I.A. Calculation of equivalent length of a long line With taps closed only at one end	
<b>2. Антонов В.И., Наумов В.А., Петров В.С.. . . . .</b>	<b>14</b>
Адаптивные алгоритмы цифровой автоматики ограничения повышения напряжения	
Antonov V.I., Naumov V.A., Petrov V.S. The novel adaptive algorithms of digital overvoltage protection	
<b>3. Альтшуллер М.И., Ларионов В.Н. . . . .</b>	<b>30</b>
Сравнительный анализ вариантов энергосберегающих режимов насосных агрегатов	
Altshuller M.I., Larionov V.N. Comparative analysis of the options of energy-efficient modes for pumping units	
<b>4. Матюшин Н.А., Митюков П.В., Чубуков К.А. . . . .</b>	<b>48</b>
Высоковольтная преобразовательная техника в комплексной автоматизации жилищно-коммунального хозяйства	
Matyushin N.A., Mitukov P.V., Chubukov K.A. High-voltage drives in the field of integrated automation housing and utilities infrastructure	
<b>5. Шаварин Н.И., Лазарева Н.М., Яров В.М. . . . .</b>	<b>56</b>
Динамические режимы работы конвертора с вольтодобавкой	
Shavarin N.I., Lazareva N.M., Yarov V.M. Dynamic operation voltage boost converter by	
<b>6. Егоров Е.П. . . . .</b>	<b>76</b>
Моделирование измерительного органа продольной дифференциальной токовой защиты в программном комплексе RSCAD	
Egorov E.P. Simulation measuring body longitudinal differential current protection using RSCAD software	

**7. Павлов А.В. . . . . 86**

Исследование работы дистанционной защиты при продольной и поперечной несимметрии за трансформатором в статическом режиме

Pavlov A.V.

The distance protection work in serial and transverse asymmetry under the transformer in static condition analysis

**8. Шевцов В.М., Харитонов К.В. . . . . 96**

Особенности спектров активной мощности в электросистемах с существенно нелинейными элементами

Shevцов V.M, Kharitonov K.V.

Features of active power spectrums in electrical systems with significantly non-linear elements

УДК 621.311.1:621.316.925

Малый А.П., Шурупов А.А., Дони Н.А., Кошельков И.А.

## РАСЧЁТ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДЛИНЫ ОДНОСТОРОННЕ ВКЛЮЧЁННОЙ ДЛИННОЙ ЛИНИИ С ОТПАЙКАМИ

**Аннотация:** для учёта ёмкостного тока, приносимого отпайкой в ток односторонне включённой длинной линии, в статье предлагается эквивалентировать такую линию линией без отпайки эквивалентной длины и приводится метод расчёта эквивалентной длины.

**Ключевые слова:** длинная линия, отпайка, эквивалентная длина, холостой ход, реле тока, устройство резервирования при отказе выключателя.

**Malyi A.P., Shurupov A.A., Doni N.A., Koshelkov I.A.**

### CALCULATION OF EQUIVALENT LENGTH OF A LONG LINE WITH TAPS CLOSED ONLY AT ONE END

**Abstract:** To account for the capacitive current caused by a taps on a long line closed only at one end, the article suggests that the equivalent non-tapped line can be used and provides the method for the calculation of the equivalent line length.

**Keywords:** Long line, tap, equivalent length, no-load condition, current relays, breaker failure protection.

Устройство резервирования при отказе выключателей (УРОВ) является одним из важных средств, предотвращающих развитие аварий в энергосистемах после отключения коротких замыканий (КЗ). Реле тока (РТ) в составе УРОВ, через которое протекает ток одного из выключателей линии, не возвращаясь после отключения КЗ, определяет отказавший выключатель, а УРОВ выделяет смежные с ним выключатели для их последующего отключения с целью локализации аварии.

В то же время РТ УРОВ не должно разрешать отключения смежных выключателей, если после срабатывания защиты и отказа выключателя линия отключилась с противоположной стороны (сторон, если линия с отпайками), а дуга погасла. То есть в случае длинной линии РТ УРОВ должно быть отстроено от ёмкостного тока линии в режиме холостого хода (ХХ) [1, 2].

Ток ХХ длинной линии однозначно определяется её удельными параметрами и длиной  $l_{л}$ . В [3] предложена уточнённая формула для расчёта ёмкостного тока длинной линии.

В расчётной практике, однако, возникает проблема учёта тока ХХ и при наличии отпайки (или отпаек) на линии. В [4] приведена формула для расчёта входного сопротивления длинной линии с короткой отпайкой (когда сопротивление

отпайки может быть представлено только её последовательным индуктивным сопротивлением) в режиме ХХ.

В бланках уставок защит протяжённая линия представляется однородной без отпаек линией длиной  $l_{\text{Л}}$  и её удельными сопротивлениями (реактивными и активными, продольными и поперечными) линии.

В статье предлагается в бланк уставок защит длиной линии с отпайкой вводить эквивалентную длину линии  $l_{\text{ЛЭ}}$ , рассчитанную так, чтобы входное сопротивление ХХ линии эквивалентной длины было равно действительному входному сопротивлению ХХ линии с отпайкой.

Для верификации расчётной формулы для  $l_{\text{ЛЭ}}$  использовалось сравнение результатов расчёта тока ХХ длинной линии с отпайкой (в общем случае – также в виде длинной линии) с результатами измерения этого тока на такой же линии, смоделированной на цифровом симуляторе энергосистемы RTDS [5]. Модель длинной линии в RTDS учитывает реальную конфигурацию линии с отпайкой, а также удельные последовательное индуктивное сопротивление  $x_L$ , параллельное ёмкостное сопротивление  $x_C$  и последовательное активное сопротивление  $r$ , не учитывая параллельную активную проводимость линии.

На рисунках 1 и 2 представлена схема моделируемой в RTDS длинной линии, состоящей из двух участков  $Л_1$ ,  $Л_2$  с отпайкой  $Т_1$ , и расчётная схема этой линии.

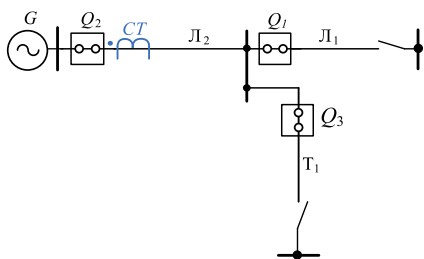


Рис. 1. Схема линии  $Л_1$ ,  $Л_2$  с отпайкой  $Т_1$

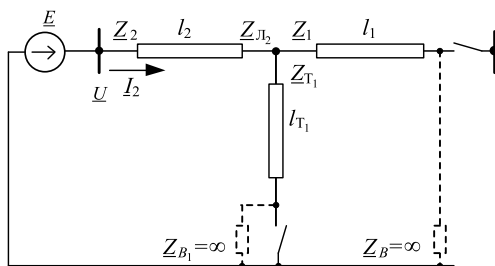


Рис. 2. Расчётная схема длинной линии с отпайкой

Предполагая, что участки  $Л_1$ ,  $Л_2$  линии и отпайки  $Т_1$  однородны и имеют одинаковые волновые параметры (волновое сопротивление  $Z$  и коэффициент фазы  $\beta$ )<sup>1</sup>, входные сопротивления  $Z_1$  линии  $Л_1$  и  $Z_{Т_1}$  отпайки  $Т_1$  в режиме ХХ можно рассчитать по формуле [6]:

$$Z_1 = -jZctg(\beta l_1), \quad Z_{Т_1} = -jZctg(\beta l_{Т_1}), \quad (1)$$

<sup>1</sup> Если участки линии, а также отпайка имеют различные параметры  $L$  и  $C$ , то приведённые ниже формулы могут быть преобразованы с учётом этих отличий.



где  $Z = \sqrt{L/C}$  – волновое сопротивление однородной длинной линии без потерь ( $L$  – удельная продольная индуктивность линии;  $C$  – удельная поперечная ёмкость линии);

$\beta = \sqrt{LC}$  – коэффициент фазы однородной длинной линии без потерь;

$l$  – длина линии.

Сопротивление  $\underline{Z}_{L_2}$ , измеренное в конце линии  $\Pi_2$  в месте отпайки, можно считать равным эквивалентному сопротивлению параллельно включённых (на XX) линии  $\Pi_1$  и отпайки  $T_1$ , разомкнутых на дальних концах:

$$\underline{Z}_{L_2} = \underline{Z}_1 // \underline{Z}_{T_1} = -jZ \frac{\operatorname{ctg}(\beta l_1) * \operatorname{ctg}(\beta l_{T_1})}{\operatorname{ctg}(\beta l_1) + \operatorname{ctg}(\beta l_{T_1})} = jZ \operatorname{tg} \sigma_{L_2}, \quad (2)$$

где  $\operatorname{tg} \sigma_{L_2} = X_{L_2} / Z = \underline{Z}_{L_2} / jZ = -\frac{\operatorname{ctg}(\beta l_1) * \operatorname{ctg}(\beta l_{T_1})}{\operatorname{ctg}(\beta l_1) + \operatorname{ctg}(\beta l_{T_1})}, \quad (3)$

$X_{L_2}$ , равное  $\underline{Z}_{L_2} / j$ , – реактивное сопротивление (действительная, не комплексная величина), измеренное в конце линии  $\Pi_2$ . Сопротивление  $\underline{Z}_{L_2}$  является одновременно сопротивлением нагрузки линии  $\Pi_2$ .

Входное сопротивление  $\underline{Z}_2$  линии  $\Pi_2$ , нагруженной на сопротивление  $\underline{Z}_{L_2}$ , равно [6]:

$$\underline{Z}_2 = jZ \operatorname{tg}(\beta l_2 + \sigma_{L_2}) = jZ * \frac{\operatorname{tg}(\beta l_2) + \operatorname{tg} \sigma_{L_2}}{1 - \operatorname{tg}(\beta l_2) * \operatorname{tg} \sigma_{L_2}}. \quad (4)$$

Подставляя (3) в (4), получим расчётное сопротивление  $\underline{Z}_2$  в начале линии:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_2 &= jZ * \frac{\operatorname{tg}(\beta l_2) + \operatorname{tg} \sigma_{L_2}}{1 - \operatorname{tg}(\beta l_2) * \operatorname{tg} \sigma_{L_2}} = jZ * \frac{\operatorname{tg}(\beta l_2) - \frac{\operatorname{ctg}(\beta l_1) * \operatorname{ctg}(\beta l_{T_1})}{\operatorname{ctg}(\beta l_1) + \operatorname{ctg}(\beta l_{T_1})}}{1 - \operatorname{tg}(\beta l_2) * \left( -\frac{\operatorname{ctg}(\beta l_1) * \operatorname{ctg}(\beta l_{T_1})}{\operatorname{ctg}(\beta l_1) + \operatorname{ctg}(\beta l_{T_1})} \right)} = \\ &= jZ * \frac{\operatorname{tg}(\beta l_2) * (\operatorname{ctg}(\beta l_1) + \operatorname{ctg}(\beta l_{T_1})) - \operatorname{ctg}(\beta l_1) * \operatorname{ctg}(\beta l_{T_1})}{\operatorname{ctg}(\beta l_1) + \operatorname{ctg}(\beta l_{T_1}) + \operatorname{tg}(\beta l_2) * \operatorname{ctg}(\beta l_1) * \operatorname{ctg}(\beta l_{T_1})}. \quad (5) \end{aligned}$$

Результаты верификации формулы (5) приведены в табл. 1 и на рис. 3.

Табл. 1. Зависимость тока холостого хода линии с отпайкой от длины участков линии

l, км участка	Z <sub>2</sub> , Ом	I <sub>2</sub> , А			
		Л <sub>1</sub> , Л <sub>2</sub> с отпайкой Т <sub>1</sub>	RTDS	Л <sub>1</sub> , Л <sub>2</sub> , Т <sub>1</sub> паралл.	Л <sub>1</sub> , Л <sub>2</sub> , Т <sub>1</sub> послед.
1	2	3	4	5	6
50	1511	200,5	201	199,8	202,1
100	733,7	413,1	415	401,3	420,1
150	464,4	652,6	656	606,2	675,9
200	322,0	941,3	947	816,3	1006
250	230,0	1318	1327	1033	1492
300	162,8	1862	1879	1260	2358
350	109,4	2772	2805	1499	4615
400	64,01	4735	4815	1754	3748

Фазный ток  $I_2$  в начале линии Л<sub>2</sub> рассчитывался по формуле:

$$I_2 = U / Z_2 = 525000 / (\sqrt{3} * Z_2), \text{ А,}$$

где  $U$  – фазное напряжение в начале линии Л<sub>2</sub>, В (рис. 1);

$Z_2$  – входное сопротивление линии Л<sub>2</sub>, Ом (формула (5)).

Параметры расчётной схемы и модели системы в RTDS приведены в Приложении.

Напряжение  $U$  в начале линии в расчётах и при моделировании линии в RTDS принято номинальным. Это отображает действие регуляторов напряжения в сети и соответствует внутреннему сопротивлению эквивалентного источника питания  $E$ , равному нулю.

В выполненных расчётах длины участков линии Л<sub>1</sub>, Л<sub>2</sub>, Т<sub>1</sub> для определённости приняты одинаковыми и варьировались от 50 до 400 км:

$$l_1 = l_2 = l_{T1} = l = \text{var.}$$

В первом столбце табл. 1 приведена длина участков Л<sub>1</sub>, Л<sub>2</sub> и отпайки Т<sub>1</sub>; во втором – расчётное сопротивление  $Z_2$  в начале участка Л<sub>2</sub>; в третьем и четвертом – значения тока  $I_2$  в начале участка Л<sub>2</sub>: полученное расчётом по формуле (5) и измеренное на модели системы в RTDS.

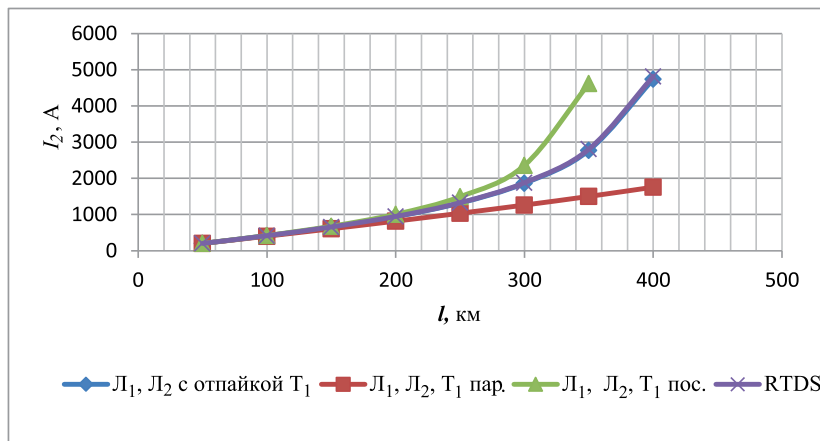


Рис. 3. Зависимость тока холостого хода линии с отпайкой от длины участков линии

Как следует из анализа табл. 1 и рис. 3, результаты расчёта тока односторонне включённой линии с отпайкой по формуле (5) и в модели с использованием RTDS близки. Это означает, что данный расчёт может с достаточной точностью производиться без учёта активных потерь в линии, по упрощённой (по сравнению с RTDS) формуле (5).

В табл. 1 и на рис. 3 помимо значений и графиков тока односторонне включённой линии с отпайкой, соответствующих формуле (5) и результатам моделирования на RTDS, для сравнения показаны также значения (столбцы 5 и 6) и графики тока « $I_1, I_2, T_1$  пар.» и « $I_1, I_2, T_1$  пос.». Первый из них соответствует расчёту ёмкостного тока при параллельно соединённых трёх участках ( $I_1, I_2, T_1$ ) линии. Расчётный ток линии в этом случае, естественно, меньше действительного.

Второй график, « $I_1, I_2, T_1$  послед.» соответствует расчёту тока при последовательно соединённых трёх участках линии и показывает завышенные значения расчётного тока, так как в этом случае рассчитывается ток линии повышенной длины, которая при достаточно длинных отрезках линии приближается к режиму резонанса токов.

Для определения эквивалентной длины линии следует по формуле (5) рассчитать значение входного сопротивления  $Z_2$  линии с отпайкой, а затем определить эквивалентную длину  $l_{лЭ}$  линии (для записи в бланк уставок) по формуле, являющейся модификацией формулы (1):

$$l_{лЭ} = (\arctg(Z / Z_2)) / \beta. \quad (6)$$

Например, полагая отрезки линии и отпайку равными между собой и равными

$$l_1 = l_2 = l_{T1} = 300 \text{ км}$$

и зная значения  $Z_2 = 163 \text{ Ом}$  (табл. 1) и  $Z = 293 \text{ Ом}$ ;  $\beta = 1,286 \cdot 10^{-3} \text{ рад / км}$  (Приложение), рассчитаем  $l_{ЛЭ}$ :

$$l_{ЛЭ} = \text{arctg} ( 293/163 ) / ( 1,286 \cdot 10^{-3} ) = 827,1 \text{ км.}$$

Расчётные значения эквивалентной длины  $l_{ЛЭ}$  линии для заданной конфигурации сети (рис. 2) в диапазоне равных длин участков от 50 до 400 км приведены в табл. 2.

Табл. 2. Расчётные значения эквивалентной длины  $l_{ЛЭ}$  линии

$l$ участка, км	50	100	150	200	250	300	350	400
$l_{ЛЭ}$ , км	148,9	295,4	437,6	574,1	703,97	827,1	943,7	1054,2

Приведенный метод расчёта входного сопротивления длинной линии с отпайкой можно использовать также в случае линии с несколькими отпайками. Расчётная схема для случая с  $n$  последовательными участками и  $(n-1)$  отпайками приведена на рис. 4.

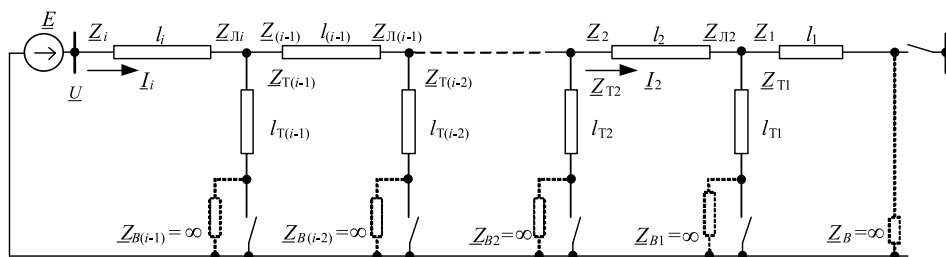


Рис. 4. Расчётная схема длинной линии с несколькими отпайками

Как и в предыдущем случае, вначале по формуле (5) рассчитывают входное сопротивление  $Z_2$  участка линии  $\Pi_2$ . Затем для  $i$  от 3 до  $n$  рассчитывают входное сопротивление  $Z_i$  участка  $\Pi_i$  линии, последовательно применяя формулу (7), аналогичную формуле (4).

$$Z_i = jZ \text{tg}(\beta l_i + \sigma_{\Pi i}) = jZ \cdot \frac{\text{tg}(\beta l_i) + \text{tg} \sigma_{\Pi i}}{1 - \text{tg}(\beta l_i) * \text{tg} \sigma_{\Pi i}}, \quad (7)$$

где  $i = 3 \div n$ ;

$n$  – число последовательных участков линии, разделённых отпайками;

$$\operatorname{tg} \sigma_{\text{Л}i} = X_{\text{Л}i} / Z = Z_{\text{Л}i} / jZ = - \frac{Z_{(i-1)} * Z \operatorname{ctg}(\beta L_{\text{T}(i-1)})}{Z_{(i-1)} + Z \operatorname{ctg}(\beta L_{\text{T}(i-1)})} - \text{учитывает выходное со-}$$

противление  $Z_{\text{Л}i}$  участка  $\text{Л}_i$ , равное эквивалентному сопротивлению параллельно соединённых входного сопротивления  $Z_{(i-1)}$  предыдущего участка  $\text{Л}_{(i-1)}$  и сопротивления  $Z \operatorname{ctg}(\beta L_{\text{T}(i-1)})$  отпайки  $\text{T}_{(i-1)}$ .

### Заключение:

1. Эквивалентная длина линии с отпайкой, которую требуется внести в бланк уставок шкафа типа ШЭ2710, может быть рассчитана как длина длинной линии без отпайки, имеющей то же сопротивление, что и расчётное сопротивление длинной линии с отпайкой.

2. Длина протяжённой линии с отпайкой при расчёте отстройки реле тока УРОВ от токов холостого хода линии, односторонне отключённой после КЗ, может быть с достаточной точностью получена (формулы (5) и (6)) с учётом распределённой индуктивности и распределённой ёмкости линии, без учёта активного сопротивления линии (по крайней мере при длине участков линии значительно меньшей 1/4 длины волны).

3. Использованный в статье подход может быть распространён на расчёт эквивалентной длины линии с несколькими отпайками путём многократного применения формулы (7) для расчёта входного сопротивления такой линии.

### Приложение:

Параметры элементов расчётной схемы и модели линии в RTDS:  
Номинальное линейное напряжение системы – 525 кВ;  
Сопротивление источника ЭДС – 0 Ом.

Табл. П1. Удельные параметры линии (фазные)

Удельное активное сопротивление прямой последовательности $r'_1$ , Ом/км	0,018547
Удельное индуктивное сопротивление прямой последовательности $x'_{L1} = j\omega L_1$ , Ом/км	0,37661
Удельное ёмкостное сопротивление прямой последовательности $x'_{C1} = j\omega C_1$ , МОм*км	0,2279
Удельное активное сопротивление нулевой последовательности $r'_0$ , Ом/км	0,3618376
Удельное индуктивное сопротивление нулевой последовательности $x'_{L0}$ , Ом/км	1,227747
Удельное ёмкостное сопротивление нулевой последовательности $x'_{C0}$ , МОм*км	0,34514

Волновые параметры прямой последовательности линии:

$$Z_1 = \sqrt{j\omega L_1 / (j\omega C_1)} = \sqrt{0,37661 * 0,2279 * 10^6} = 293 \text{ Ом};$$

$$\gamma_1 = j\beta = \sqrt{j\omega L_1 * j\omega C_1} = j\sqrt{0,37661 / (0,2279 * 10^6)} = j1,286 * 10^{-3} \text{ рад/км.}$$

#### Литература

1. Руководящие указания по релейной защите. Вып.6. Устройства резервирования при отказе выключателей 35-500 кВ. – М.-Л.: Энергия, 1966.
2. Малый А.П., Шурупов А.А., Дони Н.А., Кочкин Н.А., Карсаков В.Г. Выбор параметров локального микропроцессорного УРОВ. // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – №1. – С. 68-72.
3. Малый А.П., Шурупов А.А., Дони Н.А., Кошельков И.А. Расчёт уставки реле тока УРОВ. Верификация уточнённой формулы для учёта тока холостого хода длинной линии. // Релейная защита и автоматизация. – 2015. – №2. – С. 28-31.
4. Лосев С.Б., Чернин Д.Б. Расчёт электромагнитных переходных процессов для релейной защиты на линиях большой протяжённости. – М.: Энергия, 1972.
5. Real Time Digital Simulator for the Power Industry // RTDS Technologies Inc., Winnipeg, Manitoba, Canada. – 2012. [Цифровое моделирование в режиме реального времени для энергетики; материалы фирмы производителя программно-аппаратного комплекса RTDS].
6. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники: Т. 2. – СПб.: Питер, 2009.

### Сведения об авторах



#### **Малый Альберт Петрович**

*Ведущий инженер ООО НПП «ЭКРА». В 1958 году окончил МЭИ, кандидат технических наук (НПИ, 1988 год), старший научный сотрудник.*



#### **Шурупов Алексей Александрович**

*Заведующий отделом защит подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА». В 1973 году окончил НПИ, кандидат технических наук (НПИ, 1981 год), старший научный сотрудник.*



#### **Дони Николай Анатольевич**

*Директор по науке — заведующий отделом перспективных разработок. Окончил энергетический факультет НПИ в 1969 году. В 1981 году во ВНИИЭ защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование и разработка высокочастотной защиты линий сверхвысокого напряжения». Имеет более 120 научных публикаций в области релейной защиты, микропроцессорной техники и цифровой обработки сигналов электроэнергетических систем.*



#### **Кошельков Иван Александрович**

*Руководитель группы моделирования отдела разработки подстанционного оборудования. Окончил кафедру электрических и электронных аппаратов электротехнического факультета ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова» в 2010 году. Присвоена степень магистра техники и технологии по направлению «Электротехника, электро-механика и электротехнологии».*

УДК 621.316.722.3

Антонов В.И., Наумов В.А., Петров В.С.

## АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ЦИФРОВОЙ АВТОМАТИКИ ОГРАНИЧЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

**Аннотация:** в статье рассматриваются адаптивные алгоритмы цифровой автоматики ограничения повышения напряжения (АОПН). Вводится понятие остаточного ресурса электрической изоляции, под которым понимается условная интегральная величина, характеризующая запас времени работы защищаемого оборудования под данным повышенным напряжением без потери работоспособности и разрушения электрической изоляции. Введенное понятие остаточного ресурса позволяет преобразовать вольт-временную характеристику в удобную для реализации в АОПН диаграмму расхода остаточного ресурса электрической изоляции. Диаграмма упрощает реализацию контроля остаточного ресурса электрической изоляции и показывает, как меняется остаток ресурса изоляции в течение времени существования повышения напряжения.

Введенные в рассмотрение понятия остаточного ресурса и диаграммы расхода остаточного ресурса являются основой предлагаемых в настоящей статье новых адаптивных алгоритмов управления техническими мероприятиями по ликвидации повышения напряжения и учета восполнения ресурса электрической изоляции после устранения повышения напряжения. Гибкость управления техническими мероприятиями обеспечивается контролем уровня остаточного ресурса согласно диаграмме расхода остаточного ресурса защищаемого оборудования и адаптивным изменением порога срабатывания признака отказа технических мероприятий предыдущих ступеней.

**Ключевые слова:** автоматика ограничения повышения напряжения, повышение напряжения, технические мероприятия, электрическая изоляция, диаграмма расхода остаточного ресурса электрической изоляции.

**Antonov V.I., Naumov V.A., Petrov V.S.**

### THE NOVEL ADAPTIVE ALGORITHMS OF DIGITAL OVERVOLTAGE PROTECTION

**Abstract:** in the article adaptive algorithms of digital overvoltage protection are considered. The residual resource of electrical insulation concept is introduced. This concept is an abstract integral value which characterizes the time reserve of the safe operation of protected equipment under the operating voltage. The residual resource of electrical insulation concept allows converting the voltage-time characteristic to convenient for implementation in overvoltage protection flow



diagram of residual resource of electrical insulation. The diagram simplifies control of residual resource of electrical insulation and shows his change during the overvoltage.

Both the estimation of residual resource and the flow diagram of residual resource are basis of proposed in this article the novel adaptive algorithms to control of overvoltage eliminate actions and to accounting residual resource of electrical insulation recovery after overvoltage eliminating. The flexibility of overvoltage eliminate actions control is provided by monitoring of residual resource according to flow diagram of residual resource of electrical insulation and adaptive changing threshold of tripping flag of previous overvoltage elimination steps non-operation.

**Keywords:** overvoltage protection, overvoltage, technical actions, electrical insulation, flow diagram of residual resource of electrical insulation.

Автоматика ограничения повышения напряжения (АОПН) предназначена для устранения длительного повышения напряжения сети выше наибольшего рабочего уровня в различных режимах, возникающих при аварийных переключениях в электрической сети. Такие повышения напряжения ограничиваются путем изменения режима работы синхронных компенсаторов на подстанции либо коэффициента трансформации силового трансформатора, либо путем изменения схемы сети включением шунтирующих реакторов. Все вместе эти действия АОПН на элементы сети называются техническими мероприятиями [1], поэтому далее в статье они будут объединены этим термином.

Повышенное напряжение действует на изоляцию высоковольтного оборудования по-разному. При незначительных повышениях напряжения главным фактором разрушения электрической изоляции высоковольтного оборудования является ее нагрев [2], а при высоком уровне напряжения решающую роль уже играют процессы ионизации изоляционного промежутка. Действительно, допустимое время нахождения изоляции под высоким напряжением относительно невелико, и процессы нагрева в этом случае не успевают оказать на изоляцию сколь-нибудь заметного эффекта [3]. Исходя именно из этих предпосылок, национальный стандарт Российской Федерации [4] и стандарт ОАО «ФСК ЕЭС» [5] предписывают использовать в современной АОПН в качестве *контролируемой величины* действующее значение при невысоких повышениях напряжения и максимальное значение – при напряжениях значительного уровня. Эти же особенности свойств электрической изоляции должны быть учтены и при управлении техническими мероприятиями [6, 7]. Поэтому АОПН должна адаптивно изменять стратегию управления техническими мероприятиями в зависимости от уровня повышенного напряжения и предыстории работы защищаемого высоковольтного оборудования.

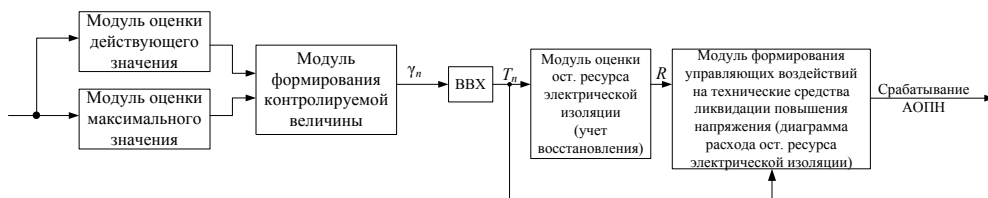


Рис. 1. Функционально-логическая схема новой цифровой АОПН

Рассмотрению новых адаптивных алгоритмов АОПН, основанных на непрерывном учете условий работы защищаемого высоковольтного оборудования и гибком управлении техническими мероприятиями, и посвящена настоящая статья. Предлагаемые алгоритмы осуществляют интегрированный учет работы защищаемого оборудования в условиях изменяющегося во времени уровня повышенного напряжения и интеллектуальное резервирование отказа ступеней АОПН (рис. 1).

### Остаточный ресурс электрической изоляции

Здесь под остаточным ресурсом электрической изоляции понимается условная интегральная величина  $R$ , характеризующая запас времени работы защищаемого оборудования под данным повышенным напряжением без потери работоспособности и разрушения электрической изоляции. Если оборудование не было под действием повышенного напряжения или прошло достаточное время для восстановления электрической изоляции после предыдущего повышения напряжения, то остаточный ресурс принимается равным 1.

Остаточный ресурс может быть определен по вольт-временной характеристике (ВВХ) высоковольтного оборудования [8 (табл. Б.1, Б.2)], регламентирующей допустимое время  $T_n$  нахождения высоковольтного оборудования под повышенным напряжением данного уровня  $\gamma_n = U_n / U_{\max}$ , где  $U_n$  – измеренное действующее значение текущего режима повышенного напряжения (или вычисленное по максимальному значению),  $U_{\max}$  – действующее значение наибольшего рабочего напряжения.

Для придания адаптивности алгоритмам цифровой АОПН удобно рассматривать ВВХ под другим углом зрения, чем в технике высоких напряжений. Если там ВВХ задают как зависимость допустимого уровня повышения напряжения  $\gamma_n$  от длительности  $T_n$  нахождения изоляции высоковольтного оборудования под этим напряжением, то при разработке АОПН предпочтительнее определять ее как зависимость допустимого времени  $T_n$  нахождения изоляции под повышенным напряжением  $\gamma_n$ . Такой подход упрощает определение интенсивности расхода остаточного ресурса изоляции  $\Delta_R^{T_n}$

с помощью ВВХ. Алгоритм ее расчета следует непосредственно из определения ВВХ. Положим, что остаточный ресурс изоляции не расходуется и составляет 1. Если высоковольтное оборудование подвергнется повышению напряжения  $\gamma_n$ , то ресурс его изоляции будет полностью израсходован за время  $T_n$ . Отсюда следует, что интенсивность расхода ресурса изоляции при постоянном уровне повышенного напряжения  $\gamma_n$  определяется как

$$\Delta R_n^{T_n} = \frac{1}{T_n}. \quad (1)$$

Остаточный ресурс электрической изоляции

$$R(k) = R(k-1) - \Delta R(k) \quad (2)$$

предлагается определять на каждом полупериоде напряжения путем вычитания из остаточного ресурса предыдущего полупериода  $R(k-1)$  части ресурса  $\Delta R(k)$ , расходуемой в течение текущего полупериода ( $k$  – номер полупериода). Величина расходуемого на полупериоде ресурса  $\Delta R(k)$  определяется с учетом формулы для интенсивности расхода (1):

$$\Delta R(k) = T_0 \Delta R_n^{T_n}(k), \quad (3)$$

где учтено, что интенсивность расхода ресурса может быть разной на каждом из полупериодов напряжения.

### **Диаграмма расхода остаточного ресурса электрической изоляции**

Введенное выше понятие остаточного ресурса позволяет преобразовать неудобное для реализации в АОПН вольт-временную характеристику в *диаграмму расхода остаточного ресурса электрической изоляции*. Диаграмма упрощает реализацию контроля остаточного ресурса электрической изоляции и показывает, как меняется остаток ресурса  $R$  изоляции в течение времени существования повышения напряжения  $\gamma_n$ . Если  $\gamma_n$  не меняется во времени, то, как следует из (3), интенсивность расхода ресурса будет тоже постоянной, и ресурс изоляции уменьшается по линейному закону от 1 до 0 за время  $T_n$ . Поэтому диаграмма расхода ресурса  $R$  представляет собой семейство прямых, имеющих общее начало в точке  $R = 1$  (при  $T = 0$ ) и заканчивающихся на оси допустимого времени  $T$  в точках  $T_n$ . На рис. 2 показана схема конвертации ВВХ в диаграмму расхода остаточного ресурса. Сплошные наклонные линии соответствуют линиям расхода ресурса изоляции при повышении напряжения  $\gamma_I \div \gamma_{III}$  (допустимые времена  $T_I \div T_{III}$ ), регламентируемые стандартом [8].

Промежуточные точки ВВХ определяются путем интерполяции.

Далее линии расхода ресурса при повышенном напряжении неизменно-го уровня  $\gamma_n$  с допустимым временем  $T_n$  будем обозначать как  $\gamma(T_n)$ .

### Адаптивный алгоритм управления техническими мероприятиями

Необходимый уровень технического совершенства АОПН в значительной мере зависит от обоснованности и своевременности применения технических мероприятий. В зависимости от уровня повышенного напряжения должны приводиться в действие различные технические мероприятия. Причем в случае отказа или неэффективности технических мероприятий данной ступени приводятся в действие технические мероприятия следующей ступени, решение о вводе которых принимается на основе контроля успешности

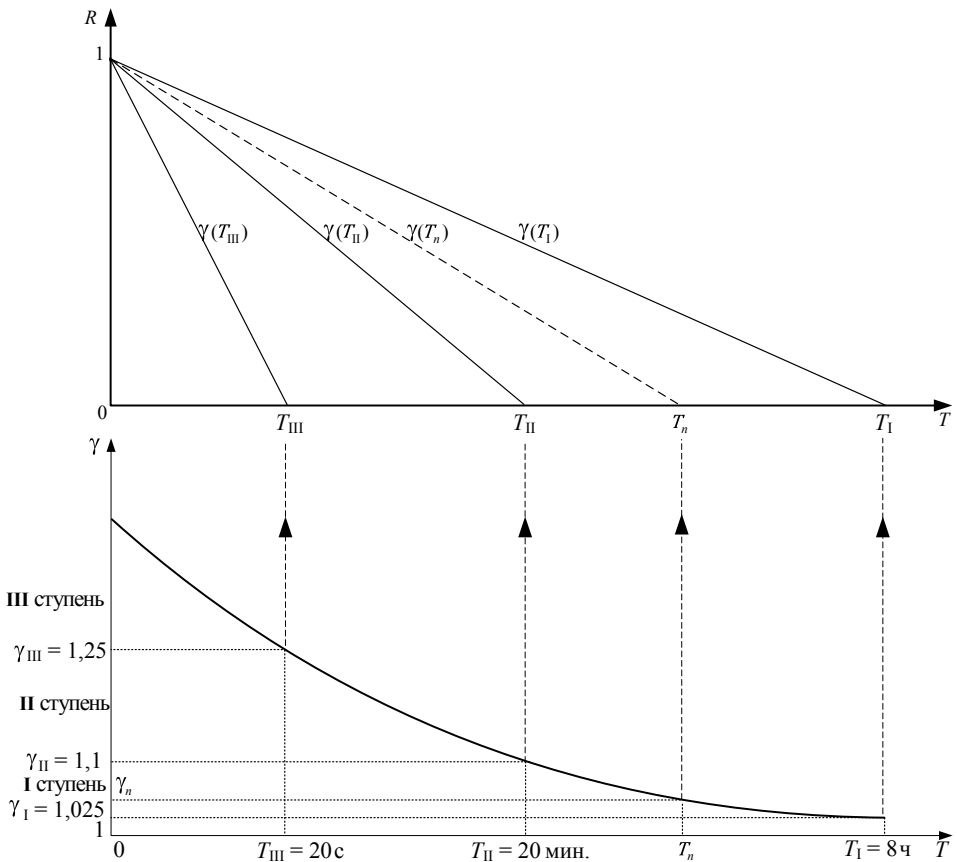


Рис. 2. Диаграмма расхода остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования

технических мероприятий данной ступени. Известные устройства АОПН, например, ШП 2704 [9], успешность действия технических мероприятий ступени контролируют путем измерения длительности повышения напряжения. Если она превысит заданное время, то формируется признак отказа технических мероприятий ступени и приводятся в действие технические мероприятия следующей ступени. Использование фиксированного времени для контроля успешности технических мероприятий снижает эффективность применения технических мероприятий, особенно в случае перемежающихся повышений напряжения, поскольку не учитывается расход ресурса изоляции при предыдущих повышениях напряжения. В связи с этим защищаемое оборудование может быть либо отключено преждевременно, либо, наоборот, необоснованно оставлено под напряжением.

С целью повышения гибкости управления техническими мероприятиями предлагается адаптивный способ формирования управляющих воздействий на технические средства ликвидации повышения напряжения [10].

В предлагаемом способе контроль успешности технических мероприятий ступени осуществляется по уровню остаточного ресурса. При этом учет расхода ресурса изоляции осуществляется согласно диаграмме расхода остаточного ресурса защищаемого оборудования, благодаря чему интенсивность расхода ресурса изоляции полностью согласуется с текущим уровнем повышения напряжения. Это позволяет вводить технические мероприятия следующей ступени в действие вовремя, не допуская ни преждевременного приведения их в действие (исключая недоиспользование ресурсов электрооборудования), ни их запаздывания (предотвращая повреждение оборудования).

Способ может иметь неограниченное число ступеней для управления техническими мероприятиями. Однако с целью упрощения пояснения принципа его работы будем считать, что на ВВХ и диаграмме расхода остаточного ресурса технические мероприятия представлены тремя ступенями.

Способ в первую очередь и без замедления вводит в действие технические мероприятия той ступени, на которую приходится повышение напряжения  $\gamma(T_n)$ . И логика действия ступеней такова, что отказ предпринятых данной ступенью технических мероприятий (отказ оборудования или неэффективность действия) должен привести в действие технические мероприятия следующей ступени.

Поясним вначале работу предлагаемого способа при возникновении повышенного напряжения невысокого уровня, когда будет задействована первая ступень. В этом случае приводятся в действие технические мероприятия

невысокого быстродействия, связанные с изменением напряжения с помощью переключения РПН и т.п. Если по каким-либо причинам они не сработают, то способ должен привести в действие техническое мероприятие следующей, второй, ступени.

Для выявления отказа технических мероприятий используется специальный признак, действующий при снижении остаточного ресурса  $R$  изоляции до пороговой величины текущей ступени. Порог должен быть таким, чтобы способ успевал последовательно, по мере необходимости, привести в действие технические мероприятия остальных ступеней. В случае первой ступени пороговой величиной будет  $R_1^{\gamma(T_1)}$ , при достижении которой приводятся в действие технические мероприятия второй ступени. Здесь верхний индекс указывает, что порог ассоциирован расходом остаточного ресурса вдоль линии  $\gamma(T_1)$ . Порог должен быть достаточно велик для того, чтобы при данном повышении напряжения оставшегося до снижения остаточного ресурса до нуля времени  $T_{\Sigma 1}$  хватило для осуществления технических мероприятий всех оставшихся ступеней с учетом вероятности их отказа, кроме последней – ступени отключения оборудования от сети. Под действием текущего повышенного напряжения  $\gamma(T_1)$  расход ресурса будет происходить с интенсивностью, определяемой выражением (1) [на рис. 3 изменение ресурса происходит по штриховой наклонной линии  $\gamma(T_1)$ ]. Поэтому пороговая величина

$$R_1^{\gamma(T_1)} = \Delta_R T_{\Sigma 1} = \frac{T_{\Sigma 1}}{T_1} \quad (4)$$

будет тем выше, чем круче линия расхода ресурса на диаграмме (чем меньше  $T_1$ ).

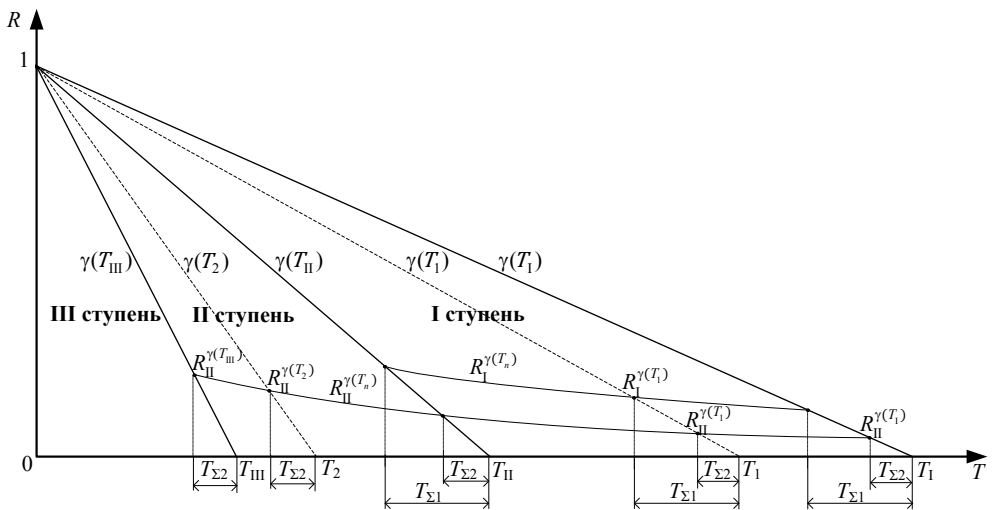


Рис. 3. Иллюстрация работы адаптивного способа управления техническими мероприятиями

Как видно из (4), уставка  $R_I^{\gamma(T_1)}$  признака отказа технических мероприятий первой степени будет адаптивно меняться в зависимости от уровня повышенного напряжения, и на диаграмме расхода остаточного ресурса будет представлять собой гиперболу (рис. 3).

Поведение способа на второй степени практически полностью совпадает с поведением на первой степени. Разница лишь в том, что пороговая величина  $R_{II}^{\gamma(T_2)}$  признака отказа технических мероприятий второй степени рассчитывается исходя из времени  $T_{\Sigma 2}$ , нужного для осуществления технических мероприятий третьей степени – отключения оборудования от сети

$$R_{II}^{\gamma(T_2)} = \Delta_R^{T_2} T_{\Sigma 2} = \frac{T_{\Sigma 2}}{T_2}. \quad (5)$$

Величина порога  $R_{II}^{\gamma(T_2)}$  (5) также будет зависеть от уровня повышенного напряжения  $\gamma(T_2)$ . Поэтому для каждой линии расхода ресурса будет свое значение пороговой величины. И, как видно из рис. 3, оно может быть определено как точка пересечения кривой  $R_{II}^{\gamma(T_n)}$  с линиями расхода остаточного ресурса. Например, на второй степени пороговая величина  $R_{II}^{\gamma(T_2)}$  – точка пересечения с линией  $\gamma(T_2)$ , а на первой степени  $R_{II}^{\gamma(T_1)}$  – с линией  $\gamma(T_1)$ .

На диаграмме кривая пороговой величины  $R_{II}^{\gamma(T_n)}$  берет начало на левой граничной линии  $\gamma(T_{III})$  второй степени (точка  $R_{II}^{\gamma(T_{III})}$ ) и заканчивается на правой граничной линии  $\gamma(T_I)$  первой степени (точка  $R_{II}^{\gamma(T_I)}$ ). Это дает возможность, в случае последовательного отказа мероприятий первой, а затем и второй степени, выработать признак их отказа и ввести в действие третью степень (в данном случае – дать сигнал на отключение оборудования). Сценарий такого действия способа иллюстрируется примером развития событий по линии  $\gamma(T_I)$ : при неуспешной работе технических мероприятий в точке  $R_I^{\gamma(T_I)}$  способ вводит в действие технические мероприятия второй степени, а затем, при их отказе, в точке  $R_{II}^{\gamma(T_I)}$  – мероприятия третьей степени.

При работе способа на последней степени (в данном примере – третьей) оборудование отключается от сети без выдержки времени.

Несложно увидеть разницу в признаках отказа технических мероприятий в устройствах АОПН с контролем продолжительности повышения напряжения и предлагаемого способа. В первых из них считается, что признак отказа технических мероприятий данной степени появился, если длительность повышения напряжения достигла уставки по времени. Предполагается, что начальное значение ресурса изоляции  $R = 1$ . Тогда уставка должна быть выбрана такой, чтобы на линии с максимальным повышением напряжения данной степени оставалось достаточно времени для срабатывания технических мероприятий других степеней с учетом вероятности последовательного отка-

за последующих ступеней. Для них уставка времени отказа первой ступени на диаграмме (рис. 4) будет представлять вертикальный отрезок, исходящий из точки пересечения линии максимального повышения напряжения  $\gamma(T_{II})$  ступени с кривой пороговой величины  $R_1^{\gamma(T_n)}$  (из точки  $R_1^{\gamma(T_{II})}$ ). В случае последующего отказа второй ступени в таких устройствах будут приведены в действие технические мероприятия третьей ступени; уставка времени будет выбираться исходя из точки пересечения линии  $\gamma(T_{II})$  с кривой пороговой величины  $R_{II}^{\gamma(T_n)}$  (точка  $R_{II}^{\gamma(T_{II})}$ ). Аналогично выбирается уставка признака отказа второй ступени (исходя из точки  $R_{II}^{\gamma(T_{III})}$ ).

Как видно из рис. 4, известные устройства во многих случаях преждевременно вводят технические мероприятия следующих ступеней. Например, при повышении напряжения  $\gamma(T_I)$  признак отказа первой ступени возникает в точке  $P_1$ , что приведет к преждевременному вводу технических мероприятий второй ступени. Если же и вторая ступень будет неэффективна, то в точке  $P_2$  пересечения линии расхода ресурса  $\gamma(T_I)$  с порогом признака отказа второй ступени будет приведено в действие техническое мероприятие третьей ступени, преждевременно отключая оборудование от сети.

Но самый существенный недостаток известных устройств заключается в том, что они не учитывают вероятность возникновения случая, когда начальное значение ресурса может быть не равно 1. Такое возможно, когда повышения напряжения носят перемежающийся характер. Каждый раз при появлении перемежаю-

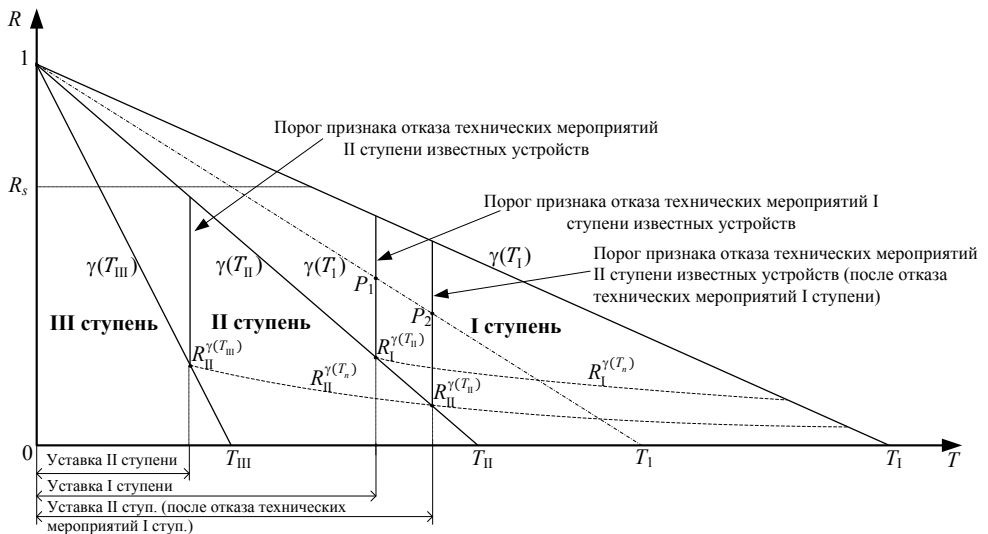


Рис. 4. Пороги признака отказа для АОПН с контролем длительности повышения напряжения на диаграмме расхода остаточного ресурса электрической изоляции



щихся повышений напряжения они начинают отсчитывать их длительность заново. Поскольку истинное начальное значение ресурса в этом случае  $R = R_s < 1$ , а длительность повышения напряжения эти устройства отсчитывают без учета затраченного ресурса, то технические мероприятия ступеней могут быть введены в действие уже при исчерпанном ресурсе изоляции. Это может привести к повреждению высоковольтного оборудования.

Предлагаемый же способ приводит в действие технические мероприятия ступеней всегда исходя из оценки остаточного ресурса изоляции, что позволяет осуществлять их вовремя.

### Адаптивный способ учета восполнения ресурса электрической изоляции после устранения повышения напряжения

Способность учитывать процессы восстановления свойств электрической изоляции после устранения повышения напряжения является еще одной важной характеристикой АОПН, определяющей ее уровень технического совершенства. Так, уровни повышения напряжений и допустимые времена нахождения высоковольтного оборудования под их действием регламентированы в стандарте [8] с учетом того, что их воздействие не должно снизить эксплуатационную надежность электрооборудования и не сокращать срок его службы [11, 12]. Полагается, что после уменьшения уровня напряжения до длительно допустимого по прошествии определенного времени ресурс электрической изоляции восстанавливается до исходного значения. При этом должно приниматься во внимание, что процесс восстановления ресурса изоляции зависит от уровня напряжения, действовавшего во время повышения напряжения [8, 12]. Это связано с зависимостью характера деструктивных

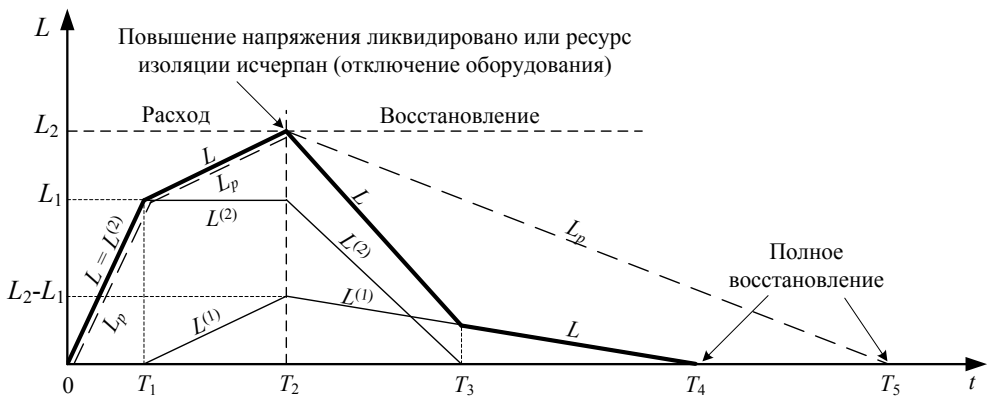


Рис. 5. Процессы учета восстановления ресурса электрической изоляции при изменении уровня повышенного напряжения в предлагаемом способе и существующих устройствах

процессов от уровня действующего напряжения. Например, при повышенном напряжении невысокого уровня изоляция оборудования может находиться под напряжением достаточно долго, и при этом главным фактором разрушения изоляции является ее нагрев. При повышенных напряжениях с высоким уровнем решающую роль играют процессы ионизации изоляционного промежутка, в связи с чем допустимое время нахождения изоляции под напряжением относительно невелико. Из-за относительно короткого времени нахождения изоляции под таким высоким напряжением процессы нагрева изоляции не оказывают столь заметного эффекта на расход ресурса изоляции. Поэтому интенсивность восстановления изоляции в первом случае будет невысокой, а во втором случае будет значительной. Эта разница в процессах восстановления изоляции должна учитываться в АОПН.

Удобно раскрывать сущность работы предлагаемого способа [13] в режиме устранения повышения напряжения или отключения высоковольтного оборудования из-за исчерпания ресурса изоляции (рис. 5). Будем считать, что с помощью предпринятых технических мероприятий повышенное напряжение снижено до некоторого все еще повышенного уровня в момент времени  $T_1$ , а затем повышение напряжения устранено (или высоковольтное оборудование отключено) в момент времени  $T_2$ .

Рассмотрим вначале для сравнения работу АОПН, использующей фиксированный учет восстановления электрических свойств изоляции защищаемого высоковольтного оборудования. Каждому из уровней повышенного напряжения соответствует своя интенсивность расхода ресурса изоляции. Поэтому вначале расход ресурса изоляции  $L_p$  накапливается с интенсивностью  $\Delta_L^{(2)}$  (наклонная  $L_p$  на рис. 5 при  $0 \leq t \leq T_1$ ),

а затем, при снижении уровня напряжения – с интенсивностью  $\Delta_L^{(1)}$  (наклонная  $L_p$  при  $T_1 < t \leq T_2$ ):

$$L_p = (t - T_1)\Delta_L^{(1)} + L_1, \quad T_1 < t \leq T_2,$$

(6)

где  $L_1 = T_1\Delta_L^{(2)}$  – оценка затраченного ресурса изоляции, вычисленная к моменту времени  $T_1$  применения технических мероприятий по снижению напряжения. К моменту устранения повышения напряжения  $T_2$  оценка расхода ресурса  $L_p$  достигнет величины  $L_2$ .

После устранения повышения напряжения (или отключения высоковольтного оборудования из-за исчерпания ресурса изоляции) известные устройства

начинают учитывать процесс восстановления ресурса изоляции, уменьшая оценку расхода ресурса  $L_p$  с фиксированной интенсивностью восстановления  $\Delta_R$  (наклонная  $L_p$  при  $T_2 < t \leq T_3$ )  $L_2 - (t - T_2) \Delta_R$ ,  $T_2 < t \leq T_3$ .

(7)

Как видно из (6), оценка величины истраченного ресурса изоляции ведется известными устройствами путем накапливания его расхода в единственной переменной  $L_p$ . В связи с этим известные устройства в принципе не могут учитывать зависимость характера деструктивных процессов в изоляции от уровня напряжения, действовавшего во время его повышения, и вынуждены использовать некоторый усредненный (фиксированный) учет восстановления ресурса изоляции согласно выражению (7). Как уже отмечалось выше, такой подход к учету восстановления ресурса не соответствует реальным процессам восстановления изоляции.

Этот недостаток известных устройств устраняется предлагаемым способом путем деления диапазона возможных повышений напряжений на ступени восстановления и ведения учета расхода и восстановления ресурса изоляции для каждой ступени отдельно. Своим названием они обязаны новому свойству предлагаемого способа, заключающемуся в его способности учитывать процессы восстановления ресурса после исчезновения повышения напряжения в зависимости от его уровня во время повышения напряжения. Ступени восстановления учитывают разницу в процессах восстановления электрических свойств изоляции в зависимости от характера деструктивных процессов, происходящих в изоляции при различном уровне действующего напряжения. На каждой ступени восстановления учет восстановления ресурса электрической изоляции ведется со своей интенсивностью.

Способ может иметь неограниченное число ступеней восстановления. Стандарт [8] предусматривает их две, поэтому далее работа способа поясняется на примере двух ступеней восстановления. В частности, упомянутый стандарт регламентирует промежуток времени между двумя повышениями напряжения, устанавливая его для повышений напряжения с допустимыми временами меньше 20 мин. (20 с, 1 мин., 5 мин. и 20 мин.) не менее 1 часа, а с допустимыми временами больше 20 мин. (1, 3 и 8 часов) – не менее 12 часов. Поэтому на каждом из этих промежутков времени учет восстановления ресурса электрической изоляции необходимо вести отдельно.

Используя введенное выше понятие ступеней восстановления, будем полагать, что первоначально повышение напряжения в течение времени  $T_1$

находится на уровне 2-ой ступени восстановления, а затем, благодаря принятым техническим мероприятиям, повышенное напряжение понижается до уровня 1-ой ступени восстановления. Поэтому на ступенях восстановления расход ресурса учитывается  $t \Delta_L^{(2)}$  предлагаемым способом отдельно как затраченный ресурс 2-ой ступени

(8)

$$L^{(1)} = (t - T_1) \Delta_L^{(1)}, \quad L^{(2)} = T_1 \Delta_L^{(2)} = L_1, \quad T_1 < t \leq T_2.$$
 и как затраченный ресурс 1-ой ступени

(9)

На рис. 5 изменение оценок затраченных ресурсов ступеней показано как наклонные  $L^{(2)}$  и  $L^{(1)}$ .

Общий расход ресурса изоляции определяется суммированием затраченных ресурсов ступеней (8) и (9):

(10)

После устранения повышения напряжения (при  $t > T_2$ ) выполнение ресурса изоляции для каждой ступени восстановления учитывают путем одновременного уменьшения затраченных ресурсов ступеней с интенсивностью восстановления, соответствующей каждой ступени:

$$L^{(1)} = (L_2 - L_1) - (t - T_2) \Delta_R^{(1)}, \quad T_2 < t \leq T_4. \quad (11)$$

и

(12)

На рис. 5 выражения (11) и (12) представлены наклонными  $L^{(2)}$  и  $L^{(1)}$  при  $t > T_2$ .

Изменение общего ресурса изоляции оборудования определяется выражением (10) и на рис. 5 показано в виде наклонной  $L$ .

Предлагаемый способ позволяет учитывать процессы восстановления электрической изоляции в зависимости от уровня повышения напряжения,

действовавшего до его устранения. Благодаря такому свойству способа повышается точность оценки ресурса изоляции и обеспечивается полноценная эксплуатация высоковольтного оборудования.

### **Выводы:**

1. Новое понятие диаграммы расхода остаточного ресурса электрической изоляции высоковольтного оборудования упрощает реализацию контроля остаточного ресурса электрической изоляции.

2. Новый способ формирования цифровой системой АОПН управляющих воздействий на технические средства устранения повышения напряжения, основанный на адаптивном изменении порога формирования признака отказа технических мероприятий предыдущих ступеней в зависимости от уровня повышения напряжения, позволяет повысить своевременность и обоснованность применения тех или иных технических мероприятий по устранению затянувшихся повышений напряжения.

3. Новый способ учета восстановления ресурса электрической изоляции после устранения повышения напряжения использует зависимость характера процесса восстановления ресурса электрической изоляции от уровня повышения напряжения, существовавшего до его устранения. Благодаря этому способ исключает преждевременное отключение электрооборудования, а также его эксплуатацию при исчерпанном ресурсе электрической изоляции.

### Литература

1. Петров В.С. Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Петров Владимир Сергеевич. – Чебоксары, 2015. – 154 с.
2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (ПТЭ). – М.: Издательство ДЕАН, 2012. – 145 с.
3. Глушкин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. – М.: Знак, 2011. – 528 с. – 2 т.
4. ГОСТ Р 55105-2012. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Нормы и требования. Издание официальное. – М.: Стандартинформ, 2012. – 23 с.
5. СТО 56947007-33.040.20.123-2012. Аттестационные требования к устройствам противоаварийной автоматики (ПА). – ОАО «Федеральная сетевая компания единой энергетической системы», 2012. – 71 с.
6. Антонов В.И., Наумов В.А., Петров В.С. Эффективные алгоритмы обработки входных сигналов цифровой автоматики ограничения повышения напряжения // Электрические станции. – 2013. – № 11. – С. 42-45.

7. Антонов В.И., Наумов В.А., Петров В.С. Контролируемые величины цифровых систем автоматического ограничения повышения напряжения: новые методы оценки и их характеристики // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – № 4. – С. 24-29.
8. ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998.
9. Розенблюм Ф.М., Салова Г.Л., Брухис В.А., Гладышев И.З., Глушкин В.Г. Устройство автоматического ограничения повышения напряжения на базе шкафа автоматики ШП 2704 // Электрические станции. – 1989. – № 4. – С. 60-65.
10. Пат. на изобретение 2556033 РФ, МПК H02H 9/04, G01R 31/02. Способ автоматического ограничения повышения напряжения высоковольтного оборудования // Антонов В.И., Наумов В.А., Петров В.С.; патентообладатель ООО НПП «ЭКРА». – № 2014121980/07; заявл. 29.05.2014; опубл. 10.07.2015. Бюл. № 19.
11. Белецкий, З.М. Электрическая прочность изоляции силовых трансформаторов высокого напряжения при кратковременных воздействиях // Электричество. – 1978. – № 9. – С. 64-67.
12. Лоханин А.К., Сапожников А.В. Допустимые для электрооборудования кратковременные эксплуатационные повышения напряжения частоты 50 Гц // Электротехника. – 1981. – № 5. – С. 3-8.
13. Пат. на изобретение 2556037 РФ, МПК H02H 9/04. Способ автоматического ограничения повышения напряжения высоковольтного оборудования // Антонов В.И., Наумов В.А., Петров В.С.; патентообладатель ООО НПП «ЭКРА». – № 2014106471/07; заявл. 20.02.2014; опубл. 10.07.2015. Бюл. № 19.

### Сведения об авторах



**Антонов Владислав Иванович**

Окончил в 1978 году факультет электрификации и автоматизации промышленности Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 1985 году защитил в Ленинградском политехническом институте кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование новых принципов построения измерительных органов направленных защит линий электропередачи». Доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, главный специалист отдела РЗА станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».



**Наумов Владимир Александрович**

Окончил в 2001 году электроэнергетический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, по специальности «инженер», в 2002 году защитил магистерскую диссертацию. В 2005 году защитил во ВНИИЭ кандидатскую диссертацию по теме «Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор». Заместитель генерального директора – технический директор ООО НПП «ЭКРА».



**Петров Владимир Сергеевич**

Окончил в 2009 году электроэнергетический факультет Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. В 2015 году там же защитил кандидатскую диссертацию «Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ». Инженер отдела РЗА станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».

УДК 621.6-5

Альтшуллер М.И., Ларионов В.Н.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

**Аннотация:** рассмотрены вопросы эффективного применения регулируемого электропривода насосными агрегатами по сравнению с регулированием напорными задвижками. Определена область целесообразной работы регулируемого по частоте высоковольтного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя. Дана оценка влияния КПД преобразователя частоты на ширину зоны эффективной работы привода.

**Ключевые слова:** регулируемый электропривод, преобразователь частоты, вентиляторная нагрузка, КПД преобразователя, энергоэффективность.

**Altshuller M.I., Larionov V.N.**

### COMPARATIVE ANALYSIS OF THE OPTIONS OF ENERGY-EFFICIENT MODES FOR PUMPING UNITS

**Abstract:** the effective use of a controlled electric drive for pumping units is compared to control via discharge valves. The feasible performance range of the frequency controlled high-voltage asynchronous short-circuit electric motor is determined. The impact of the efficiency factor of the frequency converter on the feasible performance range of the drive is assessed.

**Keywords:** regulated electric drive, frequency converter, fan load, efficiency inverter efficiency.

Экономия электроэнергии при внедрении частотно-регулируемого привода (далее ЧРП) для насосных агрегатов перекачки жидкости достигается за счет уменьшения использования задвижек в качестве регулирующих органов. При регулировании режима работы насоса задвижкой производительность расхода уменьшается, а давление, развиваемое насосом, возрастает в соответствии с его напорной характеристикой.

Потери на задвижке являются прямыми потерями при регулировании, приводящими к увеличению затрат электроэнергии. При этом полное открытие задвижек в нерегулируемых насосных агрегатах не рационально, поскольку снижение давления на выходе насоса приводит к смещению рабочей точки насоса за пределы рабочей зоны и уменьшению КПД агрегата.

В насосных агрегатах, работающих с номинальной частотой вращения, предлагается не выходить за пределы рабочей зоны, что обеспечит оптимальное использование насоса при регулировании.



Расчет экономической эффективности применения ЧРП при параллельной работе насосных агрегатов выполнен на основе эксплуатационных данных по перекачке жидкости, указанных в табл. 1.

Режимы работы насосной станции предполагают изменение расхода в пределах  $Q = 200 \div 800 \text{ м}^3/\text{ч}$  и поддержание линейного давления на напорном коллекторе  $H_{н.к} = 270 \text{ м}$ .

Табл. 1.

Место установки / Технолог. номер	Типоразмер насосно-компрессорного оборудования	Мощность электродвигателя, кВт	Напор насоса, м	Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	Наработка, ч	Ток двигателя, А	Давление на входе насоса, м	Давление на выходе насоса, м	Давление линейное, м
Агрегат 1	ЦНС 300-360	630	360	300	8000	49,21	36	360	270
Агрегат 2	ЦНС 300-360	630	360	300	8000	49,16	36	360	270
Агрегат 3	ЦНС 300-360	630	резерв	0	0	0	36	резерв	270

Для расчетов были выделены два основных режима работы насосной станции:

- изменение расхода в пределах  $Q = 200 \div 400 \text{ м}^3/\text{ч}$  при работе одного насоса;
- изменение расхода в пределах  $Q = 200 \div 800 \text{ м}^3/\text{ч}$  при работе двух насосов;
- линейное давление на напорном коллекторе поддерживается равным  $H_{н.к} = 270 \text{ м}$ .

Напорная характеристика насоса ЦНС 300-360 приведена на рис. 1а.

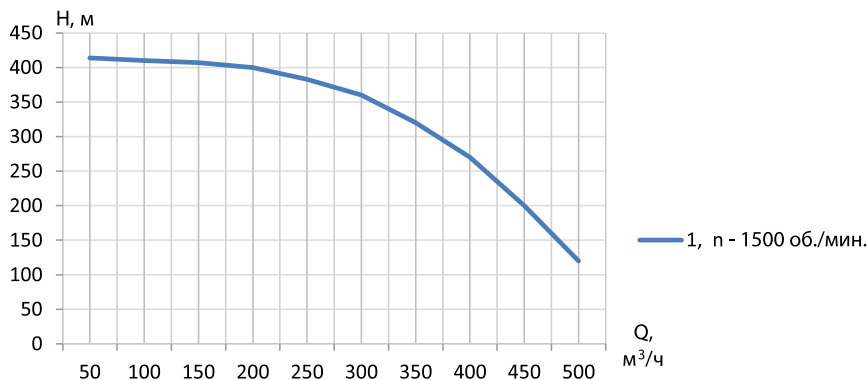


Рис. 1а. Напорная характеристика насоса ЦНС 300-360

Номинальная скорость вращения  $n = 1500 \text{ об./мин}$ .

Рабочая зона ограничена подачей от  $Q_{\min} = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$  до  $Q_{\max} = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

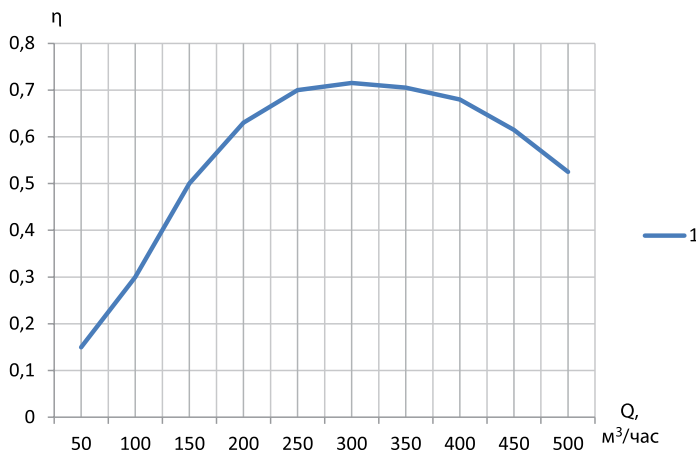


Рис. 16. Кривая КПД насоса ЦНС 300-360.  
Номинальная скорость вращения  $n = 1500$  об./мин.

Определение мощности, потребляемой насосом, осуществляется по паспортной кривой насоса (рис. 1а, б) в соответствии с его производительностью.

$$N_1 = \frac{\gamma H_1 Q_1}{\eta \cdot 3600} 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ кВт},$$

где

$N_1$  – мощность на валу насоса, кВт;

$H_1$  – напор по характеристике насоса, м;

$Q_1$  – расход по требованиям технологического процесса, м³/ч;

$\gamma$  – удельный вес жидкости, кг/м³;

$\eta$  – КПД насоса в рабочей точке.

Применение регулируемого электропривода для управления насосным агрегатом предполагает наличие семейства характеристик насоса для скоростей, отличных от номинальной.

Характеристики могут быть рассчитаны по следующей методике.

На характеристике насоса, соответствующей номинальной скорости  $\omega_n$  (рис. 1а), выбирается произвольно ряд точек 1, 2, 3, ... Задается скорость желаемого режима  $\omega_p$ . Рассчитываются коэффициенты пересчета:

– для координат расхода  $Q$   $K_Q = \frac{n_p}{n_n};$

– для координаты напора  $H$   $K_H = \left(\frac{n_p}{n_n}\right)^2,$

где  $n_p$  – расчетная скорость вращения рабочего колеса насоса.

Для каждой выбранной точки определяются значения  $Q_i$  и  $H_i$  по формулам:

$$Q_i = Q_{нi} K_Q;$$

$$H_i = H_{нi} K_H,$$

где

$Q_{нi}$ ,  $H_{нi}$  – координата точки на характеристике насоса при  $n_{нi}$ ;

$Q_i$ ,  $H_i$  – точки на характеристике насоса при рабочей скорости вращения, отличной от номинальной  $n_p$ .

По найденным значениям  $Q$  и  $H$  строится соответствующая характеристика.

Результаты расчета приведены в табл. 2.

Табл. 2.

Н, м	416	413	405	396	380	355	320	270
Н, м	379	377	368	359	342	318	279	222
Н, м	342	341	331	319	302	272	230	
Н, м	305	297	290	279	362	234		
Н, м	273	268	256	245	225			
$Q$ , м <sup>3</sup> /ч	50	100	150	200	250	300	350	400

Регулировочные характеристики насоса для скорости вращения рабочего колеса, отличных от номинальных значений, приведены на рис. 2.

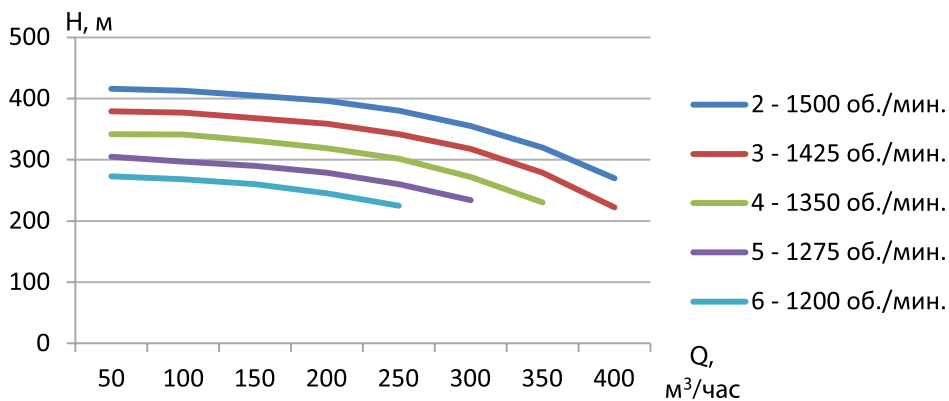


Рис. 2. Характеристики насоса для частот вращения рабочего колеса, отличных от номинальных

Характеристики насоса построены для скорости вращения:  $n_2=1500$  об./мин.,  $n_3=1425$  об./мин.,  $n_4=1350$  об./мин.,  $n_5=1275$  об./мин.,  $n_6=1200$  об./мин.

Из характеристик насоса (рис. 2) следует, что для линейного давления  $Q_{\text{лин}} = 270$  м диапазон регулирования скорости вращения электродвигателя лежит в пределах от  $n_{\text{max}} = 1500$  об./мин. до  $n_{\text{min}} = 1200$  об./мин.

### Определение потерь на регулирование

Диапазон изменения расхода:  $Q_{\text{min}} = 200$  м<sup>3</sup>/ч,  $Q_{\text{max}} = 400$  м<sup>3</sup>/ч.

Линейное давление на напорном коллекторе  $H_{\text{н.к}} = 270$  м.

В работе один насос.

Варианты регулирования:

- регулирование напорной задвижкой;
- регулирование скорости вращения рабочего колеса насоса с применением ЧРП.

### Регулирование напорной задвижкой

Мощность, потребляемая насосом:

$$N_{\text{нас}} = \frac{H_{\text{нас}} Q \gamma 9,81}{\eta 3600} 10^{-3} \text{ кВт},$$

где

$N_{\text{нас}}$  – мощность на валу насоса, кВт;

$H_{\text{нас}}$  – напор по характеристике насоса, м;

$Q$  – расход по требованиям технологического процесса, м<sup>3</sup>/ч;

$\gamma$  – удельный вес жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\eta$  – коэффициент полезного действия насоса в рабочей точке.

Мощность, необходимая для реализации технологического процесса:

$$N_{\text{лин}} = \frac{H_{\text{лин}} Q \gamma 9,81}{\eta 3600} 10^{-3} \text{ кВт},$$

где

$N_{\text{лин}}$  – мощность, необходимая для реализации технологического процесса;

$H_{\text{лин}} = 270$  м – линейное давление на напорном коллекторе.

### Мощность потерь на напорной задвижке

#### при регулировании производительности задвижкой

Потери мощности при регулировании напорной задвижкой определяются разностью напора, развиваемого насосом, и линейным напором на входе технологического водовода.

$$\Delta N_{\text{зав}} = N_{\text{нас}} - N_{\text{лин}} = \frac{\gamma Q 9,81}{3600 \eta} (H_{\text{нас}} - H_{\text{лин}}).$$

Табл. 3.

Расход	$Q$ , м <sup>3</sup> /час	50	100	150	200	250	300	350	400
Мощность	$N_{\text{нас}}$ , кВт	190	224	270	310	359	395	422	450
Мощность технол.	$N_{\text{техн.}}$ , кВт	123	144	170	201	255	303	373	453
Мощность потерь	$\Delta N_{\text{завд.}}$ , кВт	67	80	92	103	103	85	49	3

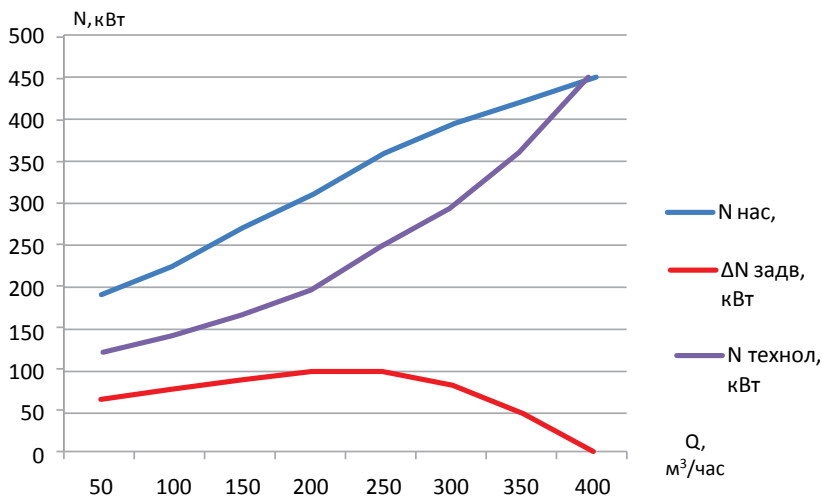


Рис. 3. Графики затрат электроэнергии при работе насосного агрегата

Результаты расчета мощности насоса, мощности, необходимой для реализации технологического процесса, мощности потерь на задвижке для различных значений расхода приведены в табл. 3. Графики приведены на рис. 3.

### Регулирование скорости вращения рабочего колеса насоса с применением ЧРП

В работе один насос.

Диапазон изменения расхода  $Q_{\min} = 200$  м<sup>3</sup>/ч,  $Q_{\max} = 400$  м<sup>3</sup>/ч.

Линейное давление на напорном коллекторе  $H_{\text{н.к}} = 270$  м.

Регулировочные характеристики насоса для скорости вращения рабочего колеса, отличных от номинальных значений, приведены на рис. 2.

Из характеристик насоса (рис. 2) следует, что для заданных технологических условий диапазон регулирования скорости вращения электропривода лежит в пределах от  $n_{\max} = 1500$  об./мин. до  $n_{\min} = 1200$  об./мин.

Потери на регулирование в напорной задвижке при этом равны нулю.

Табл. 4.

Расход	$Q, \text{ м}^3/\text{час}$	50	100	150	200	250	300	350	400
Мощность технол.	$N_{\text{технол}}, \text{ кВт}$	123	144	170	191	239	311	368	453
Мощность потерь	$\Delta N_{\text{пр}}, \text{ кВт}$	4,3	5,1	6,0	6,8	8,3	10,9	12,9	15,8

Потерями на регулирование в данном случае появляются потери в преобразователе частоты, которые определяются как:  $\Delta N_{\text{пр}} = \frac{N_{\text{тех}}}{\eta_{\text{пр}}} (1 - \eta_{\text{пр}})$ .

Результаты расчета потерь в преобразователе для КПД преобразователя, равного  $\eta_{\text{пр}} = 0,975$ , приведены в табл. 4.

Эффект от внедрения ЧРП по сравнению с регулированием напорной задвижкой можно оценить, сравнив потери на задвижке и потери в преобразователе частоты при соответствующих расходах:

$$N_{\text{экон.}} = \Delta N_{\text{завдв.}} - \Delta N_{\text{пр.}}$$

Регулируемый электропривод с преобразователем частоты позволяет исключить потери на регулирующей задвижке, снизив избыточный напор на выходе насоса за счет регулирования скорости вращения рабочего колеса.

Вторым фактором уменьшения энергозатрат при регулировании скорости вращения рабочего колеса насоса является увеличение КПД насоса при работе в зоне пониженных подач по сравнению с регулированием задвижкой.

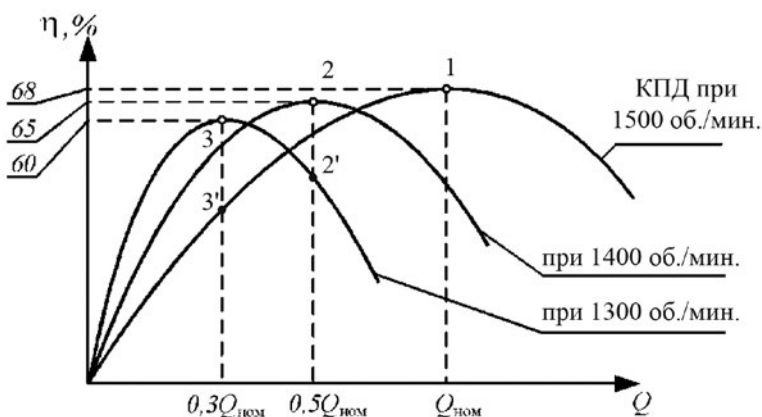


Рис. 4. Изменение КПД насосного агрегата при регулировании скорости вращения насоса

2, 3 – КПД насоса при работе с ЧРП.

2', 3' – КПД насоса при регулировании задвижкой

Табл. 5.

Расход	$Q, \text{ м}^3/\text{час}$	50	100	150	200	250	300	350	400
Мощность потерь	$\Delta N_{\text{завд.}}, \text{ кВт}$	67	80	88	106	120	87	54	0,0
Мощность потерь	$\Delta N_{\text{пр.}}, \text{ кВт}$	4,3	5,1	6,0	6,8	8,3	10,9	12,9	15,8
Экономия	$\Delta N_{\text{экон.}}, \text{ кВт}$	63	75	82	99	112	76	41	-15

Изменение скорости вращения рабочего колеса насоса приводит к смещению оптимального КПД насоса в зону меньших расходов (рис. 4). Максимум КПД насоса, с уменьшением скорости вращения, несколько снижается и смещается влево. В этом случае КПД насоса становится выше, чем при работе на номинальной частоте вращения и регулировании задвижкой. Таким образом, уменьшение расхода за счет снижения скорости вращения позволяет не только снизить потребление энергии путем исключения гидравлических потерь на задвижке, но и получить экономический эффект за счёт повышения КПД самого насоса.

Результаты расчета приведены в табл. 5 и на графике рис. 5.

Из табл. 5 следует, что:

- потери при регулировании задвижкой существенно больше, чем потери в преобразователе частоты;
- эффективность применения ЧРП зависит от глубины регулирования расхода;
- величина потерь на задвижке зависит от избыточного напора на выходе насоса по отношению к линейному напору.

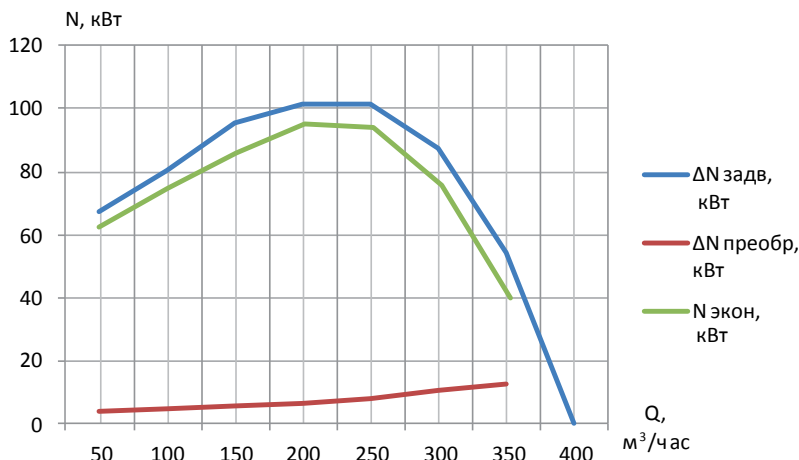


Рис. 5. Графики потерь при регулировании задвижкой и ЧРП

Особенностью применения регулируемого электропривода с преобразователем частоты является то, что при работе ЧРП исключаются потери на регулирующей задвижке, но дополнительно появляются потери в преобразователе частоты.

Анализ затрат электроэнергии при сравнении этих способов регулирования позволяет определить зону целесообразного применения электропривода с преобразователем частоты.

Потери мощности в преобразователе частоты рассчитываются в процессе регулирования.

Мощность, потребляемая ЧРП,

$$N_{\text{пр}} = \frac{N_{\text{дв}}}{\eta_{\text{пр}}},$$

где

$\eta_{\text{пр}}$  – КПД преобразователя;

$N_{\text{пр}}$  – мощность, потребляемая электродвигателем.

$$N_{\text{дв}} = N_2 \frac{1}{\eta_{\text{н}} \eta_{\text{дв}}},$$

где

$N_2$  – мощность на выходе напорного коллектора;

$\eta_{\text{н}}$  – КПД насоса;

$\eta_{\text{дв}}$  – КПД двигателя.

Потери мощности в преобразователе

$$\Delta N_{\text{пр}} = \frac{N_{\text{дв}}(1 - \eta_{\text{пр}})}{\eta_{\text{пр}}} = N_2 \frac{1}{\eta_{\text{н}} \eta_{\text{дв}}} \times \frac{1 - \eta_{\text{пр}}}{\eta_{\text{пр}}}.$$

Потери на задвижке в процессе регулирования

$$\Delta N_3 = N_2 \frac{a}{1 - a}, \text{ потери на задвижке,}$$

где  $a = \Delta H / H_1$  – глубина регулирования давления.

Снижение потерь при использовании ЧРП по сравнению с регулированием задвижкой

$$\Delta N_{\text{эк1}} = \Delta N_3 - \Delta N_{\text{пр}} = \frac{N_2}{\eta_{\text{н}} \eta_{\text{дв}}} \left( \frac{\eta_{\text{пр}} + a - 1}{\eta_{\text{пр}}(1 - a)} \right).$$



Экономия энергии относительно задвижки при использовании ЧРП будет иметь место при соотношении

$$\eta_{\text{пр}} + a - 1 > 0.$$

Это означает, что эффективность работы привода в зоне высоких скоростей зависит от КПД преобразователя частоты.

Зависимость экономии энергии по сравнению с задвижкой от глубины регулирования представлена на рис. 6.

В зоне максимальных подач существует область, в которой потери на задвижке оказываются меньше потерь в преобразователе  $\Delta N_{\text{зав.}} < \Delta N_{\text{преоб.}}$ .

Зона максимальных подач с неблагоприятным режимом работы преобразователя зависит от величины КПД преобразователя.

Экономия отсутствует при  $\Delta P_{\text{эк1}} = 0$ , когда  $a = 1 - \eta_{\text{пр}}$ .

В связи с этим целесообразно сравнить эффективность применения схем высоковольтных преобразователей частоты, имеющих различные КПД.

Если КПД многоуровневого преобразователя частоты равен  $\eta = 0,975$ , то условие равенства потерь в преобразователе частоты и задвижке имеет место при  $a = 0,025$ . Применение ЧРП может быть целесообразным при глубине регулирования давления  $a > 0,025$ .

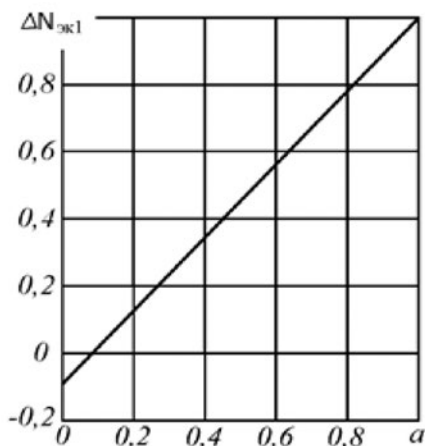


Рис. 6. Экономия энергии относительно глубины регулирования давления

Тогда из равенства

$$a = \frac{\Delta H}{H_1} = \left( \frac{\Delta n}{n_{\text{ном}}} \right)^2;$$

$$a = \left( \frac{\Delta n}{n_{\text{ном}}} \right)^2 = 0,05;$$

$$\Delta n / n_{\text{ном}} = \sqrt{a} = \sqrt{0,025} = 0,158$$

следует, что в диапазоне  $n > 0,84$  преобразователь частоты не имеет эффекта по сравнению с регулированием задвижкой.

Это зона 1 (рис. 7), ограниченная скоростью вращения  $n_{\text{гр}}$ , которая рассчитывается как  $n_{\text{гр}} = (1 - \sqrt{a}) n_{\text{ном}} = 0,84 n_{\text{ном}}$ .

Зона  $n > 0,84n_{\text{н}}$  – зона эффективного применения ЧРП.

При суммарном КПД преобразователя, реализованного по двухтрансформаторной схеме, равного  $\eta = 0,85$ , условие равенства потерь в преобразователе и задвижке соответствует  $a = 0,15$ , т.е. применение ЧРП может быть целесообразным при глубине регулирования давления  $a \leq 0,15$ , тогда из равенства

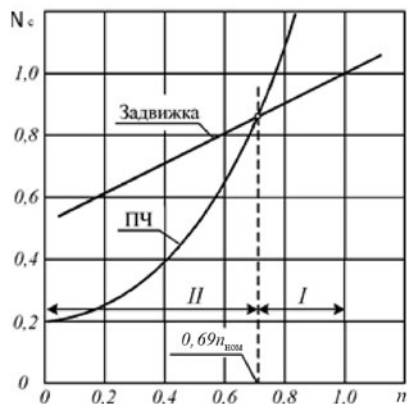


Рис. 7. Зависимость мощности, потребляемой из сети при регулировании задвижкой и преобразователем частоты

следует, что в диапазоне  $n > 0,61n_{\text{ном}}$  преобразователь частоты имеет потери больше, чем потери на задвижке (зона 1, рис. 7), т.е.  $n_{\text{гр}} = (1 - \sqrt{a}) n_{\text{ном}} = 0,69n_{\text{ном}}$  – скорость ограничения для эффективного регулирования по схеме ПЧ-АД. Зона 2  $n_p < 0,69n_{\text{ном}}$  – зона эффективной работы ЧРП, имеющего более низкий КПД.

Приведенный выше анализ показывает, что многуровневый преобразователь частоты ввиду высоких значений КПД имеет существенное преимущество при работе в зоне высоких скоростей.

**Регулирование расхода в диапазоне  $Q = 400 \div 800 \text{ м}^3/\text{час}$**

**Линейное давление  $H_{\text{лин}} = 270 \text{ м}$**

Регулирование расхода в указанном диапазоне предполагает наличие двух параллельно работающих насосов.

При этом возможны следующие варианты регулирования:

- регулирование двух насосов напорными задвижками;
- регулирование, при котором один из насосов работает с постоянной скоростью вращения и максимальной подачей в пределах рабочей зоны, второй работает в режиме регулирования скорости вращения с ЧРП;
- два насоса работают при регулировании скорости вращения с применением ЧРП.

## Регулирование двух насосов напорными задвижками.

### Определение потерь на регулирование

Расчет потерь предполагает наличие суммарной напорной характеристики двух работающих насосов. Суммарная характеристика двух работающих параллельно насосов представлена в табл. 6 (напорная характеристика Н1) и на рис. 8 (кривая Н1).

Потери мощности при регулировании напорной задвижкой определяются разностью напора, развиваемого насосом, и линейным напором на входе технологического водовода.

$$\Delta N_{\text{зав}} = N_{\text{нас}} - N_{\text{лин}} = \frac{\gamma Q^{9,81}}{3600\eta'} (H_{\text{нас}} - H_{\text{лин}}).$$

Предполагается параллельная работа двух насосных агрегатов с регулированием напорными задвижками при условии равенства расхода работающих насосов.

Результаты расчета потерь на регулирование приведены в табл. 7.

Графики затрат электроэнергии при параллельной работе насосных агрегатов при условии равномерной загрузки насосов приведены на рис. 9.

Табл. 6.

Н1, м	416	413	405	396	380	355	320	270	200		
Н2, м	379	377	368	359	342	318	279	222			
Н3, м	342	341	331	319	302	272	230				
Н4, м	305	297	290	279	262	234					
Н5, м	273	268	256	245	225						
Q, м <sup>3</sup> /ч	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	

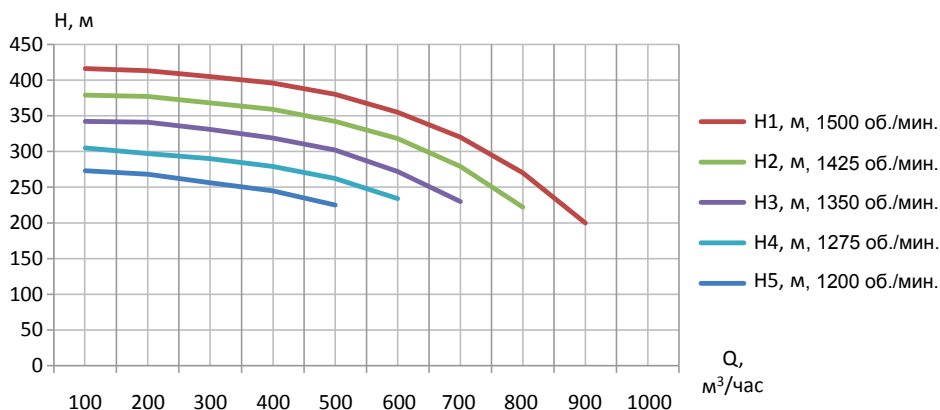


Рис. 8. Суммарная напорная характеристика двух насосов (кривая Н1).  
Скорость вращения насосов  $n = 1500$  об./мин.

Табл. 7.

Расход	$Q$ , м <sup>3</sup> /ч	400	450	500	550	600	650	700	750	800
Мощность насоса	$\Delta N_{\text{нас.}}$ , кВт	614	664	718	768	806	840	860	880	900
Мощность технол.	$\Delta N_{\text{техн.}}$ , кВт	403	450	510	550	606	660	715	765	817
Мощность потерь	$\Delta N_{\text{потерь}}$ , кВт	211	209	207	200	190	163	133	110	83

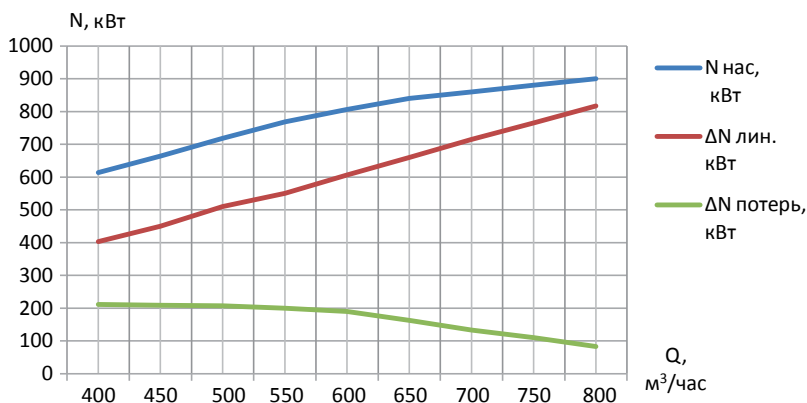


Рис. 9. Графики затрат электроэнергии при параллельной работе насосных агрегатов

### Регулирование двух насосных агрегатов, работающих параллельно. Один агрегат работает в номинальном режиме, второй – в режиме регулирования скорости вращения с применением ЧРП

Исходные данные для расчета.

Регулирование осуществляется в диапазоне расходов  $Q = 400 \div 800$  м<sup>3</sup>/час.

Линейное давление на напорном коллекторе  $H_{\text{лин}} = 270$  м.

Потребление мощности насосом №1 принимается равным

$$N_1 = \frac{\gamma H_{\text{н}} Q_{\text{н}} \times 9,81}{3600 \times \eta} 10^{-3} = \frac{1000 \times 360 \times 300 \times 9,81}{3600 \times 0,72} 10^{-3} = 409 \text{ кВт}$$

и остается постоянным в течение всего периода работы.

Данный расход  $Q_{\text{н}} = 300$  м<sup>3</sup>/ч соответствует номинальному режиму работы насосного агрегата и является наиболее экономичным. Напор на выходе насоса №1 равен номинальному значению  $H_{\text{н1}} = 60$  м.

Увеличение расхода насоса №1 до значений  $Q > 300$  м<sup>3</sup>/ч приводит к увеличению нагрузки приводного двигателя и снижению КПД насоса.

Потребление мощности насосом №1, необходимое для реализации технологического процесса при поддержании постоянного расхода, равного  $Q_1 = 300$  м<sup>3</sup>/ч и линейного напора  $H_{\text{лин}} = 270$  м:

$$N_{\text{тех}} = \frac{\gamma H_{\text{тех}} Q_{\text{тех}} \times 9,81}{3600 \eta_{\text{н}}} 10^{-3} = \frac{1000 \times 270 \times 300 \times 9,81}{3600 \times 0,72} 10^{-3} = 307 \text{ кВт.}$$

Потери мощности на регулирование напора насосного агрегата №1 в диапазоне расходов  $Q = 300 \div 800 \text{ м}^3/\text{ч}$  остаются постоянными и равными:

$$\Delta N_1 = N_1 - N_{\text{тех}} = 409 - 307 = 102 \text{ кВт.}$$

Поддержание необходимого линейного давления в диапазоне суммарных расходов насосной станции в пределах  $Q = 300 \div 800 \text{ м}^3/\text{ч}$  предполагается осуществить за счет насоса №2, работающего в режиме регулирования скорости вращения с применением ЧРП.

Диапазон регулирования производительности насоса №2 при этом лежит в пределах  $Q_2 = 100 \div 500 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Напорные характеристики насоса №2 для различных скоростей вращения рабочего колеса приведены на рис. 2.

Потребление мощности электроприводом насосного агрегата №2 в зависимости от подачи рассчитывается как:

$$N_2 = \frac{\gamma H_2 Q_2 \times 9,81}{3600 \times \eta_{\text{пр}} \times \eta_{\text{н}}} 10^{-3},$$

где

$H_2 = 270 \text{ м}$  – линейное давление в магистрали;

$Q_2$  – дополнительная подача для реализации технологического процесса при расходах  $Q > 300 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

$\eta_{\text{пр}} = 0,975$  – КПД преобразователя;

$\eta_{\text{н}} = 0,7$  – КПД насоса.

Потери на регулирование в электроприводах с преобразователями частоты определяются КПД преобразователя и рассчитываются как:

$$\Delta N_{\text{пр}} = N_2 \frac{1 - \eta_{\text{пр}}}{\eta_{\text{пр}}}.$$

Потери мощности на регулирование в напорных задвижках насоса №2 при этом отсутствуют.

Суммарные потери на регулирование с учетом работы двух насосов:

$$\Delta N_{\text{сум}} = \Delta N_1 + \Delta N_{\text{пр}}$$

Результаты расчетов: потребления мощности электродвигателем

второго насоса; потерь в преобразователе частоты; суммарных потерь двух насосных агрегатов приведены в табл. 8 и на рис. 10.

$\Delta N_1$  – потери на задвижке первого насоса;

$\Delta N_{пр}$  – потери в преобразователе частоты;

$\Delta N_{сум}$  – суммарные потери на регулирование.

Табл. 8.

$Q$ , $м^3/ч$	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$N_1$ , кВт	409	409	409	409	409	409	409	409	409
$N_2$ , кВт	108	162	217	271	325	379	433	488	542
$\Delta N_1$ , кВт	102	102	102	102	102	102	102	102	102
$\Delta N_{пр.}$ , кВт	3	5	7	8	10	12	13	15	17
$\Delta N_{сум.}$ , кВт	105	107	109	110	112	114	115	117	119

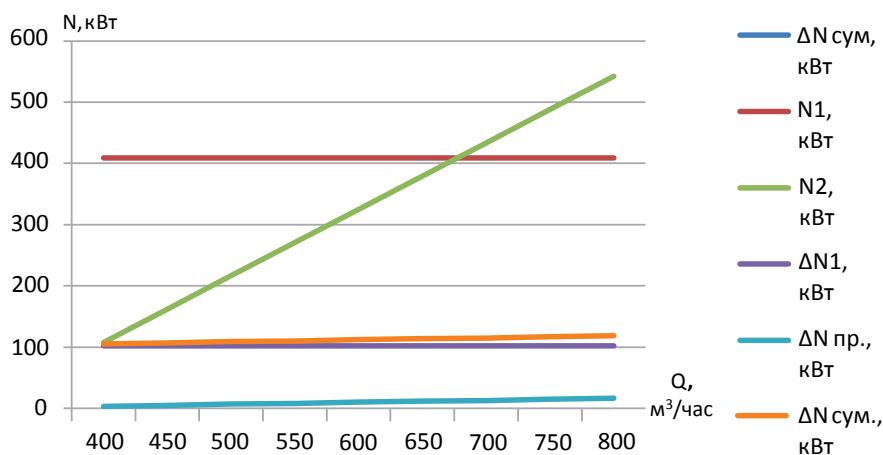


Рис. 10. Графики потребляемой мощности насосными агрегатами №1 и №2

### Регулирование двух насосных агрегатов, работающих параллельно.

#### Оба агрегата работают в режиме регулирования скорости с применением ЧРП

Условия регулирования:

- насосные агрегаты оснащены электроприводами с ЧРП;
- нагрузка между насосами распределена равномерно;
- диапазон регулирования суммарной подачи  $Q = 400 \div 800 м^3/ч$ ;
- линейное давление на напорном коллекторе  $H_{лин} = 270 м$ .

Напорные характеристики двух насосных агрегатов для разных скоростей вращения рабочих колес приведены на рис. 11.

Табл. 9.

$Q$ , м <sup>3</sup> /ч	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$N_{\text{техн.}}$ , кВт	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$\Delta N_{\text{пр}}$ , кВт	12,3	13,9	15,4	17	18,5	20,1	21,6	23,2	24,7

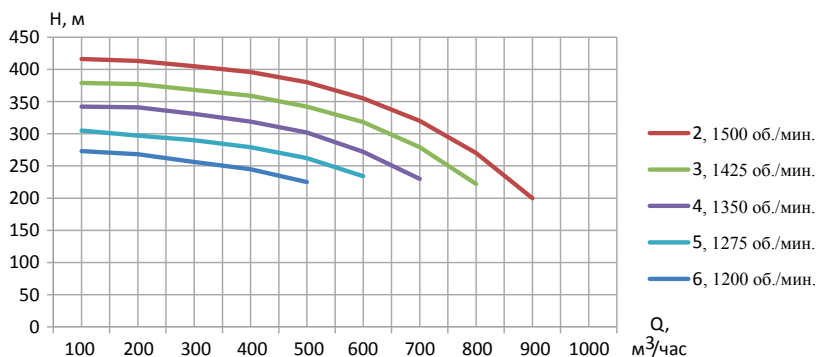


Рис. 11. Суммарные напорные характеристики двух насосных агрегатов для разных частот вращения рабочих колес:  $n_2=1500$  об./мин.,  $n_3=1425$  об./мин.,  $n_4=1350$  об./мин.,  $n_5=1275$  об./мин.,  $n_6=1200$  об./мин.

Суммарное потребление мощности насосными агрегатами в диапазоне расхода  $Q_{\text{сум}} = 300 \div 800$  м<sup>3</sup>/ч определяется нагрузкой работающих агрегатов:

$$N_{\text{сум}} = N_{\text{техн}} = \frac{\gamma H_{\text{техн}} Q_{\text{техн}} \times 9,81}{3600 \times \eta_{\text{пр}} \times \eta_{\text{н}}} \times 10^{-3}.$$

Суммарные потери на регулирование определяются как:

$$\Delta N_{\text{сум}} = \Delta N_{\text{пр}} = N_{\text{сум}} \frac{1 - \eta_{\text{пр}}}{\eta_{\text{пр}}}.$$

Данные расчетов приведены в табл. 9 и на рис. 12.

Сравнение потерь при регулировании производительности технологических параметров, при параллельной работе насосных агрегатов

Диапазон  $Q = 400 \div 800$  м<sup>3</sup>/ч.

- Регулирование напорными задвижками при условии равенства расхода работающих насосов.

- Один агрегат работает в номинальном режиме, второй – в режиме регулирования скорости вращения с применением ЧРП.
- Оба агрегата работают в режиме регулирования скорости вращения с применением ЧРП.

Графики потерь при регулировании различными способами приведены в табл. 10. и на рис. 13.

Табл. 10.

$Q, \text{ м}^3 / \text{ч}$	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$\Delta N_1 + \Delta N_{N1}, \text{ кВт}$	211	209	207	200	187	163	134	110	83
$\Delta N_1 + \Delta N_{\text{пр}1}, \text{ кВт}$	105	107	109	110	112	114	115	117	119
$\Delta N_{\text{пр}1} + \Delta N_{\text{пр}2}, \text{ кВт}$	12,3	13,9	15,4	17	18,5	20,1	21,6	23,2	26,8

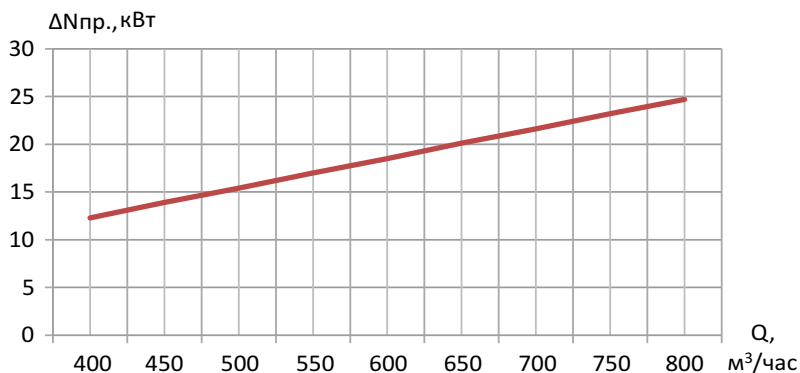


Рис. 12. Потери на регулирование при применении двух преобразователей частоты

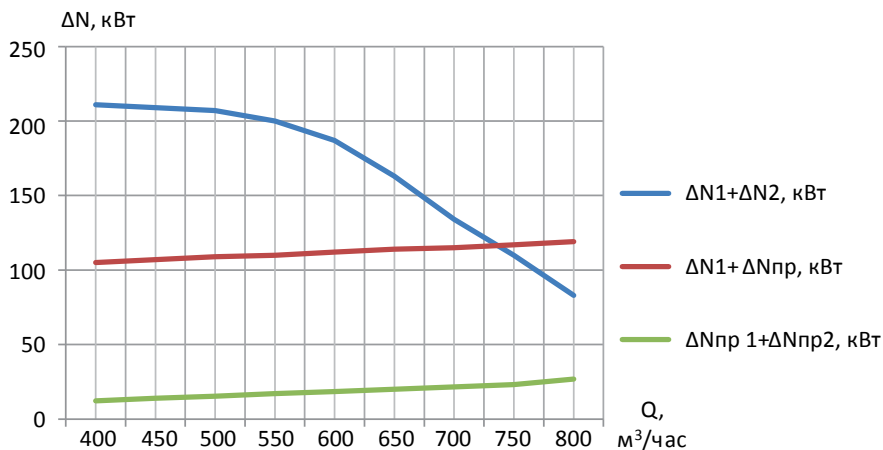


Рис. 13. Графики потерь при параллельной работе насосных агрегатов



### Выводы:

1. Преимущество применения ЧРП по сравнению с регулированием задвижек имеет место как при работе одного агрегата, так и при параллельной работе двух или нескольких насосов.
2. При параллельной работе целесообразно задавать номинальный режим насосу, работающему с постоянной скоростью вращения, минимизировав потери на напорной задвижке.
3. Эффективность применения ЧРП зависит от глубины регулирования технологического параметра и КПД преобразователя.
4. В зоне номинальных режимов работы может возникнуть ситуация, когда потери на напорной задвижке окажутся меньше потерь в преобразователе частоты, что приведет к увеличению затрат электроэнергии.

### Литература

1. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я.Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков под ред. И.Я. Браславского. – М.: Academia, 2004. – 259 с.
2. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
3. Онищенко Г.Б. Электропривод турбомеханизмов / Г.Б. Онищенко, М.Г. Юньков М.: Энергия, 1972. – 240 с.
4. Поздеев А.Д. К вопросу о снижении энергопотребления при применении регулируемых электроприводов насосных агрегатов / А.Д. Поздеев, В.Н. Ларионов. Электротехника. – 1994. – №2.

### Сведения об авторах



#### **Ларионов Владимир Николаевич**

*Кандидат технических наук, ведущий специалист ООО НПП «ЭКРА», профессор кафедры «Системы автоматического управления электроприводами» Чувашского государственного университета. Окончил факультет электрификации и автоматизации промышленности и транспорта Московского энергетического института в 1964 году. В 1979 году в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию.*



#### **Альтшуллер Марк Иосифович**

*Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник — заместитель руководителя департамента технического маркетинга ООО НПП «ЭКРА». Окончил Нижегородский политехнический институт в 1957 году. В 1970 защитил кандидатскую диссертацию.*

УДК 621.3.078: 621.3.077.2

Матюшин Н.А., Митюков П.В., Чубуков К.А.

## ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА В КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ЖИЛИЩНО- КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА

**Аннотация:** рассмотрены возможности и особенности реализации комплексной автоматизации технологического процесса насосной станции с использованием оборудования производства ООО НПП «ЭКРА».

**Ключевые слова:** жилищно-коммунальное хозяйство, комплексная автоматизация, преобразователь частоты, автоматизированная система управления технологическим процессом, ООО НПП «ЭКРА».

**Matyushin N.A., Mitukov P.V., Chubukov K.A.**

### HIGH-VOLTAGE DRIVES IN THE FIELD OF INTEGRATED AUTOMATION HOUSING AND UTILITIES INFRASTRUCTURE

**Abstract:** the possibilities and features of an integrated process automation pumping station using the equipment EKRA Ltd are discussed.

**Keywords:** housing and utilities infrastructure, integrated automation, frequency converter, automated process control system, EKRA Ltd.

Сфера жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) как никакая другая в нашей стране нуждается в глобальной модернизации и повышении энергоэффективности, притом что именно в данной сфере за счет значительного суточного разброса в объеме потребления воды и теплоносителя применение частотного регулирования наиболее экономически оправдано.

Комплексная автоматизация оборудования насосно-перекачивающих станций водо- и теплоснабжения с использованием преобразователей частоты (ПЧ) позволяет существенно повысить качество обеспечения населения водой за счет автоматического поддержания давления в магистрали, совместно с экономией ресурсов за счет уменьшения избыточного давления напора в трубопроводе. Замена неэффективных режимов байпасирования или дросселирования задвижками трубопровода режимом частотного регулирования позволяет снизить затраты на подъем и транспортировку воды и теплоносителя, а также сократить количество аварий и потери ресурсов. Плавный пуск и останов агрегатов, обеспечиваемый ПЧ, значительно продлевают ресурс работы электродвигателя и приводного механизма и увеличивают межремонтные промежутки благодаря отсутствию бросков токов и механических ударов.

Комплексная автоматизация позволяет повысить качество и упростить работу эксплуатационному персоналу за счет возможности дистанционного управления и мониторинга за технологическим процессом и, как следствие, оптимизировать производственный процесс в целом.

Одним из ярких примеров комплексной автоматизации в сфере ЖКХ является работа специалистов МУП «Горводоканал» (г. Комсомольск-на-Амуре) и ООО НПП «ЭКРА» (г. Чебоксары) на насосной станции I подъема Амурского водозабора г. Комсомольск-на-Амуре, где в июне 2015 года успешно завершены пусконаладочные работы по комплексной автоматизации насосных агрегатов с синхронными электродвигателями СДВ-16/31-10 напряжением 6 кВ, мощностью 1 МВт. Благодаря широкому перечню продукции ООО НПП «ЭКРА», выпускаемой для электроприводной техники (рис. 1), комплексная автоматизация насосов водозабора была выполнена без использования оборудования сторонних производителей, на базе передового оборудования ООО НПП «ЭКРА»: высоковольтного преобразователя частоты серии ЭСН, цифровых тиристорных возбудителей серии СПВД, шкафов силовых коммутационных типа ШПКА и шкафов управления системами частотного регулирования и автоматизации ШУ.

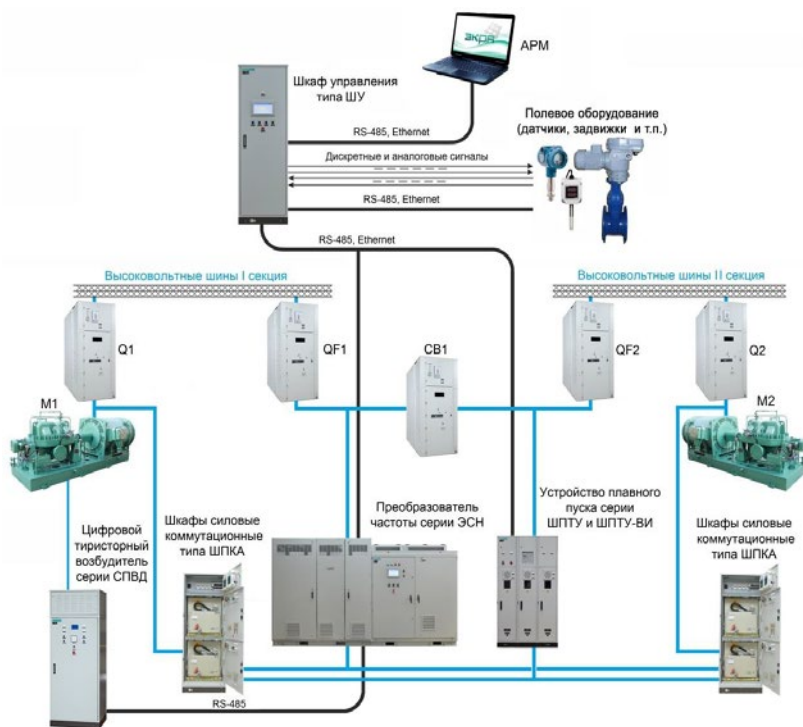


Рис. 1. Продукция ООО НПП «ЭКРА» для комплексной автоматизации технологических процессов

Преобразователи частоты серии ЭСН предназначены для регулирования скорости высоковольтных асинхронных и синхронных электродвигателей мощностью до 5 МВт. Применение преобразователей частоты позволяет успешно решать вопросы по энерго- и ресурсосбережению приводных электродвигателей различных производственных механизмов: насосов, компрессоров, вентиляторов, конвейеров, кузнечно-прессового оборудования и других общепромышленных механизмов.

Шафы управления системами частотного регулирования и автоматизации имеют широкие функциональные возможности и позволяют реализовать автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) любой сложности.

Основным режимом работы насосной станции до проведения модернизации была круглосуточная одновременная работа двух насосных агрегатов. Регулирование избыточного давления осуществлялось дежурным персоналом в ручном режиме посредством частичного открывания/закрывания байпасной задвижки сброса воды в реку Амур. Отключение одного из работающих насосов для регулирования избыточного давления было нежелательно

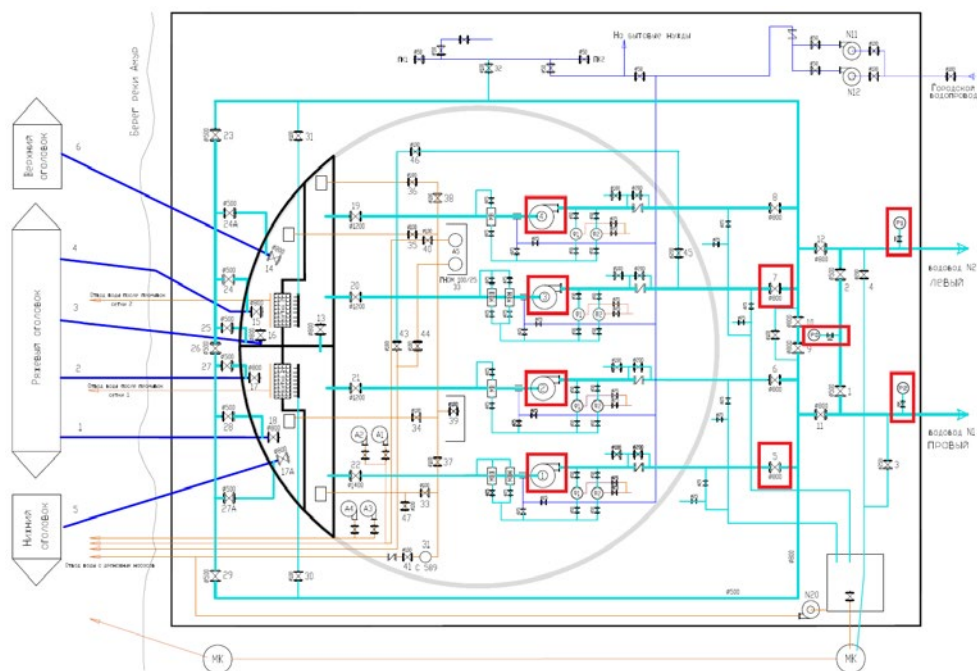


Рис. 2. Технологическая схема Амурского водозабора с указанием оборудования, затронутого автоматизацией

в силу того, что ресурс прямых пусков до капитального ремонта насоса составляет порядка 100 пусков. Процесс пуска и штатного останова насоса, из-за удаленности (более 100 метров) друг от друга пультов управления электродвигателем насоса и задвижкой на его выходном трубопроводе, требовал одновременной слаженной работы двух человек. При этом в процессе пуска и останова насоса неизбежно возникало значительное отклонение давления в магистрали от требуемого значения.

Комплексная автоматизация насосной станции I подъема Амурского водозабора затрагивала (рис. 2) установку высоковольтного преобразователя частоты для поочередного управления основными насосными агрегатами СД1 и СД3 мощностью 1 МВт с установкой цифровых тиристорных возбудителей взамен старой системы электромашинных возбудителей, автоматизацию управления выходными задвижками №5 и №7 для СД1 и СД3 соответственно и контроль за датчиками давления в магистральном водоводе. Насосные агрегаты СД2 и СД4 мощностью 1,6 МВт являются резервными, поэтому автоматизация затрагивала лишь получение информации об их включенном/отключенном состоянии.

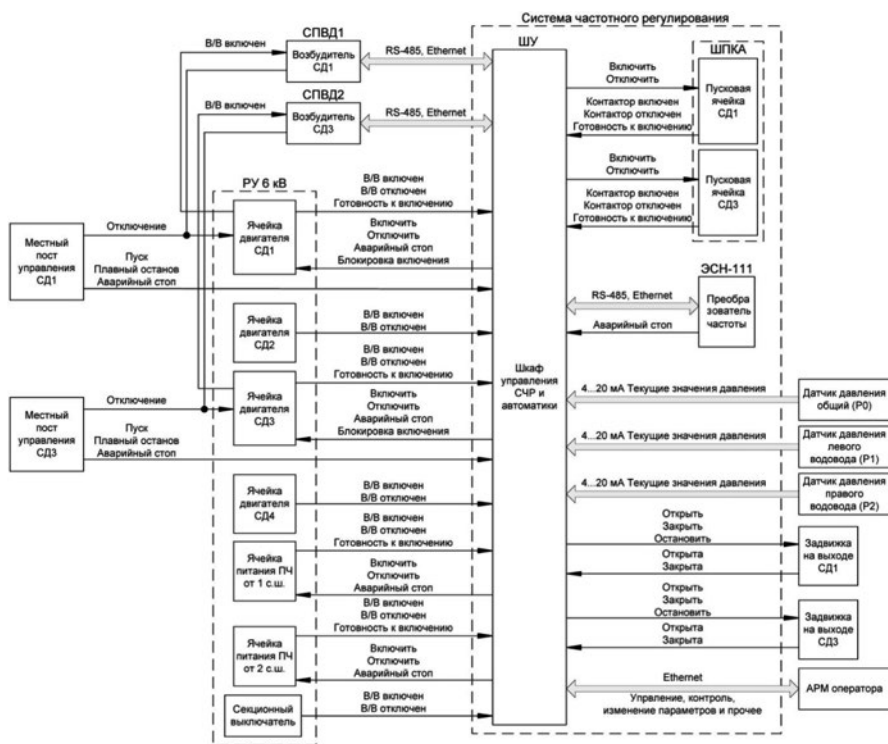


Рис. 3. Функциональная схема автоматизации насосной станции Амурского водозабора с использованием высоковольтной преобразовательной техники

Взаимодействие между системой частотного регулирования (СЧР) и автоматики с высоковольтными ячейками, полевым оборудованием и автоматизированным рабочим местом (АРМ) оператора (рис. 3) было детально проработано и реализовано посредством дискретных входов/выходов, аналоговых входов 4-20 мА и интерфейсных каналов связи RS-485 и Ethernet.

Внедрение автоматизированной системы управления насосными агрегатами на станции I подъема Амурского водозабора МУП «Горводоканал», г. Комсомольск-на-Амуре на базе ПЧ серии ЭСН (рис. 4), при сохранении режима прямого пуска позволило реализовать следующие режимы работы:

- безударный частотный пуск, плавный останов и регулирование скорости вращения насосного агрегата с изменяемыми темпами разгона и торможения;
- безударный перевод регулируемого от ПЧ насосного агрегата на питание от сети (шунтирование);
- безударный перевод питаемого от сети насосного агрегата на питание от ПЧ (подхват от сети);
- дистанционное управление, мониторинг и диагностика работы насосных агрегатов;
- автоматическое управление задвижками на выходе насосов;
- автоматическое поддержание заданного давления в магистрали.



Рис. 4. Внешний вид системы частотного регулирования и шкафа управления автоматикой

Основным режимом работы насосной станции после проведения модернизации стал режим, при котором заданное давление поддерживается автоматически за счет регулирования скорости вращения агрегата от ПЧ. При невозможности обеспечения требуемого давления от одного агрегата он переводится на сеть через СЧР с последующим пуском и автоматическим регулированием скорости второго агрегата. При создании необходимого давления одним агрегатом второй (управляемый от ПЧ) плавно останавливается с последующим подхватом от сети и автоматическим регулированием скорости первого агрегата. Для повышения надежности контроля за состоянием работы системы все команды изменения режимов работы агрегатов

осуществляются дежурным персоналом с пульта управления на ШУ или с АРМ оператора.

Отдельно был разработан и реализован алгоритм автоматического управления задвижками на выходе насосных агрегатов с учетом специфики схемы и технологии управления запорной арматурой на насосной станции Амурского водозабора (рис. 5).

Панель оператора для управления технологическим процессом насосной станции (рис. 6) имеет широкие возможности по мониторингу, управлению и диагностики состояния работы и неисправностей системы. Позволяет оперативно изменять и контролировать режимы работы насосной станции и ее

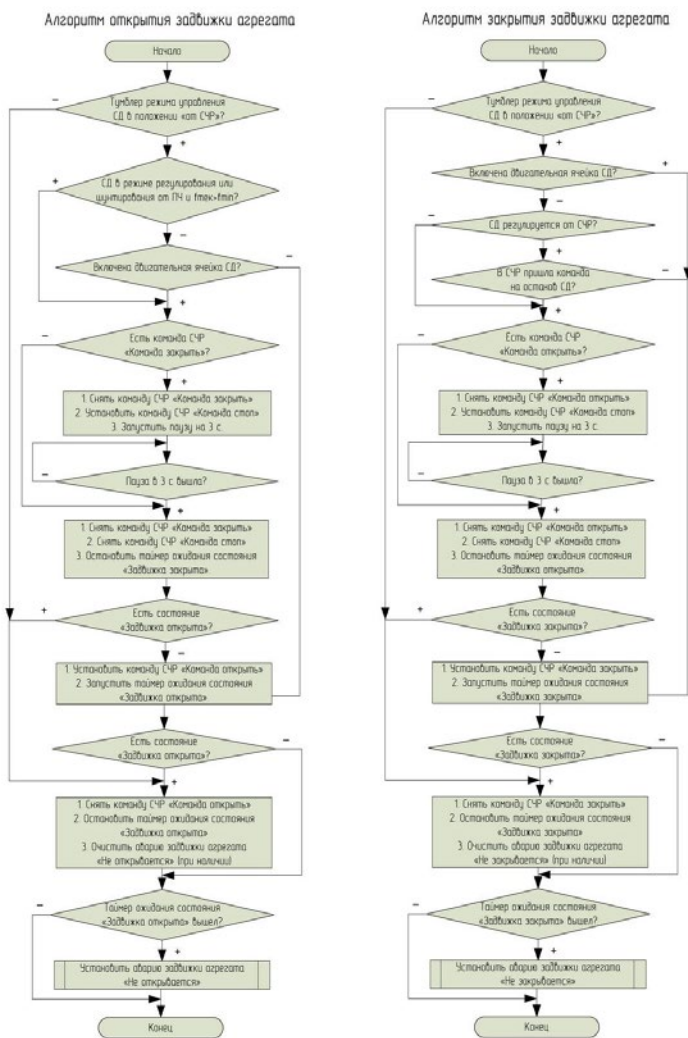


Рис. 5. Алгоритмы автоматического управления задвижками на выходе насосных агрегатов

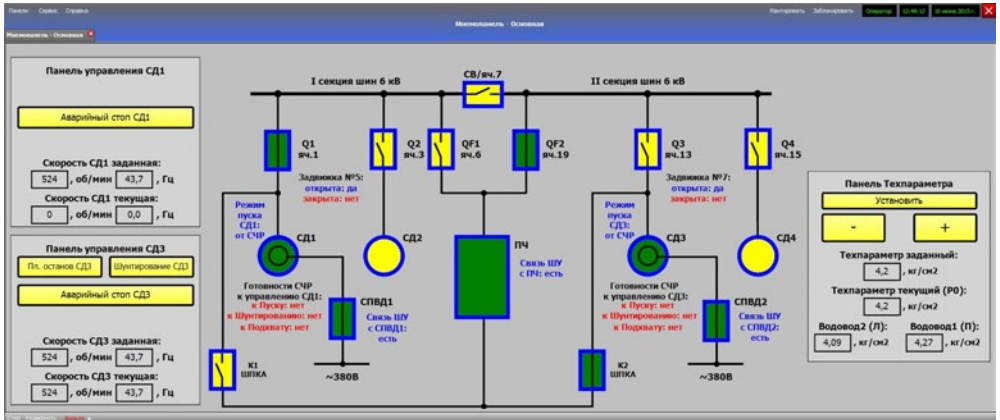


Рис. 6. Внешний вид панели оператора управления технологическим процессом насосной станции Амурского водозабора

компонентов. Встроенные возможности панели оператора, включающие лог событий с точностью до 1 мс, исторические тренды действующих значений и аварийный регистратор мгновенных значений позволяют оперативно и детально восстановить причины возникновения внешних и внутренних неисправностей.

При работе над проектом комплексной автоматизации были детально учтены и проработаны все особенности объекта, благодаря чему эксплуатация автоматизированной системы управления насосными агрегатами на станции I подъема МУП «Горводоканал», г. Комсомольск-на-Амуре позволяет:

- сократить эксплуатационные расходы и расходы на ликвидацию аварий трубопроводов, запорной арматуры, насосных агрегатов за счет исключения гидроударов в напорном трубопроводе при использовании плавного разгона и торможения и режимов безударного перевода регулируемого от ПЧ насосного агрегата на питание от сети и обратного перевода питания насосного агрегата на питание от ПЧ;
- многократно увеличить срок службы электродвигателя и насоса, а также убрать ограничение по количеству пусков за счет отсутствия высоких пусковых токов при плавном пуске агрегатов;
- снизить потери воды, связанные с избыточным давлением в напорном трубопроводе, за счет точного поддержания заданного давления;
- существенно экономить потребляемую электроэнергию благодаря применению частотного регулирования взамен байпасированию;
- упростить работу дежурному и ремонтному персоналу за счет повышения автоматизации системы водозабора с широкими возможностями управления, мониторинга работы и диагностирования причин неисправности системы.



Стоит отметить, что все работы, начиная от предпроектного обследования и заканчивая пусконаладочными работами, были выполнены специалистами группы компаний «ЭКРА» без привлечения подрядных организаций.

Возможности воплощения предлагаемых идей и решений основываются на высоких показателях качества, надёжности и функциональности оборудования, поставляемого ООО НПП «ЭКРА». При автоматизации объектов компания в полной мере предусматривает все возможные ситуации их работы и планомерно осуществляет перевод объектов на новый технологический уровень.

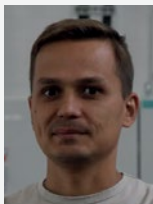
В заключение хотелось бы отметить, что ООО НПП «ЭКРА» имеет все необходимые ресурсы и опыт комплексной автоматизации технологических процессов любой сложности, выполняемых с применением высоковольтной преобразовательной техники.

#### Сведения об авторах



***Матюшин Николай Алексеевич***

*Магистр техники и технологии, инженер 2 категории отдела электропривода ООО НПП «ЭКРА». Окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, в 2010 г.*



***Митюков Павел Владимирович***

*Магистр техники и технологии, ведущий инженер-программист отдела электропривода ООО НПП «ЭКРА». Окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, в 2007 г.*



***Чубуков Константин Александрович***

*Кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела электропривода ООО НПП «ЭКРА». Окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета (ЧГУ) имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, в 2005 г. В 2010 году в ЧГУ имени И.Н. Ульянова защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование и разработка вариантов широтно-импульсной модуляции в трехфазных автономных инверторах напряжения с двигательной нагрузкой».*

ББК 31.264.5

УДК 621.311.6: 621.314.2.024

Шаварин Н.И., Лазарева Н.М., Яров В.М.

## ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ КОНВЕРТОРА С ВОЛЬТОДОБАВКОЙ

**Аннотация:** в статье рассмотрены особенности динамических режимов работы конвертора с вольтодобавкой с различными видами обратной связи. Параметры ПИ-регулятора определены корневым методом. Показано, что при изменении нагрузки в широком диапазоне целесообразно применение цифровых регуляторов.

**Ключевые слова:** конвертор, вольтодобавка, кривая разгона, ПИ-регулятор, нагрузочные характеристики.

**Shavarin N.I., Lazareva N.M., Yarov V.M.**

### DYNAMIC OPERATION VOLTAGE BOOST CONVERTER BY

**Abstract:** the article describes the features of dynamic applications with voltage boost converter with different types of feedback. The parameters of the PI controller are determined by the root. It is shown that when the load changes in a wide range of appropriate use of digital controls.

**Keywords:** converter, curve acceleration, PI controller, load characteristics.

При питании удаленных потребителей возникает проблема стабильности напряжения. Если потребитель один, то можно учесть падение напряжения в питающей линии и обеспечить постоянство напряжения. Однако если потребителей много и они на разном расстоянии от источника, то целесообразно использовать стабилизаторы напряжения непосредственно у потребителя.

В [1] выполнен анализ возможных вариантов повышающих преобразователей и выделены две схемы конверторов: повышающий двухтактный и с вольтодобавкой (рис. 1). Динамические режимы работы повышающего конвертора определены в [2], там же рассмотрена цифровая система управления конвертором.

В [3, 4] выполнен анализ статических режимов конвертора с вольтодобавкой. Целью настоящей работы является исследование динамических режимов работы этого конвертора.

Конвертор с вольтодобавкой обеспечивает получение на выходе напряжения  $U_{н}$ , большего, чем напряжение  $U_{п}$  источника питания. Высокий КПД конвертора обеспечивается тем, что основная мощность в нагрузку передается непосредственно от источника питания, а регулируется только часть передаваемой мощности.

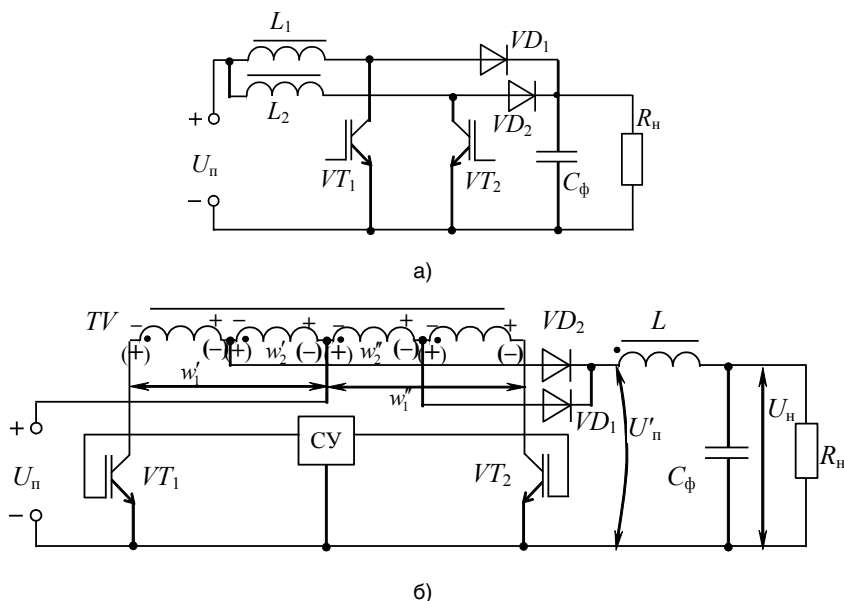


Рис. 1. Повышающий конвертор (а) и конвертор с вольтодобавкой (б)

Функции вольтодобавочного устройства выполняет силовой коммутатор, содержащий транзисторные ключи  $VT_1$  и  $VT_2$ , трансформатор  $TV$  с обмотками  $w'_1$ ,  $w'_2$ ,  $w''_1$ ,  $w''_2$  и диоды  $VD_1$ ,  $VD_2$ .

Временные диаграммы конвертора с вольтодобавкой, работающего в режиме непрерывного тока дросселя, приведены на рис. 2.

На интервале  $0_+ \leq t \leq (\gamma T)_-$ , где  $\gamma = \lambda/T$ , транзистор  $VT_1$  находится в состоянии «замкнуто», а  $VT_2$  – в состоянии «разомкнуто» ( $i_{к2} = 0$ ). Следовательно, полярности напряжений на обмотках трансформатора  $TV$  определяются знаками, указанными на рис. 1, б без скобок. При этом диод  $VD_1$  открыт ( $i_{д1} = i_L$ ), диод  $VD_2$  закрыт ( $i_{д2} = 0$ ).

На интервале  $(\gamma T)_+ \leq t \leq T_-$  транзисторы находятся в состоянии «разомкнуто» и, следовательно,  $i_{к1} = 0$  и  $i_{к2} = 0$ . При этом в соответствии с первым законом Кирхгофа

$$i_{д1} + i_{д2} = i_L, \quad (1)$$

а по закону полного тока

$$i_{д1} w'_2 = i_{д2} w''_2. \quad (2)$$

Так как  $w'_2 = w''_2 = w_2$ , то из (1) и (2) следует, что для всего рассматриваемого

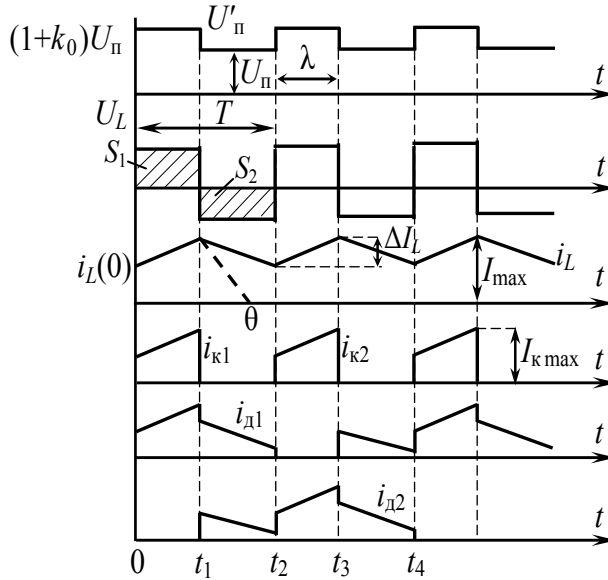


Рис. 2. Временные диаграммы конвертора с вольтодобавкой

мого интервала при работе схемы в режиме непрерывных токов или для части  $(\gamma T)_- \leq t \leq (\gamma T - \theta T)_-$  этого интервала при работе схемы в режиме прерывистых токов оба диода открыты и

$$i_{d1}(t) = i_{d2}(t) = \frac{1}{2} i_L(t).$$

При этом трансформатор  $TV$  работает в режиме так называемого «уравнительного реактора», и напряжения на всех его обмотках равны нулю, а ток дросселя отличен от нуля

$$i_L(t) = i_{max} - \frac{U_n - U_n'}{L}(t - \gamma T).$$

Для режима прерывистых токов в момент времени  $t = (\gamma + \theta)T$  ток дросселя становится равным нулю, напряжение  $U_n'$  в этот момент скачком изменяется до значения  $U_n' = U_n$ , а диоды  $VD_1$  и  $VD_2$  переходят в состояние «разомкнуто».

На интервале  $T_+ \leq t \leq (T + \gamma T)_-$  транзистор  $VT_1$  находится в состоянии «разомкнуто» ( $i_{k1} = 0$ ),  $VT_2$  – в состоянии «замкнуто» и, следовательно, полярности напряжений на обмотках трансформатора  $TV$  определяются знаками в скобках. При этом диод  $VD_1$  закрыт ( $i_{d1} = 0$ ),  $VD_2$  открыт ( $i_{d2} = i_L$ ).

Процессы в схеме на интервале  $(T + \gamma T)_+ \leq t \leq 2T_-$  полностью аналогичны процессам на интервале  $(\gamma T)_+ \leq t \leq T_-$  и поэтому не требуют специального рассмотрения.

Из диаграммы  $U_L$  (рис. 2) и равенства соответствующих площадей  $S_1 = S_2$  для режима непрерывных токов данной схемы получаем

$$\left[ (1 + k_0)U_{\text{п}} - U_{\text{н}} \right] \gamma = (U_{\text{н}} - U_{\text{п}})(1 - \gamma).$$

Из последнего выражения находим

$$U_{\text{н}} = U_{\text{п}}(1 + k_0\gamma).$$

Коэффициент  $k_0 = w_2/w_1$  не может быть равен единице. Поэтому наибольшее напряжение нагрузки не может превышать напряжение питания в два раза, так как

$$k_{\text{непр}} = \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{п}}} = 1 + k_0\gamma.$$

Значение статического коэффициента передачи напряжения для режима прерывистого тока можно определить из решения квадратного уравнения относительно  $k_{\text{пр}}$  [3]

$$k_{\text{пр}}^2 - \left( 1 - k_0 \frac{\gamma^2}{d} \right) k_{\text{пр}} - \frac{\gamma^2}{d} (1 - k_0) k_0 = 0,$$

$$\text{где } d = \frac{2L}{R_{\text{н}}T}.$$

Условие работы в непрерывном режиме

$$d > \frac{\gamma(1 - \gamma)}{\gamma + 1/k_0}.$$

Стабилизация выходного напряжения реализуется введением обратных компенсационных связей. Для определения параметров цепей обратных связей при заданных статических и динамических характеристиках необходимо определить передаточные функции вход-выход и управление-выход.

Передаточная функция может быть составлена на основании переходной характеристики (кривой разгона) [4, 5]. Для получения кривой разгона будем использовать компьютерное моделирование в Simulink Matlab (рис. 3).

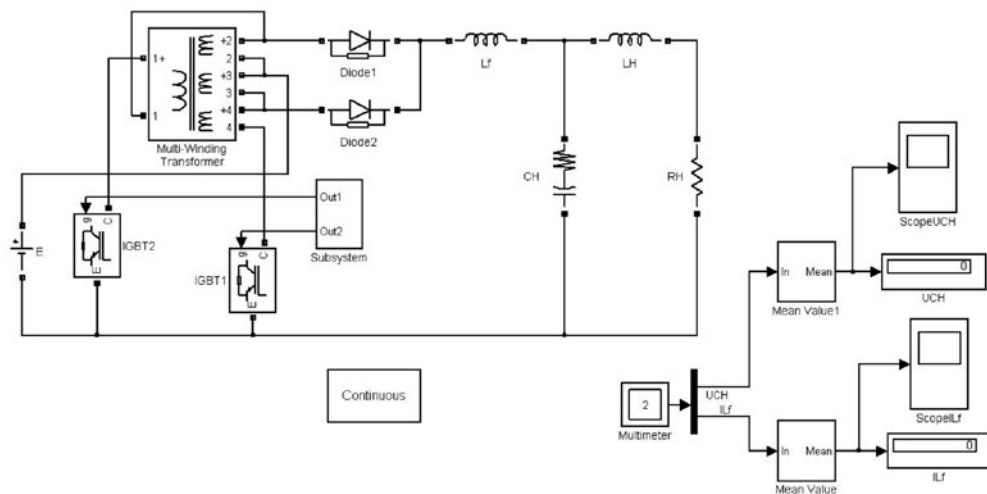


Рис. 3. Simulink-модель конвертора с вольтодобавкой

После выхода преобразователя на установившийся режим работы система управления (блок Subsystem на рис. 3) скачком изменяла коэффициент заполнения  $\gamma$ , и на осциллографе ScopeUCH фиксировался переходный процесс изменения напряжения нагрузки. Кривая разгона снималась для следующих параметров конвертора:  $U_{\text{н}} = 175 \text{ В}$ ,  $U_{\text{н}} = 230 \text{ В}$ ,  $R_{\text{н}} = 1,9 \text{ Ом}$ ,  $f = 20 \text{ кГц}$ ,  $C_{\text{н}} = 500 \text{ мкФ}$ ,  $L_{\text{н}} = 100 \text{ мкГн}$ , напряжение вольтодобавки  $U_{w_2}' = U_{w_2}'' = 70 \text{ В}$ .

Кривая разгона конвертора с вольтодобавкой по напряжению нагрузки приведена на рис. 4. При изменении напряжения управления от 10,8 до 12 В напряжение на нагрузке изменилось от 219,3 до 224,7 В.

По виду кривой разгона можно сделать вывод, что преобразователь по напряжению нагрузки может быть представлен колебательным звеном с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{1}{T_{\text{к}}^2 p^2 + 2\xi T_{\text{к}} p + 1}$$

Динамическими параметрами колебательного звена являются постоянная времени  $T_{\text{к}}$  – величина, обратная собственной частоте звена, и относительный коэффициент затухания  $\xi$ . Для вычисления параметров колебательного звена по нормированной кривой разгона (рис. 6) определяем значения  $A_1$ ,  $A_2$  и  $T_1$  [5, 6].

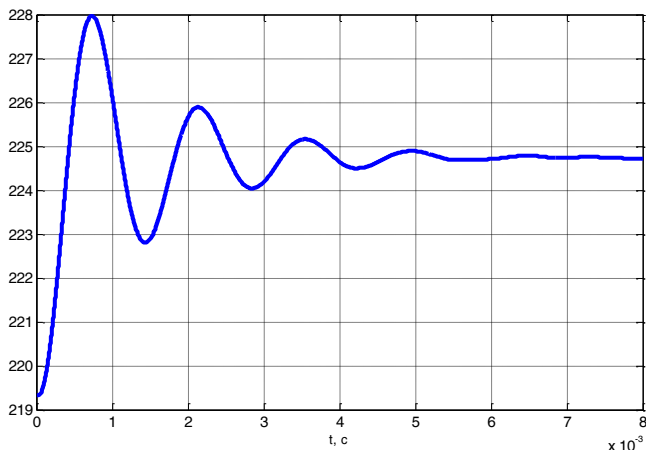


Рис. 4. Кривая разгона конвертора с вольтодобавкой по напряжению нагрузки

Собственная частота колебаний звена

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1} = \frac{2\pi}{1,4 \cdot 10^{-3}} = 4485 \text{ рад / с.}$$

Коэффициент затухания

$$\beta_1 = \frac{\ln(A_1/A_2)}{T_1} = \frac{\ln(0,601/0,216)}{1,4 \cdot 10^{-3}} = 731.$$

Постоянная времени колебательного звена

$$T_k = \frac{1}{\sqrt{\omega_1^2 + \beta_1^2}} = \frac{1}{\sqrt{4485^2 + 731^2}} = 0,22 \cdot 10^{-3}.$$

Степень затухания

$$\xi = \beta_1 T_k = 731 \cdot 0,22 \cdot 10^{-3} = 0,161.$$

Параметры колебательного звена можно определить и по амплитудно-фазовой характеристике (АФХ) по следующим простым соотношениям

$$T_k = \frac{1}{\omega_T}; \quad \xi = -\frac{1}{2V(\omega_T)},$$

где  $\omega_T$  – частота, при которой АФХ пересекает мнимую ось;  $V(\omega_T)$  – ордината

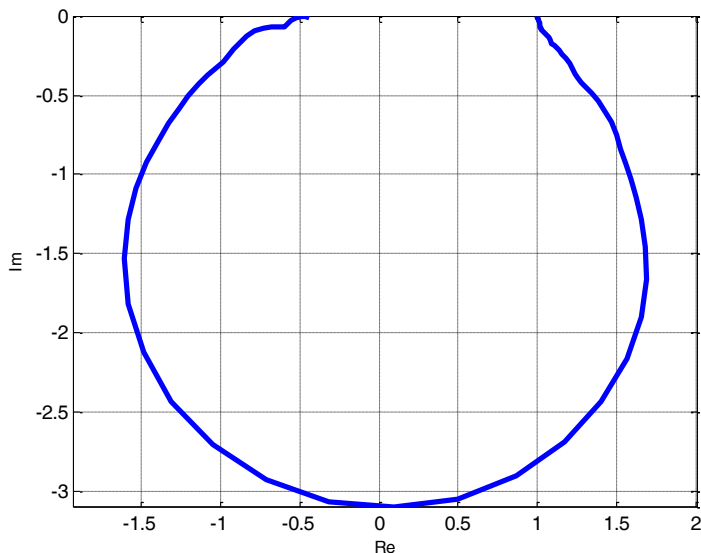


Рис. 5. АФЧХ конвертора с вольтодобавкой, построенная по кривой разгона мнимой оси, соответствующая частоте  $\omega_{r1}$ . Оба метода дают близкие результаты. АФЧХ конвертора с вольтодобавкой, построенная на основе кусочно-линейной аппроксимации кривой разгона [5], приведена на рис. 5. На рис. 6 показана нормированная кривая разгона и ее модели колебательным звеном.

Амплитудно- и фазочастотная характеристики конвертора с вольтодобавкой приведены на рис. 7.

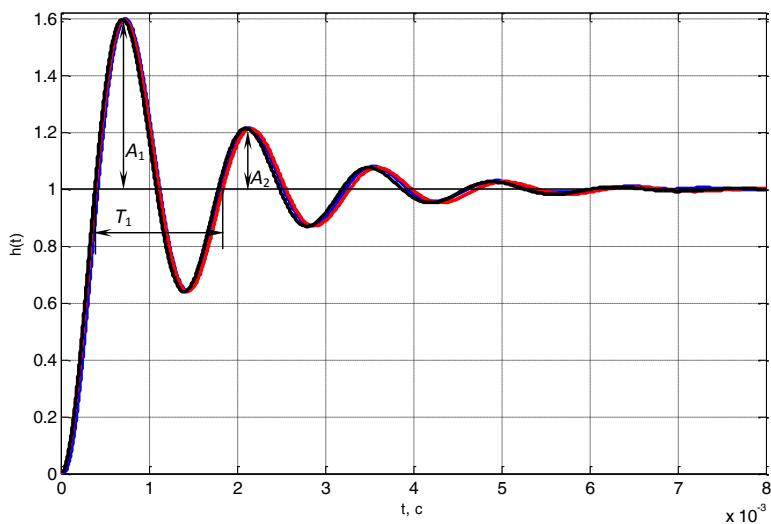


Рис. 6. Нормированная кривая разгона конвертора по напряжению нагрузки (синяя линия) и ее модели колебательным звеном: по АФЧХ (красная); по кривой разгона (черная)

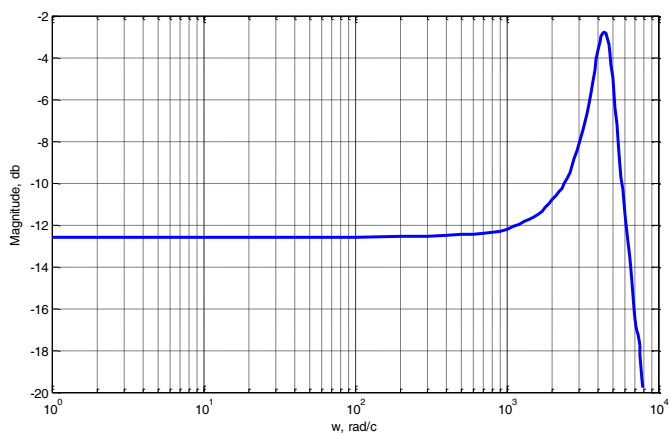


Определим параметры ПИ-регулятора для системы управления, замкнутой по напряжению нагрузки, корневым методом [7].

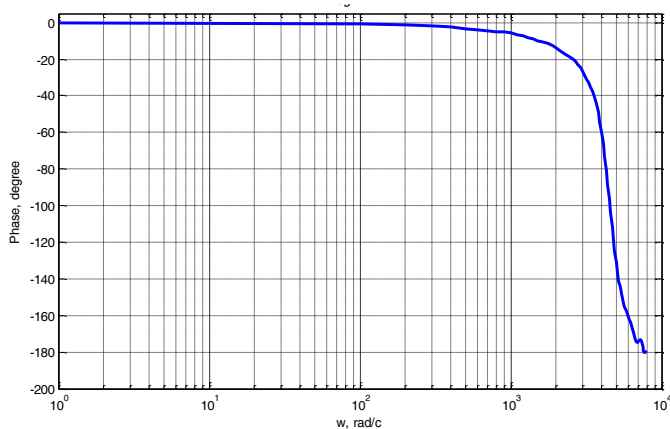
Передаточная функция конвертора с вольтдобавкой, полученная моделированием его колебательным звеном

$$W_{\text{оу(н)}}(p) = \frac{K_{\text{оу(н)}}}{T_k^2 p^2 + 2\xi T_k p + 1} = \frac{0,235}{(2,2 \cdot 10^{-4} p)^2 + 2 \cdot 0,161 \cdot 2,2 \cdot 10^{-4} p + 1} =$$

$$= \frac{4,86 \cdot 10^6}{p^2 + 0,146 \cdot 10^4 p + 0,21 \cdot 10^8} = \frac{K_0}{p^2 + a_1 p + a_0}.$$



а)



б)

Рис. 7. Частотные характеристики конвертора по напряжению нагрузки:  
а – АЧХ; б – ФЧХ

Передаточная функция разомкнутой системы с ПИ-регулятором напряжения

$$W_{p(n)}(p) = W_{oy(n)}(p)W_{пи}(p) = \frac{K_0}{p^2 + a_1p + a_0} \frac{K_{п}p + K_{и}}{p} = \frac{K_0K_{п}p + K_0K_{и}}{p^3 + a_1p^2 + a_0p}$$

Передаточная функция замкнутой системы с ПИ-регулятором

$$W_3(p) = \frac{1}{1 + W_p(p)} = \frac{1}{1 + \frac{K_0K_{п}p + K_0K_{и}}{p^3 + a_1p^2 + a_0p}} = \frac{p^3 + a_1p^2 + a_0p}{p^3 + a_1p^2 + a_0p + K_0K_{п}p + K_0K_{и}} =$$

$$= \frac{p^3 + a_1p^2 + a_0p}{p^3 + a_1p^2 + (a_0 + K_0K_{п})p + K_0K_{и}}$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы

$$H_3(p) = p^3 + a_1p^2 + (a_0 + K_0K_{п})p + K_0K_{и}$$

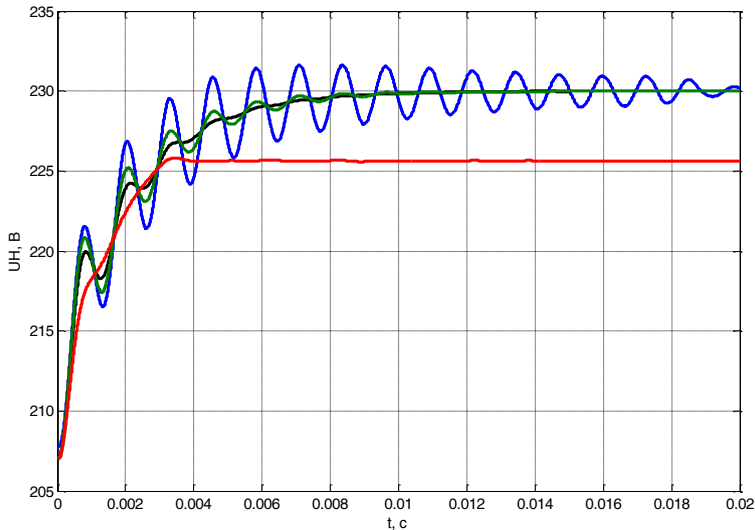


Рис. 8. Переходные процессы в конвертере с ПИ-регулятором напряжения для различных значений сопротивления нагрузки:  
 5 Ом – синяя линия; 1,9 Ом – зеленая;  
 1,2 Ом – черная; 0,5 Ом – красная

Преобразуем многочлен согласно теореме Виета

$$p^3 + a_1 p^2 + (a_0 + K_0 K_n) p + K_0 K_n = (p + \alpha) \left[ (p + \alpha)^2 + \beta^2 \right] = \\ = p^3 + 3\alpha p^2 + (3\alpha^2 + \beta^2) p + \alpha(\alpha^2 + \beta^2).$$

$$3\alpha = a_1; \quad \alpha = \frac{a_1}{3} = \frac{0,144 \cdot 10^4}{3} = 0,48 \cdot 10^3; \quad \alpha^2 = 0,23 \cdot 10^6.$$

$$\alpha(\alpha^2 + \beta^2) = K_0 K_n.$$

$$3\alpha^2 + \beta^2 = a_0 + K_0 K_n; \quad 3 \cdot 0,23 \cdot 10^6 + \beta^2 = 0,2066 \cdot 10^8 + K_0 K_n.$$

Сравниваем коэффициенты при одинаковых степенях  $p$ .

$$\beta^2 = 20,66 \cdot 10^6 - 0,69 \cdot 10^6 + K_0 K_n = 19,97 \cdot 10^6 + K_0 K_n.$$

$$\beta_{\min} = 4,47 \cdot 10^3.$$

Принимаем  $\beta = 5 \cdot 10^3$ .

Коэффициент усиления регулятора

$$K_n = \frac{1}{K_0} (\beta^2 + 3\alpha^2 - a_0) = \\ = \frac{1}{4,86 \cdot 10^6} (25 \cdot 10^6 + 0,69 \cdot 10^6 - 20,66 \cdot 10^6) = 1,035.$$

Интегральный коэффициент усиления

$$K_n = \frac{\alpha}{K_0} (\beta^2 + \alpha^2) = \frac{0,48 \cdot 10^3}{4,86 \cdot 10^6} (25 \cdot 10^6 + 0,23 \cdot 10^6) = 2492.$$

Переходные процессы при изменении напряжения управления в кон-вертере с обратной связью по напряжению с рассчитанными параметрами ПИ-регулятора для различных значений сопротивления нагрузки приведены на рис. 8. При номинальном сопротивлении нагрузки переходный процесс без перерегулирования. При увеличении сопротивления колебательность про-цесса возрастает, а при  $R_n = 5$  Ом возникают медленно затухающие колеба-ния. Для получения устойчивого переходного процесса параметры регулятора

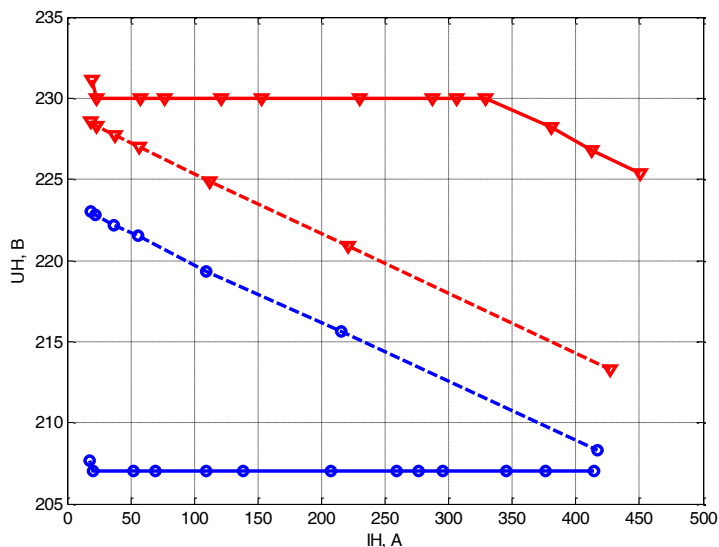


Рис. 9. Нагрузочные характеристики  $U_n = f(I_n)$  конвертора с вольтодобавкой с разомкнутой системой управления (пунктир) и с обратной связью по напряжению (сплошная) для различных значений напряжения управления: 10,8 В – синяя линия; 12 В – красная

необходимо корректировать в зависимости от сопротивления нагрузки, что можно выполнить в цифровой системе управления.

Нагрузочные характеристики конвертора с вольтодобавкой  $U_n = f(I_n)$  приведены на рис. 9. Пунктиром показаны характеристики конвертора без обратной связи, сплошной линией – с обратной связью по напряжению нагрузки.

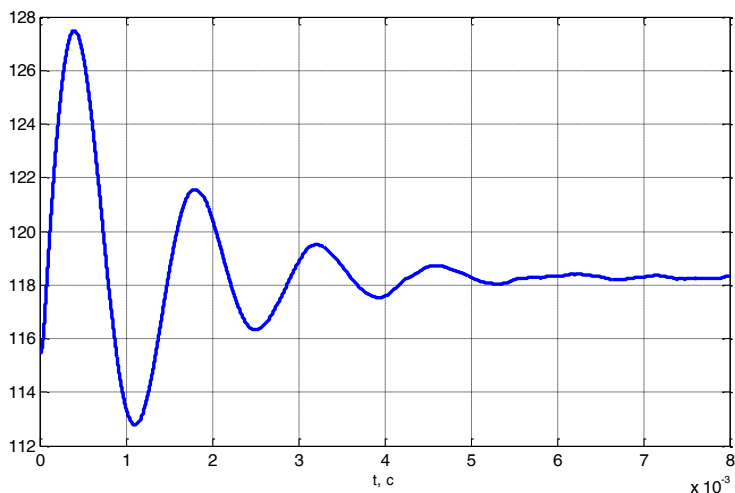


Рис. 10. Кривая разгона тока дросселя

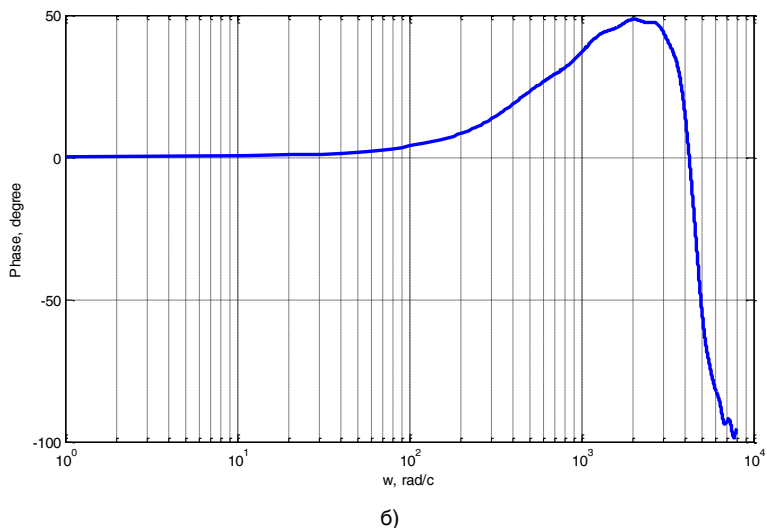
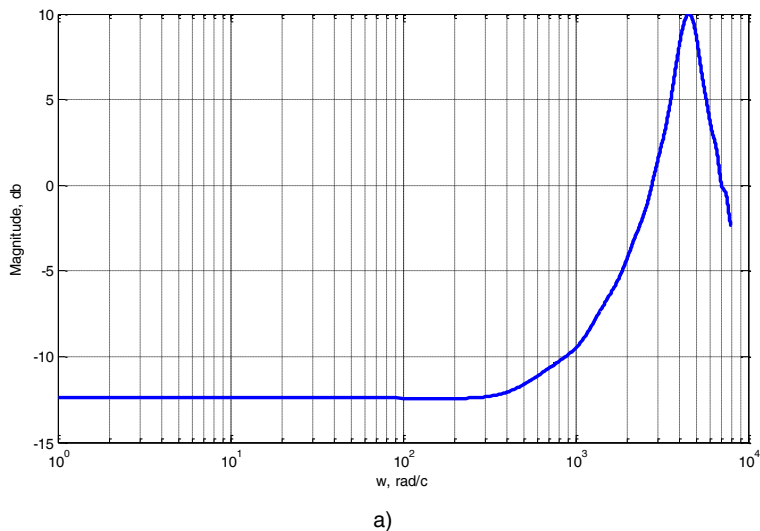


Рис. 11. Частотные характеристики конвертора по току дросселя:  
а – АЧХ; б – ФЧХ

Обратная связь позволяет получить жесткие нагрузочные характеристики: напряжение нагрузки не изменяется при изменении сопротивления нагрузки в широких пределах. Однако из-за того, что напряжение вольтодобавки выбрано небольшим (70 В) из соображений ограничения напряжения на холостом ходу конвертора, при малом сопротивлении нагрузки наступает режим ограничения сигнала обратной связи и напряжение нагрузки снижается. Как следствие, нагрузочная характеристика при номинальном напряжении управления становится менее жесткой. Этому режиму соответствует

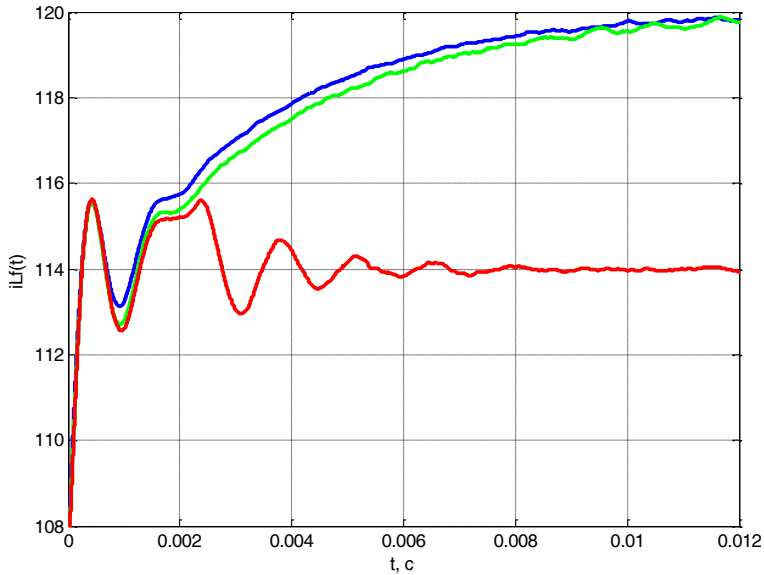


Рис. 12. Переходные процессы в конверторе с ПИ-регулятором тока дросселя для различных значений сопротивления нагрузки: 1,7 Ом – синяя линия; 1,9 Ом – зеленая; 2,1 Ом – красная

кривая переходного процесса при  $R_H = 0,5 \text{ Ом}$  (красная линия на рис. 8).

Кривая разгона тока дросселя приведена на рис. 10. По виду кривой разгона можно предположить, что это переходный процесс двух последовательно соединенных звеньев: форсирующего и колебательного.

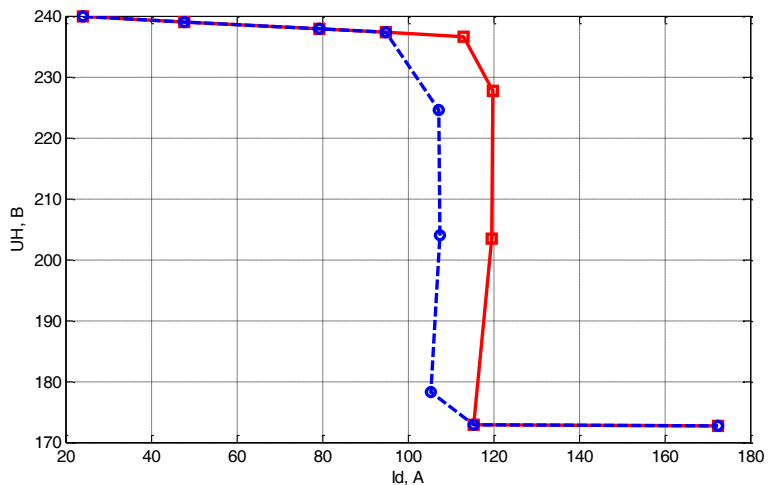


Рис. 13. Нагрузочные характеристики  $U_H = f(I_d)$  конвертора с вольтодобавкой обратной связью по току дросселя для различных значений напряжения управления: 10,8 В – синий пунктир; 12 В – красная линия

Передаточная функция конвертора в этом случае

$$W_{\text{oy}(r)}(p) = \frac{K_{\text{oy}}(T_{\phi}p + 1)}{T_{\kappa}^2 p^2 + 2\xi T_{\kappa} p + 1} = \frac{\frac{K_{\text{oy}}}{T_{\kappa}^2}(T_{\phi}p + 1)}{p^2 + \frac{2\xi}{T_{\kappa}}p + \frac{1}{T_{\kappa}^2}} = \frac{K_0(T_{\phi}p + 1)}{p^2 + a_1 p + a_0}. \quad (3)$$

Используя кривую разгона, можно определить динамические параметры передаточной функции (3) [6] и построить частотные характеристики конвертора по току дросселя (рис. 11).

Пренебрегая числителем передаточной функции (3), вычислим параметры ПИ-регулятора тока дросселя, представив конвертор колебательным звеном.

Аналогично случаю с обратной связью по напряжению нагрузки по кривой разгона тока дросселя (рис. 10) определим значения  $A_1$ ,  $A_2$  и  $T_1$ , а по ним – динамические параметры  $T_{\kappa}$  и  $\xi$  колебательного звена. Корневым методом получим следующие параметры ПИ-регулятора тока дросселя:

$$K_{\text{ит}} = 0,53 \text{ и } K_{\text{ит}} = 1866.$$

Переходные процессы при изменении напряжения управления в конверторе с обратной связью по току дросселя с рассчитанными параметрами ПИ-регулятора для различных значений сопротивления нагрузки приведены на

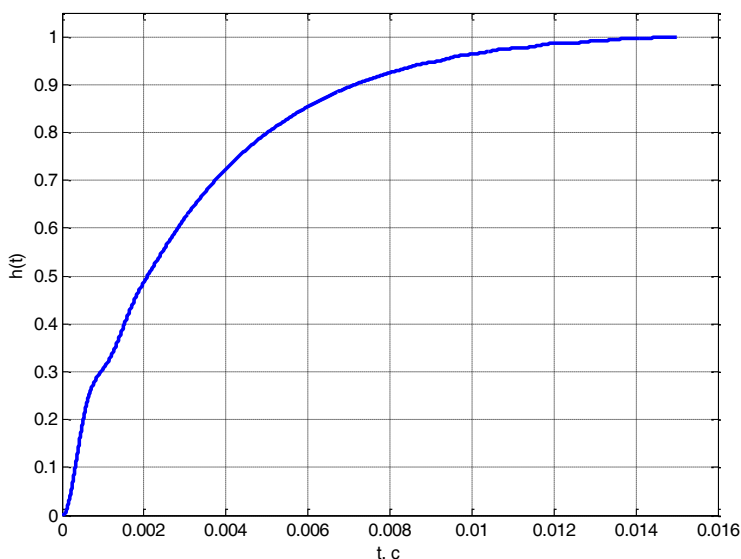


Рис. 14. Кривая разгона напряжения нагрузки конвертора в системе, замкнутой по току дросселя

рис. 12, на рис. 13 – нагрузочные характеристики конвертора с вольтодобавкой  $U_{н} = f(I_d)$ . Увеличение сопротивления нагрузки приводит к ограничению сигнала обратной связи. Так, например, при  $R_{н} = 2,1$  Ом в момент времени  $t = 0,0022$  с (рис. 12) сигнал обратной связи ограничивается, вследствие чего установившееся значение тока дросселя меньше требуемого, а напряжение нагрузки превышает номинальное. Для исключения такого режима можно перейти на релейный принцип регулирования.

Ток  $I_d$  стабилизируется, пока напряжение нагрузки не снизится до значения напряжения питания. При увеличении сопротивления  $R_{н}$  напряжение нагрузки ограничивается суммой напряжений питания и вольтодобавки.

По кривой разгона напряжения нагрузки конвертора в системе, замкнутой по току дросселя (рис. 14), можно предположить, что в более простом виде новый объект управления может быть представлен инерционным звеном первого порядка. По нормированной кривой разгона постоянную времени инерционного звена определим на уровне 0,63 от установившегося значения. Получим  $T = 3,25$  мс.

Запишем передаточную функцию разомкнутой системы с ПИ-регулятором

$$W_p(p) = \frac{K_{oy}}{Tp+1} \frac{K_{н}p + K_{и}}{p} = \frac{K_{oy}(K_{н}p + K_{и})}{Tp^2 + p} = \frac{K_{oy} \left( \frac{K_{н}}{T}p + \frac{K_{и}}{T} \right)}{p^2 + p/T} =$$

$$= \frac{K_0 K_{н}p + K_0 K_{и}}{p^2 + p/T} = \frac{K_0 K_{н}p + K_0 K_{и}}{p^2 + a_1 p},$$

где  $a_1 = \frac{1}{3,25 \cdot 10^{-3}} = 0,31 \cdot 10^3$ ;  $K_0 = \frac{K_{oy}}{T} = \frac{1,026}{3,25 \cdot 10^{-3}} = 0,316 \cdot 10^3$ ;

$$K_{oy} = K_{дн} \frac{U_{н.у} - U_{н.о}}{\Delta U_y} = \frac{12}{230} \frac{227,9 - 204,3}{12 - 10,8} = 1,026.$$

Передаточная функция замкнутой системы по ошибке

$$W_3 = \frac{1}{1 + W_p(p)} = \frac{1}{1 + \frac{K_0 K_{н}p + K_0 K_{и}}{p^2 + a_1 p}} = \frac{p^2 + a_1 p}{p^2 + (a_1 + K_0 K_{н})p + K_0 K_{и}}.$$



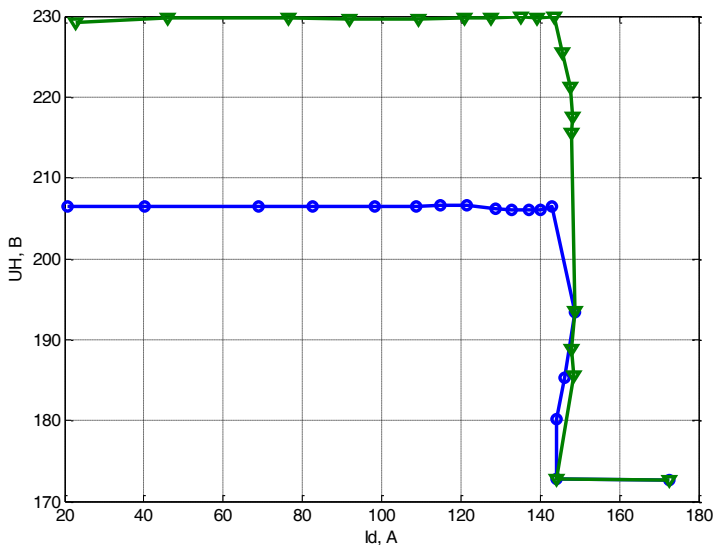


Рис. 15. Нагрузочные характеристики конвертора с подчиненным управлением  
 $K_{ит} = 0,53$ ;  $K_{ит} = 500$ ;  $K_{ин} = 2$ ;  $K_{ин} = 800$ ;  $U_y = 10,8$  В – синяя линия;  $U_y = 12$  В – зеленая

Характеристический многочлен

$$H(p) = p^2 + (a_1 + K_0 K_n) p + K_0 K_n$$

по теореме Виета представим в виде

$$p^2 + (a_1 + K_0 K_n) p + K_0 K_n = p^2 + 2\alpha p + \alpha^2 + \beta^2.$$

Сравнивая коэффициенты при одинаковых степенях  $p$ , получим

$$2\alpha = a_1 + K_0 K_n;$$

$$\alpha^2 + \beta^2 = K_0 K_n.$$

В двух уравнениях – четыре неизвестных. Зададимся отношением между  $\alpha$  и  $\beta$  исходя из времени регулирования  $t_p$  и перерегулирования  $\delta$ . Положим  $t_p = 6$  мс. Исходя из того, что  $t_p$  определяется временем вхождения в 5%-ю трубку, получим

$$\alpha = \frac{|\ln 0,05|}{t_p} = \frac{3}{t_p} = \frac{3}{6 \cdot 10^{-3}} = 0,5 \cdot 10^3.$$

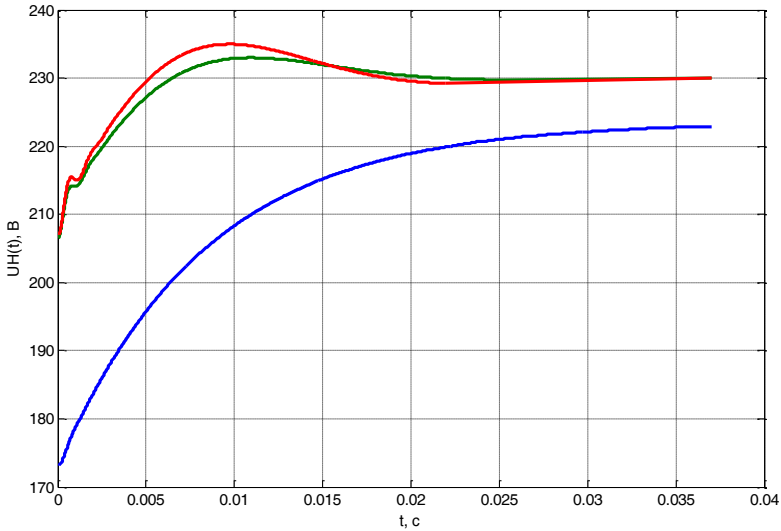


Рис. 16. Кривые разгона конвертора с вольтодобавкой по напряжению нагрузки с подчиненным управлением для различных значений сопротивления нагрузки: 1,5 Ом – синяя линия; 1,9 Ом – зеленая; 10 Ом – красная

Поскольку перерегулирование  $\delta = e^{-\pi/\mu}$ , а  $\mu = \frac{\beta}{|\alpha|}$ , то для перерегулирования  $\delta = 5\%$  будем иметь

$$\beta = 1,048\alpha = 0,524 \cdot 10^3.$$

Тогда

$$K_{\Pi} = \frac{2\alpha - a_1}{K_0} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10^3 - 0,31 \cdot 10^3}{0,316 \cdot 10^3} = 2,19;$$

$$K_{\Pi} = \frac{\alpha^2 + \beta^2}{K_0} = \frac{(0,5 \cdot 10^3)^2 + (0,524 \cdot 10^3)^2}{0,316 \cdot 10^3} = 1660.$$

Если предположить, что корни характеристического уравнения замкнутой системы вещественные, то  $\beta$  будет равно нулю и интегральный коэффициент регулятора примет следующее значение:

$$K_{\Pi} = \frac{\alpha^2}{K_0} = \frac{(0,5 \cdot 10^3)^2}{0,316 \cdot 10^3} = 791.$$

На рис. 15 приведены нагрузочные характеристики конвертора с

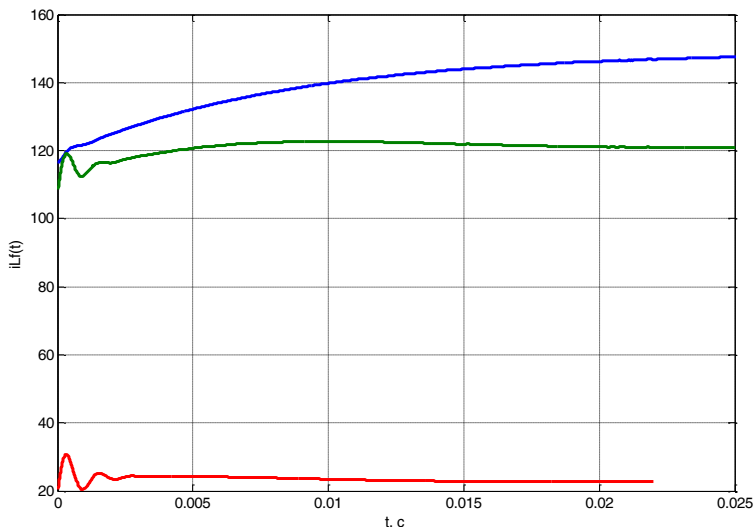


Рис. 17. Кривые разгона конвертора с вольтодобавкой по току дросселя с подчиненным управлением для различных значений сопротивления нагрузки: 1,5 Ом – синяя линия; 1,9 Ом – зеленая; 10 Ом – красная

подчиненным управлением. Изменение сопротивления нагрузки в диапазоне, обеспечивающем ток дросселя до 140 А, не приводит к снижению напряжения нагрузки, оно поддерживается постоянным. В результате нагрузочные характеристики имеют горизонтальный участок. При дальнейшем уменьшении сопротивления нагрузки наступает режим ограничения тока, что приводит к появлению вертикального участка характеристик. Напряжение нагрузки снижается до значения напряжения питания. В данном конверторе напряжение нагрузки не может быть меньше напряжения питания, поэтому дальнейшая стабилизация тока невозможна, и он начинает расти с уменьшением сопротивления нагрузки.

Изменяя напряжение управления, можно регулировать напряжение нагрузки, а изменяя уровень ограничения регулятора напряжения, можно регулировать уровень ограничения тока нагрузки.

Кривые переходных процессов изменения напряжения нагрузки и тока дросселя для параметров регулятора  $K_{\text{ит}} = 0,53$ ;  $K_{\text{нт}} = 500$ ;  $K_{\text{пн}} = 2$ ;  $K_{\text{ин}} = 800$  при различных значениях сопротивления нагрузки приведены на рис. 16 и рис. 17.

Увеличение сопротивления нагрузки приводит к росту перерегулирования по напряжению нагрузки. Снижение сопротивления нагрузки ограничивает ток дросселя, вследствие чего уменьшается напряжение нагрузки. Это соответствует выходу на вертикальный участок нагрузочной характеристики (рис. 15).

Анализ кривых переходных процессов показывает, что ПИ-регулятор с параметрами, рассчитанными для номинального режима, при изменении сопротивления нагрузки в широком диапазоне не обеспечивает требуемого качества регулирования. Следовательно, необходима корректировка параметров регулятора, которую легко может обеспечить только цифровая система управления.

#### Литература

1. Лазарева Н.М., Повышающие преобразователи в системах оперативного постоянного тока электростанций и подстанций / Н.М. Лазарева, Н.И. Шаварин, В.М. Яров, А.Л. Иванов, А.В. Лях // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. тр. НПП «ЭКРА». – Чебоксары: РИЦ «СРАЗУ». – 2013. Вып. II. – С. 56-64.
2. Шаварин Н.И. Двухфазный повышающий конвертор с цифровым управлением / Н.И. Шаварин, В.М. Яров, Н.М. Лазарева, А.В. Лях, А.Л. Иванов // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. тр. НПП «ЭКРА». – Чебоксары: РИЦ «СРАЗУ». – 2013. – Вып. III. – С. 64-83.
3. Смольников Л.Е. Транзисторные преобразователи напряжения. – М. Изд-во МЭИ, 1983. – 224 с.
4. Шаварин Н.И. Стабилизаторы на основе конверторов с вольтодобавкой в системах постоянного оперативного тока / Н.И. Шаварин, В.М. Яров, Н.М. Лазарева, Ю.В. Павлов // Релейная защита и автоматизация. – Чебоксары: РИЦ «СРАЗУ». – 2013. – № 3 (12). – С. 46-49.
5. Шаварин Н.И. Определение передаточной функции LLC-конвертора по кривой разгона / Н.И. Шаварин, Н.М. Лазарева, В.М. Яров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 11-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: изд-во Чуваш ун-та, 2015. – С. 90-100.
6. Шаварин Н.И., Яров В.М., Лазарева Н.М. Двухфазный повышающий конвертор как звено системы автоматического управления // Силовая электроника. – 2015. – № 3. – С. 40-46.
7. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с.

### Сведения об авторах



#### ***Шаварин Николай Иванович***

*Главный специалист отдела НКУ, к.т.н. Окончил Чувашский государственный университет (ЧГУ) им. И.Н. Ульянова в 1977 году. В 1987 году в Московском энергетическом институте защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Разработка цифровых систем управления с низкой чувствительностью к изменению параметров».*



#### ***Лазарева Надежда Михайловна***

*Доцент кафедры промышленной электроники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, к.т.н. Окончила факультет электрификации и автоматизации промышленности ЧГУ им. И.Н. Ульянова в 1981 году. Автор 95 научных статей и учебных пособий в области компьютерного моделирования устройств силовой электроники и цифровой обработки сигналов.*



#### ***Яров Виктор Михайлович***

*Доцент кафедры промышленной электроники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, к.т.н. Окончил Новосибирский электротехнический институт в 1965 году по специальности «Промышленная электроника». Автор свыше 100 научных статей и 30 изобретений в области силовой электроники, заслуженный изобретатель Чувашии.*

УДК 621.311:621.316.925.2:001.891.573

Егоров Е.П.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ RSCAD

**Аннотация:** рассмотрено моделирование измерительного органа продольной дифференциальной токовой защиты в программном комплексе RSCAD.

**Ключевые слова:** дифференциальная токовая защита, RSCAD, моделирование.

Egorov E.P.

### SIMULATION MEASURING BODY LONGITUDINAL DIFFERENTIAL CURRENT PROTECTION USING RSCAD SOFTWARE

**Abstract:** modeling longitudinal differential current protection measuring body in RSCAD software considered.

**Keywords:** differential current protection, RSCAD, simulation.

#### Дифференциальная токовая защита

Дифференциальная токовая защита (ДТЗ) – один из видов релейной защиты, которая обладает абсолютной селективностью и выполняется быстродействующей (без искусственной выдержки времени) [1].

Различают продольную и поперечную ДТЗ. Продольные ДТЗ используются в основном для защиты элементов с сосредоточенными параметрами, например трансформаторов, автотрансформаторов. Они могут применяться также для защиты линий небольшой длины [2, 3].

Поперечные ДТЗ служат для защиты двух (и более) параллельных линий, а также для защиты от витковых замыканий обмотки статора синхронного генератора, имеющей параллельные ветви [4].

#### Принцип действия продольной ДТЗ

В общем случае принцип действия продольной ДТЗ базируется на том, что геометрическая сумма токов всех присоединений защищаемого объекта (*предполагается, что они условно направлены внутрь объекта*) при

отсутствии короткого замыкания (КЗ) в нём равна нулю –  $\sum_{k=1}^n I_{(k)} = 0$  (где  $n$  – количество присоединений), а при наличии КЗ она равна току в месте

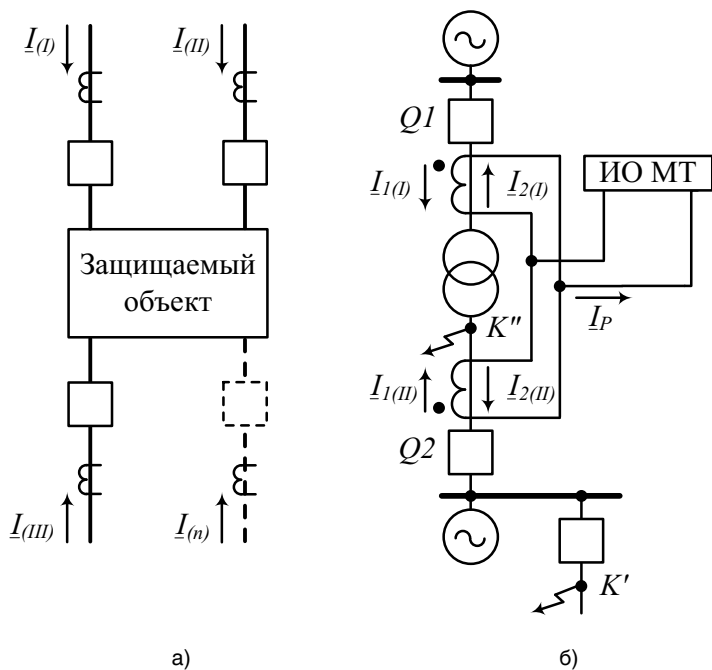


Рис. 1. Принцип работы ДТЗ  
 а) объект, защищаемый ДТЗ; б) схема продольной ДТЗ

повреждения –  $\sum_{k=1}^n I_{(k)} = I_{(КЗ)}$  (рис. 1, а) [5].

На практике обычно используют схему с *циркулирующими* токами [6], в которой вторичные обмотки измерительных трансформаторов тока (ИТТ) соответствующих присоединений соединяются последовательно, а входная цепь измерительного органа максимального тока (ИО МТ) – параллельно им (рис. 1,б). Циркулирующие токи – это токи, протекающие по вспомогательным проводам, соединяющие вторичные обмотки ИТТ.

Рабочий ток в ИО МТ с учётом условных положительных направлений токов, указанных на рис. 1, б стрелками (внутри защищаемой зоны), равен:  $I_P = I_{2(I)} + I_{2(II)}$  (геометрическая сумма).

При нормальной работе и внешних КЗ (точка  $K'$ ) первичные токи  $I_{1(I)}$  и  $I_{1(II)}$  равны и сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ . Поэтому при точной трансформации вторичные токи связаны соотношением  $I_{2(I)} = -I_{2(II)}$ , следовательно,  $I_P = 0$ , определяемый действительной разностью токов, и ИО МТ не срабатывает, хотя по вспомогательным проводам и *циркулируют* токи.

При внутренних КЗ (точка  $K''$ ) токи  $I_{1(I)}$  и  $I_{1(II)}$  в общем случае неодинаковы и в сумме равны току в месте КЗ:  $I_{КЗ''} = I_{1(I)} + I_{1(II)}$ . Следовательно,

$\underline{I}_P = \underline{I}_{2(I)} + \underline{I}_{2(II)}$ . При превышении уставки по току ( $|\underline{I}_P| \geq I_{\text{СРАБ.ИО МТ}}$ ) ИО МТ срабатывает и подаёт сигналы на отключение выключателей со всех сторон защищаемого элемента ( $Q1$  и  $Q2$ ).

### Моделирование измерительного органа продольной ДТЗ (авто)трансформатора в программном комплексе RSCAD.

Измерительный орган (ИО) ДТЗ состоит из нескольких узлов:

- компенсатора фазового сдвига и коэффициента схемы;
- формирователя дифференциального и тормозного сигналов (ФДТС);
- токового органа;
- блокировки от токов высших гармоник;
- дифференциальной токовой отсечки.

Упрощённая функциональная схема ИО ДТЗ представлена на рис. 2.

На вход ИО ДТЗ поступают токи с вторичных обмоток ИТТ, расположенных на соответствующих сторонах (авто)трансформатора. Далее с помощью математических выражений происходит операция компенсации фазового сдвига и коэффициента схемы, при этом учитывается схема соединения вторичных обмоток ИТТ и обмоток защищаемого силового (авто)трансформатора (звезда «Y» или треугольник «Δ»), вычисляются расчётные токи для каждой фазы ДТЗ в соответствии с методикой, описанной в руководстве по эксплуатации (РЭ) [7].

ФДТС выбирает из токов сторон (расчётных скомпенсированных токов обмоток) для каждой фазы наибольший и присваивает ему имя  $\underline{I}_{\text{MAX}}$ , а из суммы оставшихся получает ток  $\underline{I}_{\text{MIN}}$ .

Дифференциальный ток для каждой фазы определяется как

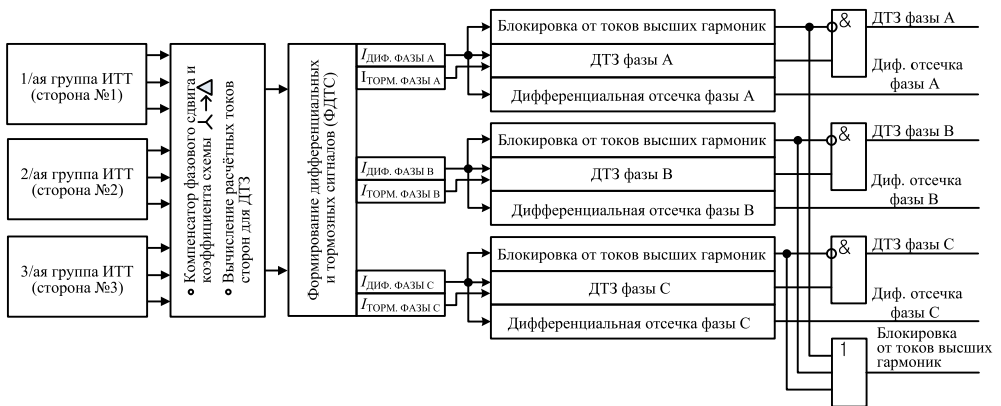


Рис. 2. Упрощённая функциональная схема ИО ДТЗ



$I_{\text{Диф.}} = |I_{\text{MAX}} + I_{\text{MIN}}|$ , а тормозной ток –  $I_{\text{ТОРМ.}} = \sqrt{|I_{\text{MAX}}| \cdot |I_{\text{MIN}}| \cdot \cos(\pi - \alpha)}$ , где  $\alpha$  – это угол между векторами токов  $I_{\text{MAX}}$  и  $I_{\text{MIN}}$ .

Данный способ формирования тормозного тока известен как способ «*направленного торможения*» [8, 9]. Свойство направленности тормозной ток приобретает благодаря третьему сомножителю, участвующему в формуле –  $\cos(\pi - \alpha)$ . При внешних КЗ угол  $\alpha \in [90^\circ; 270^\circ]$ , поэтому  $I_{\text{ТОРМ.}} \geq 0$  и определён, а при внутренних КЗ угол  $\alpha \in (-90^\circ; 90^\circ)$ , и принимается, что  $I_{\text{ТОРМ.}} = 0$  (рис. 3):

Характеристика срабатывания измерительного токового органа ДТЗ представлена на рис. 4 [9]. Характеристика срабатывания имеет:

- горизонтальный участок, определяемый уставкой «ток начала торможения» –  $I_{\text{T0}}$ ;
- наклонный участок, определяемый уставкой «коэффициент торможения» –  $K_T$ ;
- вертикальный участок, определяемый уставкой «ток торможения блокировки» –  $I_{\text{T.БЛ.}}$ .

Горизонтальный участок характеристики срабатывания позволяет обеспечить чувствительность ДТЗ при малых токах КЗ, определяемых уставкой «ток срабатывания» –  $I_{\text{Д0}}$ .

Наклонный участок описывается выражением:

$$I_{\text{СРАБ.}} = I_{\text{Д0}} + K_T \cdot (I_{\text{ТОРМ.}} - I_{\text{T0}}), \quad (1)$$

где  $I_{\text{ТОРМ.}}$  – текущее значение тормозного тока.

Коэффициент торможения влияет на устойчивость ДТЗ при внешних КЗ. Он равен отношению приращения дифференциального тока к приращению тормозного тока в условиях срабатывания.

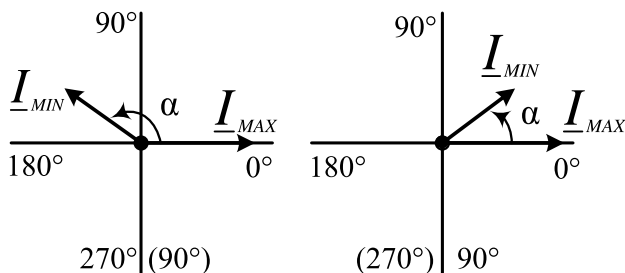


Рис. 3. Определение угла между векторами токов  $I_{\text{MAX}}$  и  $I_{\text{MIN}}$   
а) внешнее КЗ ( $\alpha \in [90^\circ; 270^\circ]$ ); б) внутреннее КЗ ( $\alpha \in (-90^\circ; 90^\circ)$ )

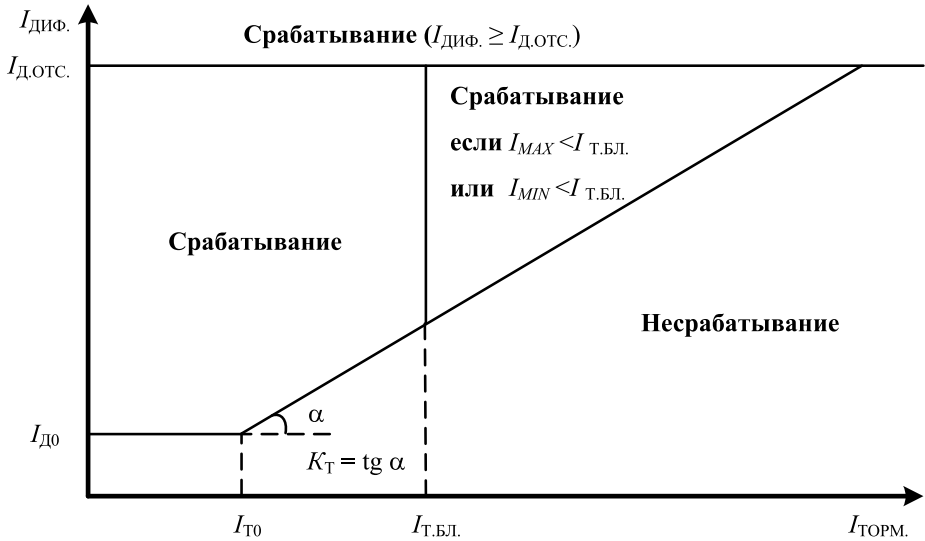


Рис. 4. Характеристика срабатывания ДТЗ

Ток торможения блокировки определяет переключение характеристики срабатывания ДТЗ с наклонного участка на вертикальный: если оба тока  $I_{MAX}$  и  $I_{MIN}$  превышают значение тока торможения блокировки, то это означает появление внешнего КЗ с большим *сквозным* током. В этом режиме ДТЗ блокируется. Сквозной ток – это ток, протекающий через защищаемый объект при внешнем КЗ [10].

Дифференциальная отсечка ( $I_{д.отс.}$ ) обеспечивает быстрое отключение автотрансформатора при внутренних КЗ, когда  $I_{диф.} \geq I_{д.отс.}$ :

В общем случае в дифференциальном токе могут присутствовать токи высших гармоник. Их наличие в некоторых случаях может служить идентификацией ненормальных режимов работы (авто)трансформатора, например, наличие токов чётных гармоник (главным образом 2-ой) сигнализирует о режиме насыщения (авто)трансформатора при включении, связанное с явлением броска намагничивающего тока (БНТ), а токов нечётных гармоник (3-ей или 5 ой) – о режиме перевозбуждения (авто)трансформатора [10, 11, 12].

Токи высших гармоник могут или участвовать в блокировке работы ИО ДТЗ (Harmonic Blocking), или присутствовать в выражении (1) в качестве дополнительного слагаемого (Harmonic Restraint) [13, 14].

В данной модели ИО ДТЗ используется первый способ – блокировка от токов высших гармоник: при превышении уставки по 2-ой и 5-ой гармоник ИО ДТЗ выводится из работы.

Ещё одним критерием торможения ДТЗ может быть наличие постоянной составляющей в дифференциальном токе при внешних КЗ. Указанное

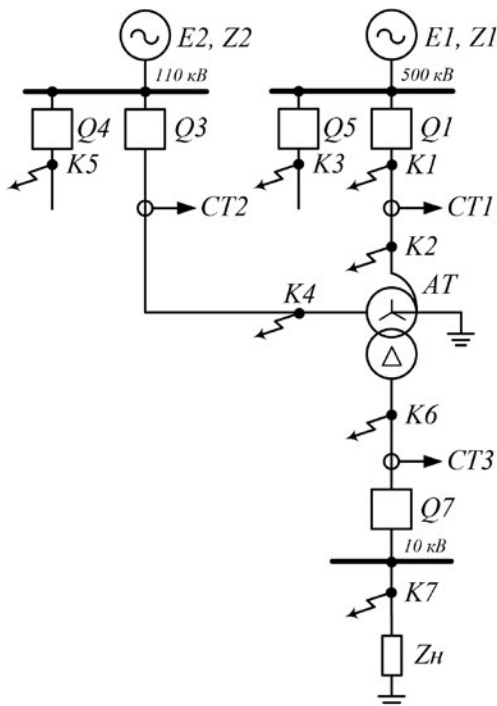


Рис. 5 Схема моделируемого участка энергосистемы

Пояснения к рис. 5:  $Q$  – выключатели;  $E1, E2$  – эквиваленты энергосистемы 500 кВ и 110 кВ с полными сопротивлениями  $Z1, Z2$  соответственно;  $CT$  – измерительные трансформаторы тока;  $K$  – точки коротких замыканий;  $AT$  – автотрансформатор;  $Z_{н}$  – сопротивление нагрузки.

обуславливается различной степенью насыщения ИТТ и, соответственно, различной степенью передачи апериодической составляющей в первичном токе во вторичную цепь [15].

### Моделирование схемы энергосистемы

Для тестирования работы модели ИО ДТЗ в программном модуле RSACD/Draft была собрана схема, представляющая собой эквиваленты энергосистем 500 кВ и 110 кВ, секции шин 500 кВ и 110 кВ с дополнительными отходящими линиями, автотрансформатор 500 / 110 / 10 кВ и секцию шин 10 кВ (рис. 5).

### Анализ полученных результатов

Результаты моделирования некоторых режимов работы энергосистемы представлены в виде осциллограмм на рис. 6 и 7.

Пояснения к рис. 6 и 7:

IED – intelligent electronic device – интеллектуальное электронное устройство.

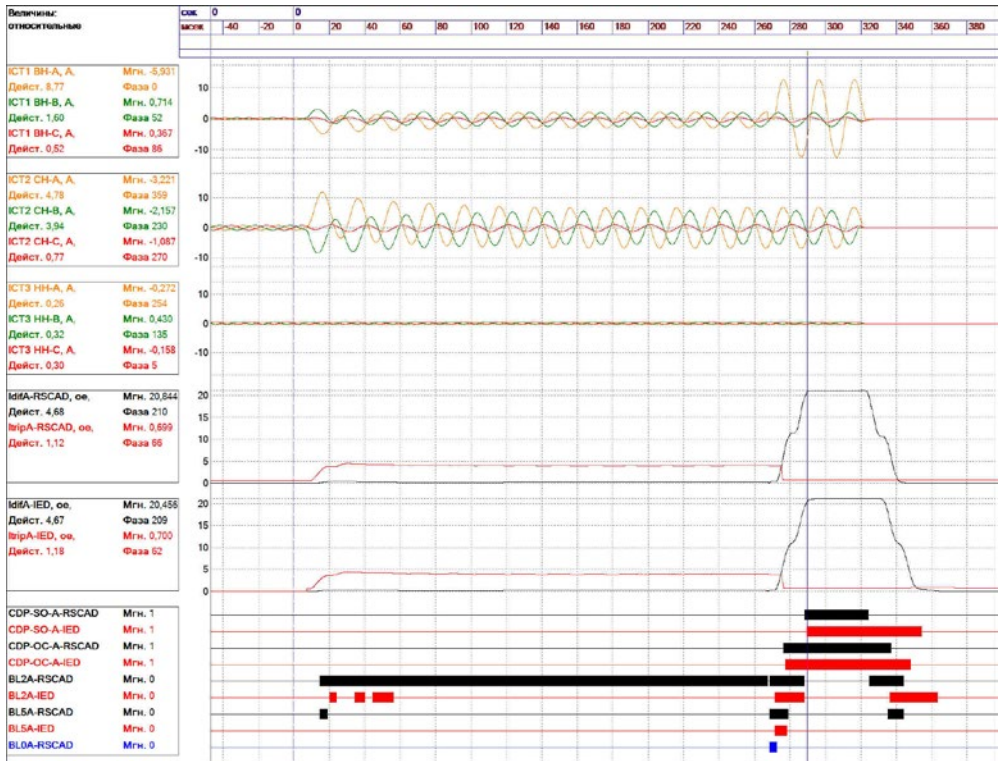


Рис. 6. Осциллограмма опыта 1 (фаза А)

В качестве IED выступал терминал основных защит (авто)трансформатора БЭ2704v041 производства ООО НПП «ЭКРА» с поддержкой протокола SV (Sampled Value) стандарта МЭК 61850.

Аналоговые сигналы:

ICT ВН (СН, НН) – вторичный ток ИТТ СТ сторон ВН, СН, НН;

Idif-RSCAD (IED) – дифференциальный ток модели ИО и IED;

Itrip-RSCAD (IED) – порог срабатывания в модели ИО и IED.

Дискретные сигналы:

CDP-SO-RSCAD (IED) – дифференциальный ток модели ИО и IED;

CDP-OC-RSCAD (IED) – дифференциальная отсечка модели ИО и IED;

BL2-RSCAD (IED) – блокировка по 2-ой гармонике в модели ИО и IED;

BL5-RSCAD (IED) – блокировка по 5-ой гармонике в модели ИО и IED;

BL0-RSCAD – блокировка по постоянной составляющей в модели ИО.

На осциллограмме (рис. 6) показаны вторичные токи ИТТ всех присоединений автотрансформатора (ВН, СН, НН), дифференциальные токи и пороги срабатывания модели ИО и IED для фазы А, дискретные сигналы защиты (черным показаны сигналы модели ИО, красным – IED, синим – блокировка по постоянной составляющей).

Опыт 1 состоит в следующем: через 7 мс после начала осциллографирования (точка 0 мсек) происходит внешнее двухфазное КЗ на землю фаз А и В на ошиновке 500 кВ (точка  $K1$ ), через 260 мс переходящее во внутреннее

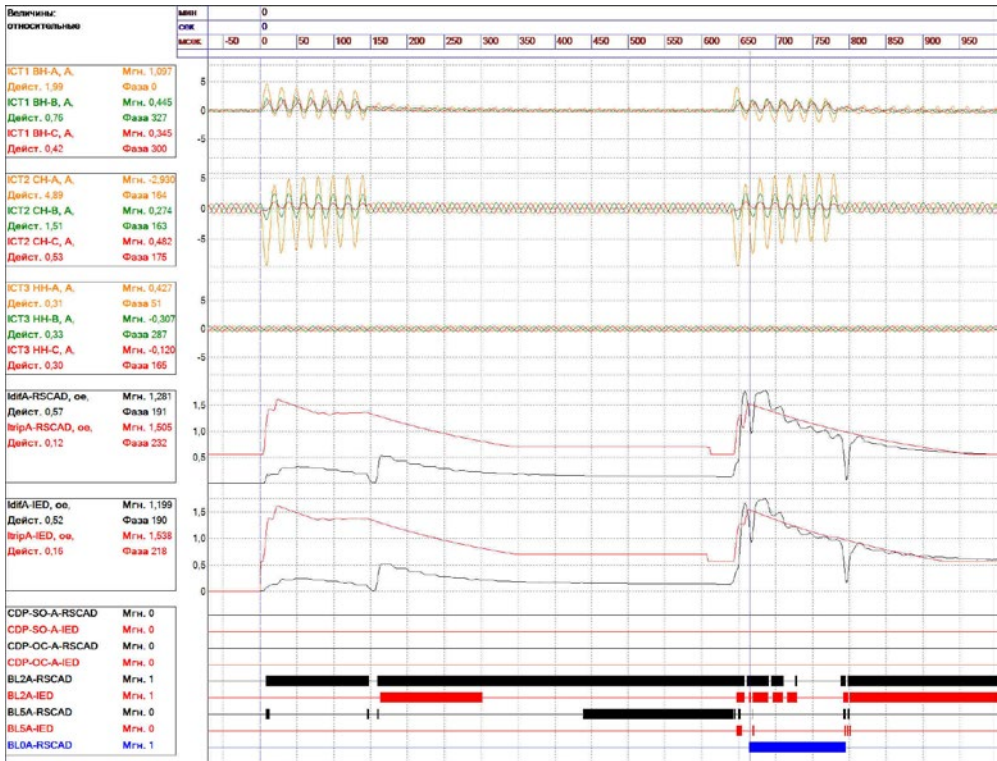


Рис. 7. Осциллограмма опыта 2 (фаза А)

КЗ на фазе А (точка  $K'2$ ), с сохранением внешнего КЗ на фазе В (точка  $K'1$ ).

В режиме внешнего КЗ уровень порога срабатывания больше уровня дифференциального тока, и ДТЗ не срабатывает. В режиме внутреннего КЗ тормозной ток становится равным нулю, порог срабатывания уменьшается, дифференциальный ток увеличивается, и ДТЗ срабатывает.

Как видно, форма и величина дифференциальных токов и порогов срабатывания (в предаварийном и аварийном режимах) модели ИО ДТЗ и IED совпадают, что позволяет говорить о высокой точности моделирования.

На осциллограмме (рис. 7) также показаны вторичные токи ИТТ всех присоединений автотрансформатора (ВН, СН, НН), дифференциальные токи и пороги срабатывания модели ИО и IED для фазы А, дискретные сигналы защиты (черным показаны сигналы модели ИО, красным – IED, синим – блокировка по постоянной составляющей).

Опыт 2 состоит в следующем: через 8 мс после начала осциллографирования (точка 0 мсек) происходит внешнее однофазное КЗ на землю фазы А на смежном присоединении 500 кВ (точка  $K'3$ ) с неуспешным АПВ (бестоковая пауза 500 мс).

В режиме внешнего КЗ уровень порога срабатывания больше уровня дифференциального тока, и ДТЗ не срабатывает. Через 140 мс внешняя защита отключает выключатель  $Q5$ , но КЗ сохраняется. После окончания цикла АПВ, при попытке включить выключатель  $Q5$  (650 мс) дифференциальный ток возрастает за счёт насыщения ИТТ и наличия апериодической составляющей, но срабатывания ДТЗ не происходит по причине блокировки чувствительного органа по 2-ой гармонике и постоянной составляющей. Через 140 мс внешняя защита снова отключает выключатель  $Q5$ .

Как видно, форма и величина дифференциальных токов и порогов срабатывания (в предаварийном и аварийном режимах) модели ИО ДТЗ и IED также совпадают, что позволяет говорить о высокой точности моделирования.

### Выводы:

1. Показана возможность реализации моделей ИО различных типов защит в программном комплексе RSCAD на примере ИО продольной ДТЗ.

2. Сравнением с процессами работы терминала БЭ2704v041 показано, что поведение модели ИО продольной ДТЗ с достаточной степенью точности соответствует алгоритму, заложенному в терминале.

3. Данную модель ИО ДТЗ можно применять на практике, например, в режиме моделирования переходных процессов в элементах энергосистемы и анализе взаимодействия нескольких типов защит.

### Литература

1. Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.: ил.
2. Дони А.Н., Дони Н.А. Особенности продольной дифференциальной защиты линии с цифровыми каналами связи между полуккомплектами // Материалы конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – 2009. – С. 192-197.
3. Дони Н.А., Иванов И.Ю., Иванова В.Р. Моделирование дифференциальной защиты линий электропередачи, работающей на базе векторных значений токов // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – 01/Март. – С. 14-17.
4. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высш. шк., 1991. – 496 с.: ил.
5. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат. 1992. – 528 с.: ил.
6. Шабад М.А. Защита трансформаторов распределительных сетей. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1981. – 136 с.: ил.
7. Руководство по эксплуатации. Шкаф основной защиты автотрансформатора с высшим напряжением 330 кВ и выше типа ШЭ2710 542. ЭКРА.656453.083 РЭ.

8. Багинский Л.В. Основные особенности продольных дифференциальных защит электрооборудования электростанций и подстанций. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 68 с.
9. ABB. Numerical transformer protection. RET316\*4.
10. Циглер Г.В. Цифровые устройства дифференциальной защиты. Принципы и область применения. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 273 с.: ил.
11. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.: ил.
12. Дмитренко А.М. Дифференциальная защита трансформаторов и автотрансформаторов // Электричество. – 1975. – №2. – С.1-9.
13. Behrendt K., Fischer N., Labuschagne C. Considerations for Using Harmonic Blocking and Harmonic Restraint Techniques on Transformer Differential Relays // Journal of Reliable Power. – 2011. – Vol. 2 N 3.– P.36 – 52.
14. Schossing W. Introduction to the History of Differential Protection // PAC World. – 2008. – Summer. – P. 70 – 76.
15. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.: ил.

#### Сведения об авторе



#### **Егоров Евгений Петрович**

*Инженер 1 категории отдела разработки защит подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА». Окончил кафедру «Электрические и электронные аппараты» электротехнического факультета ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова» в 2010 году. В 2010 году получил степень магистра техники и технологии по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Автор 3 научных публикаций в области релейной защиты и микропроцессорной техники.*

УДК 621.316.925.1

Павлов А.В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ И ПОПЕРЕЧНОЙ НЕСИММЕТРИИ ЗА ТРАНСФОРМАТОРОМ В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

**Аннотация:** исследуется работа дистанционной защиты генератора при возникновении поперечной и продольной несимметрии за трансформатором с различными группами соединения обмоток в статическом режиме. Приводится анализ работы дистанционной защиты с учетом влияния системы, вида несимметрии, переходного сопротивления и других факторов.

**Ключевые слова:** дистанционная защита, характеристика срабатывания, поперечная несимметрия, продольная несимметрия, трансформатор.

**Pavlov A.V.**

### THE DISTANCE PROTECTION WORK IN SERIAL AND TRANSVERSE ASYMMETRY UNDER THE TRANSFORMER IN STATIC CONDITION ANALYSIS

**Abstract:** a distance protection of generator work with serial and transverse asymmetry in power system is analyzed in this article. The influence of system and transient resistance considered in the point of the fault.

**Keywords:** distance protection, work characteristic, serial and transverse asymmetry, transformer.

Исследованию работы дистанционной защиты (ДЗ) при коротких замыканиях (КЗ) за трансформатором посвящена обширная литература [1-3], [5]. Однако эти исследования относятся к анализу работы защиты только в режиме двухфазных КЗ через переходное сопротивление ( $r_d$ ) за трансформатором с группой соединения обмоток  $Y/\Delta-11$ . При этом предполагается, что сопротивления прямой и обратной последовательности элементов сети одинаковые, сеть имеет одностороннее питание, и отсутствуют токи нагрузки, а остальные виды КЗ не оказывают влияния на работу защиты [2]. Дистанционная защита предполагается выполненной в трехсистемном или односистемном исполнении, с контролем отношения междуфазных напряжений к разности фазных токов. Следует отметить, что в [1] проведен анализ работы защиты и в неполнофазных режимах (обрыв одной или двух фаз), а также учтено влияние расхождения ЭДС генератора и системы по модулю и фазе. В [3] также показано, что защита может правильно измерять сопротивление и при междуфазных КЗ.



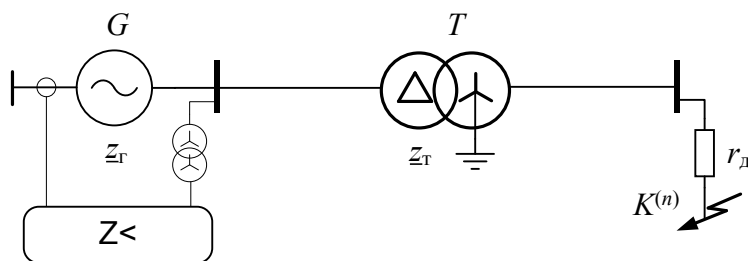


Рис. 1. Рассматриваемая схема

В данной работе будет проведен анализ работы ДЗ при различных видах КЗ за трансформатором с различными группами соединения обмоток, а также рассмотрен случай влияния системы на замер дистанционной защиты. Анализ будет выполнен как с учетом влияния переходного сопротивления, так и с учетом расхождения ЭДС генератора и системы по модулю. Дополнительно будет рассмотрена работа ДЗ в неполнофазных режимах. Также будут описаны некоторые особенности работы защиты применительно к защите генератора и приведен общий подход к анализу работы защиты в указанных режимах, позволяющий учитывать и другие особенности (например, отличие сопротивлений прямой и обратной последовательности генератора и системы).

Как было отмечено, анализ работы ДЗ, выполненный в [1-3], проведен в предположении, что сеть имеет одностороннее питание и отсутствуют токи нагрузки (рис. 1). При этом рассматривается трансформатор с группой  $Y/\Delta-11$ , а сопротивления прямой и обратной последовательности элементов приняты одинаковыми.

Расчетные выражения для измеряемых сопротивлений в этом случае принимают наиболее простой вид. Так, для двухфазных КЗ между фазами В и С выражения принимают вид:

$$\underline{Z}_{ab} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2(\underline{Z}_T + r_d) e^{-j90^\circ} \right] \quad \underline{Z}_a = 2(\underline{Z}_T + r_d) e^{-j60^\circ} + \underline{Z}_{1T} e^{-j90^\circ} \quad (1)$$

$$\underline{Z}_{bc} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2(\underline{Z}_T + r_d) e^{j30^\circ} + \underline{Z}_{1T} e^{j90^\circ} \right] \quad \underline{Z}_b = (\underline{Z}_T + r_d) \quad (2)$$

$$\underline{Z}_{ca} = \infty \quad \underline{Z}_c = 2(\underline{Z}_T + r_d) e^{j60^\circ} + \underline{Z}_{1T} e^{j90^\circ} \quad (3)$$

где  $r_d$  – переходное сопротивление.

Отметим, что в отличие от [2], формулы для  $Z_a$ ,  $Z_b$  и  $Z_c$  выведены дополнительно. Для однофазного КЗ в фазе А формулы запишутся в виде

$$\underline{Z}_{ab} = 3(\underline{Z}_T + r_d)e^{j60^\circ} + \underline{Z}_{1r}e^{j90^\circ} \quad \underline{Z}_a = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 3(\underline{Z}_T + r_d)e^{j30^\circ} + \underline{Z}_{1r}e^{-j90^\circ} \right] \quad (4)$$

$$\underline{Z}_{bc} = 3(\underline{Z}_T + r_d)e^{-j60^\circ} + \underline{Z}_{1r}e^{-j90^\circ} \quad \underline{Z}_b = \infty \quad (5)$$

$$\underline{Z}_{ca} = 1,5 \cdot (\underline{Z}_T + r_d) \quad \underline{Z}_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 3(\underline{Z}_T + r_d)e^{-j30^\circ} + \underline{Z}_{1r}e^{-j90^\circ} \right] \quad (6)$$

При двухфазных КЗ на землю между фазами В и С расчетные выражения получаются несколько сложнее:

$$\underline{Z}_{ab} = \frac{(\underline{Z}_{1r} + \underline{Z}_T) \cdot (\underline{Z}_{1r} + 3\underline{Z}_T)}{\underline{Z}_{1r} + \underline{Z}_T (1 + \sqrt{3}e^{j30^\circ})} - \underline{Z}_{1r} \quad \underline{Z}_a = \frac{(\underline{Z}_{1r} + 3\underline{Z}_T) \cdot (\underline{Z}_{1r} + 3\underline{Z}_T)}{\underline{Z}_{1r} + \underline{Z}_T (1 + \sqrt{3}e^{j60^\circ})} - \underline{Z}_{1r} \quad (7)$$

$$\underline{Z}_{bc} = \frac{(\underline{Z}_{1r} + \underline{Z}_T) \cdot (\underline{Z}_{1r} + 3\underline{Z}_T)}{\underline{Z}_{1r} + \underline{Z}_T (1 + \sqrt{3}e^{-j30^\circ})} - \underline{Z}_{1r} \quad \underline{Z}_b = Z_m \quad (8)$$

$$\underline{Z}_{ca} = 3\underline{Z}_T \quad \underline{Z}_c = \frac{(\underline{Z}_{1r} + \underline{Z}_T) \cdot (\underline{Z}_{1r} + 3\underline{Z}_T)}{\underline{Z}_{1r} + \underline{Z}_T (1 + \sqrt{3}e^{-j60^\circ})} - \underline{Z}_{1r} \quad (9)$$

Отметим, что формулы (7)-(9) приведены без учета переходного сопротивления. Формулы, учитывающие  $r_d$ , принимают еще более сложный вид и здесь не приводятся. Однако они могут быть выведены из комплексных схем замещения (рис. 5).

Дополнительно следует учитывать, что при двухфазных КЗ на землю электрическая дуга представляется двумя сопротивлениями  $r_d$  и  $r_{d-3}$ , каждое из которых влияет на замер ДЗ по-разному. Влияние каждого из сопротивлений будет показано далее. Также отметим, что выполнение защиты с контролем отношения фазных величин позволяет правильно измерять сопротивление и при двухфазных КЗ на землю.

Векторные диаграммы сопротивлений при КЗ за трансформатором с группой  $Y/\Delta-11$  приведены на рис. 2-4.

Как видно, при двухфазном КЗ и однофазном КЗ на землю наличие переходного сопротивления в месте КЗ не только «смещает» замер по оси  $R$ , но и вращает прямую «ОО'» (выделенную на рисунке пунктирной линией) вокруг сопротивления «особой точки» (обведенной на рисунке в кружок) на некоторый угол, обусловленный схемой соединения обмоток трансформатора.

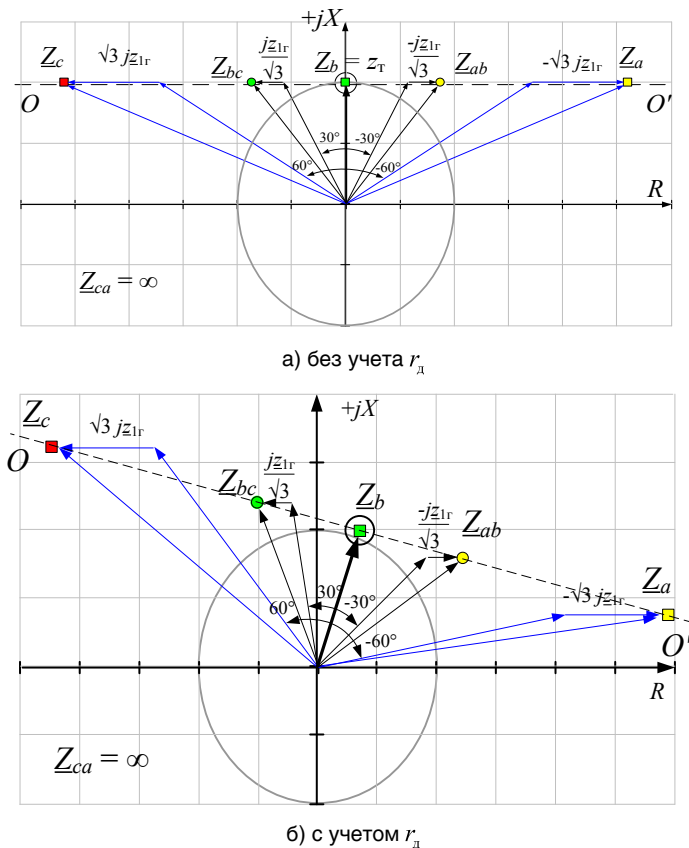


Рис. 2. Векторные диаграммы сопротивлений при двухфазном КЗ

Отметим, что в зависимости от схемы будут меняться как «особая», так и все остальные точки. Так, для трансформатора с группой  $Y / Y-0$  при двухфазных КЗ между фазами В и С за трансформатором на месте «особой точки» будет находиться точка  $Z_{bc}$ . В случае двухфазного КЗ на землю прямая «ОО'» вырождается в окружность, которая в зависимости от значения сопротивлений  $r_d$  и  $r_{д-3}$  либо перемещается в окружность с радиусом  $|Z_T + r_d|$  (при  $r_{д-3} = 0$ ), либо вырождается в прямую при  $r_{д-3} = \infty$ .

Отметим, что приведенные формулы не учитывают влияние системы на замер сопротивлений. Это связано с тем, что выражения в этом случае получаются достаточно сложными. Однако анализ поведения ДЗ с учетом системы принципиально не отличается от приведенного. Более того, не отличается и анализ работы ДЗ с учетом расхождения ЭДС генератора и системы по модулю и фазе, а также в неполнофазных режимах. При этом не трудно учесть и другие схемы соединения обмоток трансформатора. Так, для учета указанных факторов достаточно, как и выше, составить комплексные схемы замещения

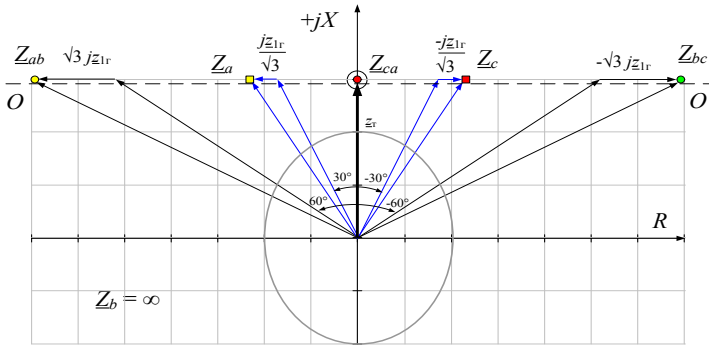
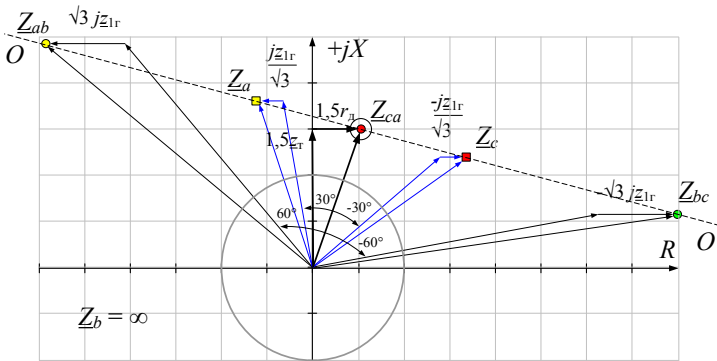

 а) без учета  $r_d$ 

 б) с учетом  $r_d$ 

Рис. 3. Векторные диаграммы сопротивлений при однофазном КЗ

для каждого вида несимметрии, определить токи и напряжения в месте установки защиты и, в зависимости от способа реализации защиты, подставить в соответствующие формулы. Для наиболее распространенных способов реализации защиты имеем:

$$\begin{aligned}
 Z_{ab} &= \frac{\dot{U}_a - \dot{U}_b}{\dot{I}_a - \dot{I}_b} & Z_{bc} &= \frac{\dot{U}_b - \dot{U}_c}{\dot{I}_b - \dot{I}_c} & Z_{ca} &= \frac{\dot{U}_c - \dot{U}_a}{\dot{I}_c - \dot{I}_a} \\
 Z_a &= \frac{\dot{U}_a}{\dot{I}_a + \underline{k}_0 3\dot{I}_0} & Z_b &= \frac{\dot{U}_b}{\dot{I}_b + \underline{k}_0 3\dot{I}_0} & Z_c &= \frac{\dot{U}_c}{\dot{I}_c + \underline{k}_0 3\dot{I}_0}
 \end{aligned}$$

Токи и напряжения фаз для всех видов поперечной несимметрии могут быть определены исходя из схем замещения, приведенных на рис. 5, а токи и напряжения фаз для наиболее распространённых видов продольной несимметрии (обрыва одной или двух фаз) – из схем замещения, приведенных на рис. 6.

Токи и напряжения в приведенных схемах относятся к системе симме-

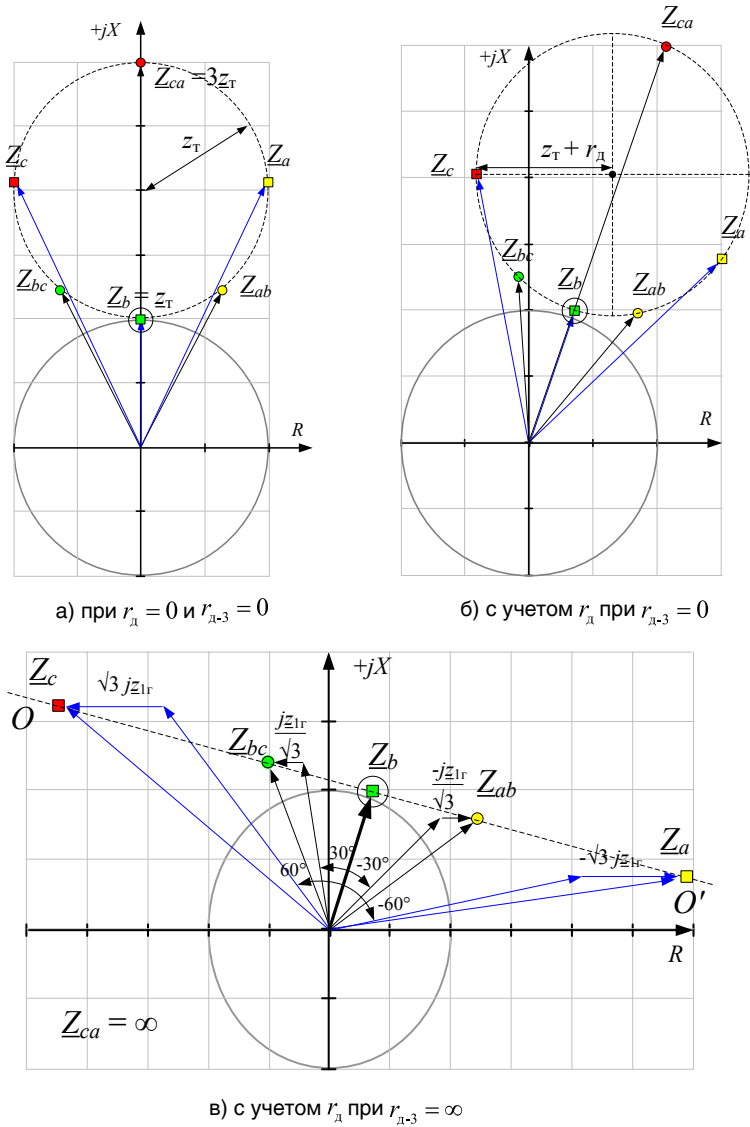


Рис. 4. Векторные диаграммы сопротивлений при двухфазном КЗ на землю

тричных координат. Для определения величин в фазных координатах достаточно воспользоваться матрицей преобразования Фортескью:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_0 \end{bmatrix}$$

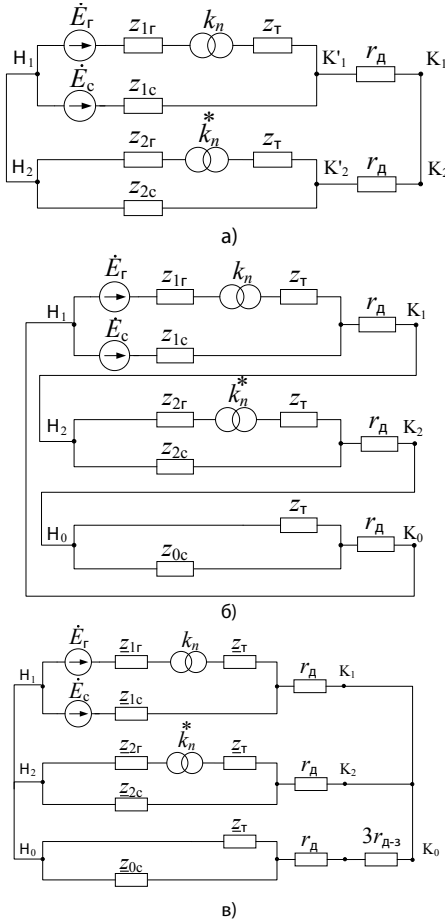


Рис. 5. Комплексные схемы замещения для анализа поперечной несимметрии:

- а) двухфазное КЗ,
- б) однофазное КЗ,
- в) двухфазное КЗ на землю

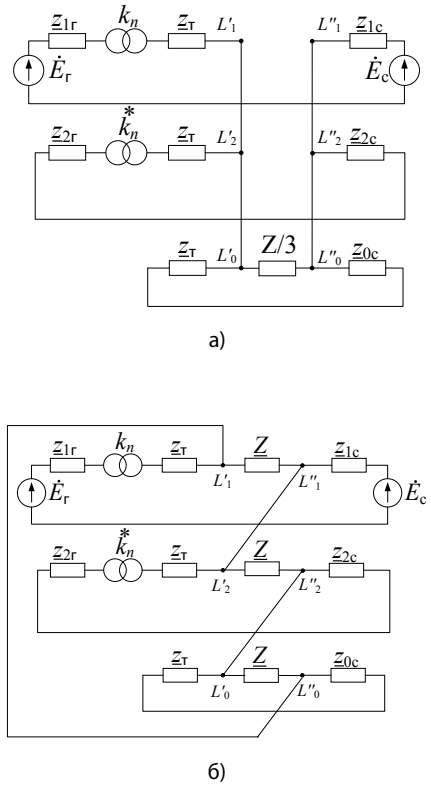


Рис. 6. Комплексные схемы замещения для анализа продольной несимметрии:

- а) обрыв одной фазы,
- б) обрыв двух фаз

Учет группы соединения обмоток трансформатора в обоих случаях осуществляется с помощью комплексного коэффициента трансформации [4]  $k_n = k_t e^{-j30^\circ N}$ . Следует отметить, что расчет токов и напряжений целесообразно выполнять в относительных единицах.

На основании изложенного был выполнен анализ работы дистанционной защиты при КЗ за трансформатором различных групп соединения обмоток, а также с учетом системы и расхождении ЭДС генератора и системы по фазе. Результаты анализа сведены в табл. 1 и 2.

Табл. 1. Замер ДЗ в зависимости от группы трансформатора и вида несимметрии

Группа Т		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$K^{(BC)}$	Z <sub>AB</sub>	0,573	0,676	0,655	0,323	<b>0,1</b>	<b>•0,032</b>	<b>•0,053</b>	<b>•0,066</b>	<b>•0,063</b>	<b>•0,045</b>	<b>0,1</b>	0,315	0,573
	Z <sub>BC</sub>	<b>0,1</b>	0,14	0,177	0,186	0,172	0,132	<b>0,1</b>	0,132	0,172	0,186	0,177	0,14	<b>0,1</b>
	Z <sub>CA</sub>	0,573	0,315	<b>0,1</b>	<b>•0,045</b>	<b>•0,063</b>	<b>•0,066</b>	<b>•0,053</b>	<b>•0,032</b>	<b>0,1</b>	0,323	0,655	0,676	0,573
	Z <sub>A</sub>	∞	1,934	0,394	<b>0,1</b>	<b>•0,007</b>	<b>•0,036</b>	<b>•0,045</b>	<b>•0,036</b>	<b>•0,007</b>	<b>0,1</b>	0,394	1,934	∞
	Z <sub>B</sub>	0,213	0,291	0,316	0,301	0,212	<b>0,1</b>	<b>•0,076</b>	<b>0,1</b>	0,114	0,11	<b>•0,088</b>	<b>0,1</b>	0,213
	Z <sub>C</sub>	0,213	<b>0,1</b>	<b>•0,088</b>	0,11	0,114	<b>0,1</b>	<b>•0,076</b>	<b>0,1</b>	0,212	0,301	0,316	0,291	0,213
$K^{(BC0)}$	Z <sub>AB</sub>	0,42	0,519	0,438	0,239	<b>0,1</b>	<b>•0,039</b>	<b>•0,039</b>	<b>•0,049</b>	<b>•0,048</b>	<b>•0,046</b>	<b>0,1</b>	0,238	0,42
	Z <sub>BC</sub>	<b>0,1</b>	0,126	0,156	0,165	0,151	0,12	<b>0,1</b>	0,12	0,151	0,165	0,156	0,126	<b>0,1</b>
	Z <sub>CA</sub>	0,42	0,238	<b>0,1</b>	<b>•0,046</b>	<b>•0,048</b>	<b>•0,049</b>	<b>•0,039</b>	<b>•0,039</b>	<b>0,1</b>	0,239	0,438	0,519	0,42
	Z <sub>A</sub>	0,943	0,622	0,27	<b>0,1</b>	<b>•0,024</b>	<b>•0,011</b>	<b>•0,02</b>	<b>•0,011</b>	<b>•0,024</b>	<b>0,1</b>	0,27	0,622	0,943
	Z <sub>B</sub>	0,179	0,25	0,276	0,252	0,177	<b>0,1</b>	<b>•0,075</b>	<b>•0,087</b>	<b>•0,098</b>	<b>•0,095</b>	<b>•0,082</b>	<b>0,1</b>	0,179
	Z <sub>C</sub>	0,179	<b>0,1</b>	<b>•0,082</b>	<b>•0,095</b>	<b>•0,098</b>	<b>•0,087</b>	<b>•0,075</b>	<b>0,1</b>	0,177	0,252	0,276	0,25	0,179
$K^{(A)}$	Z <sub>AB</sub>	0,439	0,269	0,165	0,136	0,114	<b>•0,081</b>	<b>•0,033</b>	<b>•0,044</b>	0,14	0,239	0,316	0,388	0,439
	Z <sub>BC</sub>	∞	1,462	0,391	0,132	<b>•0,053</b>	<b>•0,043</b>	<b>•0,045</b>	<b>•0,043</b>	<b>•0,053</b>	0,132	0,391	1,462	∞
	Z <sub>CA</sub>	0,439	0,388	0,316	0,239	0,14	<b>•0,044</b>	<b>•0,033</b>	<b>•0,081</b>	0,114	0,136	0,165	0,269	0,439
	Z <sub>A</sub>	0,311	0,264	0,221	0,186	0,141	<b>•0,079</b>	<b>•0,022</b>	<b>•0,079</b>	0,141	0,186	0,221	0,264	0,311
	Z <sub>B</sub>	0,98	0,583	0,195	0,101	<b>•0,081</b>	<b>•0,066</b>	<b>•0,043</b>	<b>•0,012</b>	<b>•0,083</b>	0,231	0,452	0,676	0,98
	Z <sub>C</sub>	0,98	0,676	0,452	0,231	<b>•0,083</b>	<b>•0,012</b>	<b>•0,043</b>	<b>•0,066</b>	<b>•0,081</b>	0,101	0,195	0,583	0,98
$L^{(A)}$	Z <sub>AB</sub>	0,333	0,521	0,545	0,52	0,555	0,664	0,89	1,056	0,691	0,422	0,31	0,276	0,333
	Z <sub>BC</sub>	0,135	0,193	0,407	0,784	0,801	0,706	0,676	0,706	0,801	0,784	0,407	0,193	0,135
	Z <sub>CA</sub>	0,333	0,276	0,31	0,422	0,691	1,056	0,89	0,664	0,55	0,52	0,545	0,521	0,333
	Z <sub>A</sub>	0,477	0,42	0,396	0,436	0,556	0,819	1,102	0,819	0,556	0,436	0,396	0,42	0,477
	Z <sub>B</sub>	0,188	0,325	0,634	0,68	0,631	0,643	0,72	0,88	0,937	0,542	0,291	0,194	0,188
	Z <sub>C</sub>	0,188	0,194	0,291	0,542	0,937	0,88	0,72	0,649	0,631	0,68	0,634	0,325	0,188
$L^{(BC)}$	Z <sub>AB</sub>	0,34	0,271	0,349	0,784	∞	1,299	0,846	0,745	0,797	1,175	∞	0,725	0,34
	Z <sub>BC</sub>	∞	0,921	0,567	0,519	0,622	1,103	∞	1,103	0,622	0,519	0,567	0,921	∞
	Z <sub>CA</sub>	0,34	0,725	∞	1,175	0,797	0,745	0,846	1,299	∞	0,784	0,349	0,271	0,34
	Z <sub>A</sub>	0,221	0,297	0,711	∞	1,268	0,857	0,782	0,857	1,268	∞	0,711	0,297	0,221
	Z <sub>B</sub>	0,805	0,442	0,385	0,472	0,930	∞	1,241	0,759	0,648	0,692	1,051	∞	0,805
	Z <sub>C</sub>	0,805	∞	1,051	0,692	0,648	0,759	1,241	∞	0,930	0,472	0,385	0,442	0,805

Табл. 2. Замер ДЗ при расхождении ЭДС по фазе на  $80^\circ$  для группы  $Y/\Delta-11$ 

Исполнение	Вид несимметрии				
	$K^{(BC)}$	$K^{(BC0)}$	$K^{(A)}$	$L^{(A)}$	$L^{(BC)}$
$Z_{ab}$	0,104	●0,096	0,602	0,252	1,008
$Z_{bc}$	0,381	0,265	0,262	0,355	0,707
$Z_{ca}$	0,39	0,334	0,219	0,591	0,344
$Z_a$	0,208	0,183	0,466	0,371	0,524
$Z_b$	0,1	0,1	0,39	0,269	$\infty$
$Z_c$	0,97	0,523	0,193	0,501	0,321

В качестве расчетных были приняты следующие параметры: ЭДС генератора и систем  $E_r = E_c = 1$  о.е., сопротивление прямой и обратной последовательности генератора  $x''_d = x_2 = 0,226$  о.е., сопротивление трансформатора  $x_r = 0,1$  о.е., сопротивление прямой и обратной последовательности системы  $x_{1c} = x_{2c} = 0,036$  о.е., сопротивление нулевой последовательности системы  $x_{0c} = 0,071$  о.е. Характеристика срабатывания защиты для упрощения принята круговой с центром в начале координат с уставкой срабатывания, равной  $Z_{cp} = x_r = 0,1$  о.е.

Замер, соответствующий срабатыванию защиты, выделен в таблицах жирным цветом, а излишнее срабатывание защиты, вызванное влиянием системы, помечено символом «•».

Таким образом, анализ показывает, что при принятых параметрах, система не влияет на излишнее срабатывание защиты для трансформаторов с группой 0 (12), 1, 11, а излишнее срабатывание дистанционной защиты генератора, вызванное расхождением ЭДС генератора и системы по фазе на  $80^\circ$ , возможно только при двухфазных КЗ на землю.

Следует отметить, что в статье не был рассмотрен анализ работы дистанционной защиты при сложных видах повреждений, что может явиться объектом дальнейших исследований.

### Выводы:

1. Для правильного замера сопротивления до места КЗ за трансформатором с группой  $Y/\Delta-11$  при двухфазных КЗ и двухфазных КЗ на землю дистанционная защита должна реагировать на отношение фазных величин.

2. Показано, что при КЗ за трансформатором нулевой группы правильный замер обеспечивается при выполнении защиты с контролем междуфаз-



ных величин, что аналогично короткому замыканию без трансформации.

3. Показано, что продольная несимметрия не оказывает влияния на работу защиты.

4. Показано, что расхождение ЭДС генератора и системы по фазе может привести к излишнему срабатыванию дистанционной защиты генератора и при двухфазных КЗ на землю, помимо однофазных КЗ на землю, как это показано в [1].

#### Литература

1. Атабеков Г.И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. Москва, 1957. – 344 с.
2. Руководящие указания по релейной защите. Выпуск 7. Дистанционная защита линий 35-330 кВ. М. - Л.: Энергия, 1966. – 172 с.
3. Циглер. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение. М.: Энергоиздат. 2005. – 322 с.
4. Щедрин В.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Чебоксары, 2007 – 422 с.
5. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. Учебник для вузов. М., Энергия, 1976. – 560 с.
6. Удрис А.П. Векторные диаграммы и их использование при наладке и эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики (часть 1).-М.: НТФ «Энергопрогресс», 2006. – 68 с.

#### Сведения об авторе



##### ***Павлов Александр Витальевич***

*Ведущий инженер отдела разработки станционного оборудования ООО НПП «ЭКРА». Окончил Чувашский государственный университет в 2009 г. по специальности «электроснабжение». В 2010 г. присуждена степень магистра техники и технологии по направлению «электроэнергетика».*

УДК 621.311.011.74-531.9

Шевцов В.М., Харитонов К.В.

## ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОСИСТЕМАХ С СУЩЕСТВЕННО НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

**Аннотация:** выполнен детальный анализ спектров мощности в нелинейных электросистемах. Введены понятия «активная мощность искажений» и «коэффициент искажений». Показано снижение передаваемой активной мощности вследствие наличия отрицательных значений высокочастотных компонентов активной мощности.

**Ключевые слова:** мгновенная активная мощность, гармонические спектры, активная мощность искажений, коэффициент искажений.

Shevcev V.M., Kharitonov K.V.

### FEATURES OF ACTIVE POWER SPECTRUMS IN ELECTRICAL SYSTEMS WITH SIGNIFICANTLY NON-LINEAR ELEMENTS

**Abstract:** the detailed analysis of active power spectrums is made. New terms «active power distortion» and «distortion coefficient» are introduced. Transmitted active power reduction due to presence of negative active power high-frequency components is showed.

**Keywords:** instant active power, harmonic spectrums, active power distortion, distortion coefficient.

Характерной тенденцией электрических режимов распределительных электросетей является неуклонное нарастание уровня высших гармонических составляющих в питающем напряжении. Это обусловлено ростом числа электропотребителей, представляющих эквивалентную нелинейную нагрузку. На промышленных предприятиях к ним относятся мощные выпрямители, тиристорные стабилизаторы, высокочастотные преобразователи электроприводов и сварочное оборудование. В мегаполисах свой вклад в высокочастотный спектр вносит бытовая электроника и электротехника (импульсные стабилизаторы, зарядные устройства, газоразрядные лампы и др.).

Декомпозиция мгновенной мощности на спектральные компоненты позволяет более детально рассмотреть с энергетической точки зрения процесс передачи потока электроэнергии от источника к электропотребителям [1, 2, 4]. Как известно, активная мощность – это усреднённая интегральная оценка интенсивности потока электроэнергии:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt. \quad (1)$$

Выполнив операции разложения в ряд Фурье мгновенных значений тока и напряжения

$$u(t) = \sum_{k=0}^{\infty} U_{km} \sin(k\omega_1 t + \psi_u), \quad i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} I_{km} \sin(k\omega_1 t + \psi_i), \quad (2)$$

а затем перемножив спектры (2) и усреднив на периоде, можно получить:

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} P_k = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad \text{или} \quad P = P_1 + (P_0 + \sum_{k=2}^n P_k). \quad (3)$$

Для наглядности и убедительности анализа особенностей спектральных составляющих (3), полученных рекомендуемым в [1] способом, рассмотрим два конкретных примера упрощенных схем диссипативных электрических систем, первая из которых содержит идеальный диод (ИД) – нелинейный элемент с несимметричной вольтамперной характеристикой (рис.1-3) [3]. В этой схеме активная мощность в нелинейной нагрузке ( $R_2$  – ИД) в соответствии с (1) измеряется ваттметром и равна  $P_W = 2,6$  кВт. Важно также отметить, что на всём протяжении периода мгновенная мощность  $p(t) \geq 0$  (рис. 2, а). Это

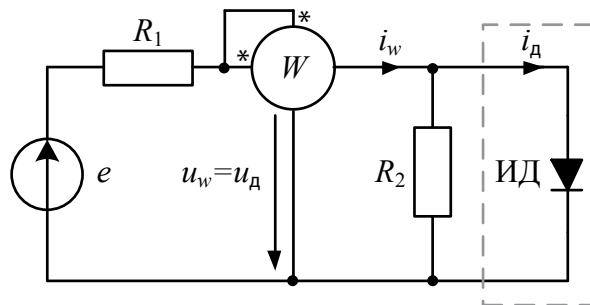


Рис. 1. Простейшая резистивно-диодная схема  
 $E = 230$  В;  $R_1 = 0,48$  Ом;  $R_2 = 9,14$  Ом; ИД – идеальный диод;  $W$  – ваттметр

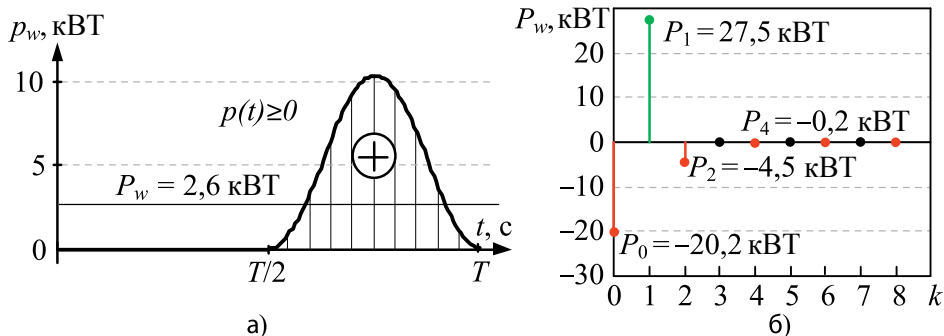


Рис. 2. Мгновенная мощность (а) и спектр активной мощности (б)  $P_W$

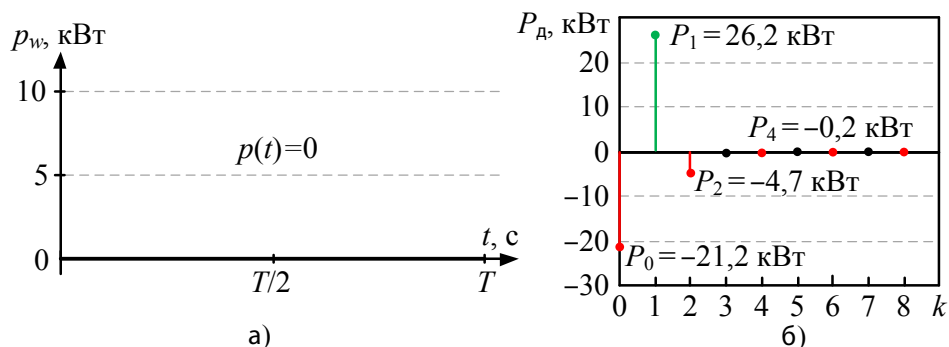


Рис. 3. Мгновенная мощность (а) и спектр активной мощности (б) на идеальном диоде

значит, что поток электроэнергии всегда направлен от источника к нагрузке.

Из анализа спектра активной мощности (рис. 2, б) видно, что только на первой гармонике активная мощность положительна, а все остальные компоненты отрицательны, в том числе и постоянная составляющая  $P_0 < 0$ .

С теоретической точки зрения особый интерес представляет анализ работы ИД как предельной схемной модели существенно нелинейного и несимметричного элемента ( $i_d \geq 0, u_d = 0; i_d = 0, u_d \leq 0$ ). Этот идеальный нелинейный элемент не может считаться ни потребителем, ни источником, так как на всём протяжении времени мгновенная мощность  $p(t) = 0$  (рис. 3, а). Однако обсуждаемая методика спектрального анализа активной мощности даёт полновесную составляющую  $P_1 > 0$  и целый ряд отрицательных компонентов  $P_k < 0$  на чётных гармониках (рис. 3, б), хотя баланс мощностей в среднем выполняется  $P_1 + P_0 + P_2 + P_4 + \dots = 0$ .

Аналогично во второй нелинейной электросистеме (рис. 4) с симметричной нелинейной вольтамперной характеристикой нагрузки дискретный спектр

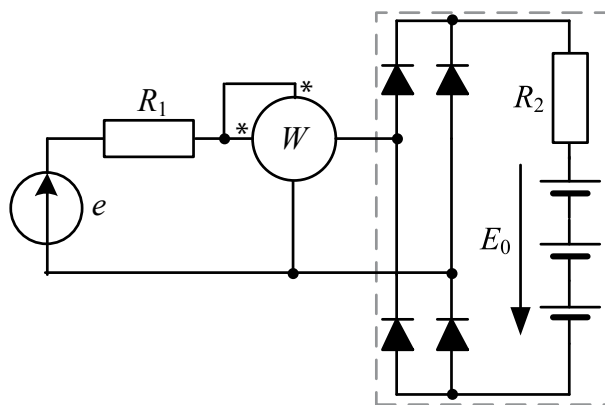


Рис. 4. Схема электросистемы с нелинейной нагрузкой в виде зарядного устройства  
 $E = 230 \text{ В}; E_0 = 280 \text{ В}; R_1 = 0,48 \text{ Ом}; R_2 = 0,105 \text{ Ом}$

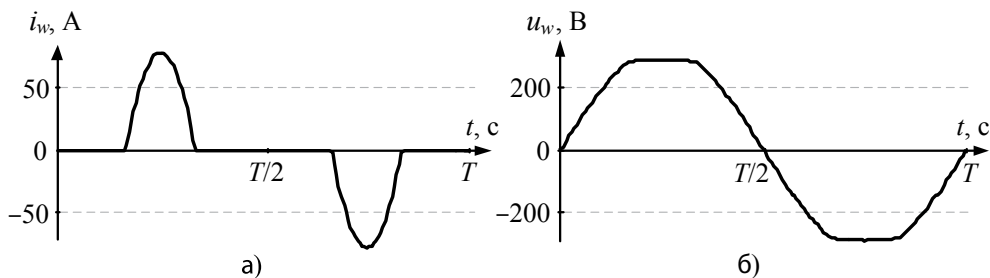


Рис. 5. Мгновенные значения тока (а) и напряжения (б) на входе нелинейной нагрузки

активной мощности на высоких частотах также отрицателен (рис. 6, б).

Следует заметить, что обычно искажается сильнее кривая тока (рис. 5, а), чем напряжения (рис. 5, б). В данной схеме наблюдается прерывистый ток (имеют место бестоковые паузы) и трапецеидальная форма синусоидального напряжения (срезанная вершина). Попутно можно добавить, что заряд аккумулятора импульсами, возможно, будет неблагоприятен для его ресурса.

С методической точки зрения суммарную отрицательную активную мощность можно назвать «*активной мощностью искажения  $P_{и}$* », а отношение абсолютного значения активной мощности искажения к активной мощности первой гармоники – «*коэффициентом искажения активной мощности  $k_{и}$* ». Тогда в первой электросистеме:

$$P_{и} = P_0 + \sum_{k=2}^n P_k = -20,2 + \sum (-4,5 - 0,2 - \dots) = -24,9 \text{ кВт},$$

$$k_{и} = \frac{\left| P_0 + \sum_{k=2}^n P_k \right|}{P_1} = \frac{24,9}{27,5} = 0,91,$$

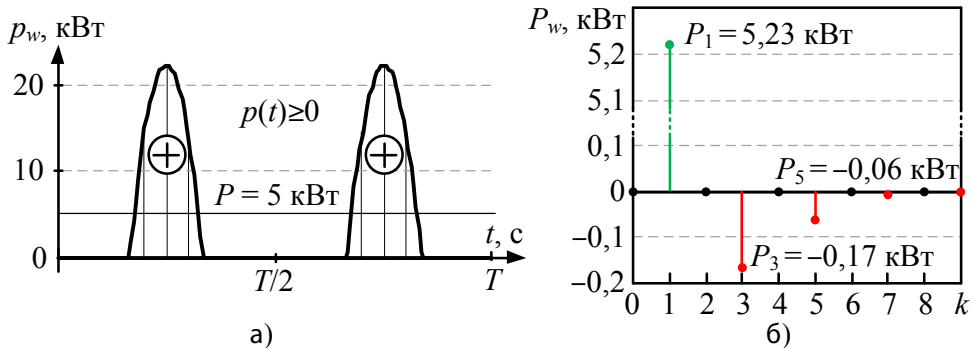


Рис. 6. Мгновенная мощность (а) и спектр активной мощности (б) на входе нелинейной нагрузки

а во второй:

$$P_{\text{н}} = \sum_{k=2}^n P_k = \sum (-0,17 - 0,06 - \dots) = -0,23 \text{ кВт},$$

$$k_{\text{н}} = \frac{\left| \sum_{k=2}^n P_k \right|}{P_1} = \frac{|-0,23|}{5,23} = 0,04.$$

Необходимо также отметить, что мгновенная мощность в данной схеме электросистемы на протяжении всех периодов имеет положительный знак (рис. 6, а), что свидетельствует о направлении потока электроэнергии только от источника в нагрузку. Отрицательное значение «мощности искажения» означает снижение возможности передачи большего значения активной энергии в нагрузку. На основе вышеизложенного представляется введение нового понятия «отражённая мощность» нецелесообразным [1, 2].

### Выводы:

1. В спектре активной мощности в электросистемах с нелинейными элементами составляющие на высших гармониках имеют отрицательные значения, что можно интерпретировать в целом как снижение возможностей передачи активной мощности от источника в нагрузку.

2. Суммарную отрицательную активную мощность на высших гармониках можно назвать активной мощностью искажений, а отношение этой мощности к активной мощности первой гармоники коэффициентом искажений активной мощности. Эти параметры дополнительно характеризуют с энергетической точки зрения степень искажения токов и напряжений.

3. Мгновенные значения активной мощности на периоде основной гармоники напряжения всегда больше или равны 0. В этой связи называть сумму отрицательных значений спектральных составляющих активной мощности термином «отражённая» мощность некорректно и необоснованно. Кроме этого это противоречит физическому содержанию энергетических процессов, так как ни на одном из интервалов времени нет обратного движения потока электроэнергии от потребителей к источнику.

#### Литература

1. Czarnecki L.S. Working, reflected and detrimental active powers // IET on Generation, Transmission and distribution. 2012. Vol. 6. №. 3. – С. 233-239.
2. Czarnecki L.S., Toups N.S. Working and reflected active powers of harmonics generating single loads // Przegląd Elektrotechniczny. 2014. R. 90. №. 11. – С. 7-10.
3. Асанбаев Ю.А. Существует ли в энергосистеме «отражённая» активная энергия? // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2013.– № 2 (69). – С. 44-49.
4. Шевцов В.М., Харитонов К.В. Анализ спектра активной мощности в существенно нелинейной системе // ДНДС: материалы 11-й Всерос. науч.-техн. конф. / ЧГУ, Чебоксары. 2015. – С. 398-400.

#### Сведения об авторах



##### ***Шевцов Виктор Митрофанович***

*Заместитель технического директора по науке — заведующий техническим отделом. Родился в 1939 г. Окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института в 1961 г. Кандидат технических наук, профессор кафедры «ТОЭ и РЗА» ЧГУ, научный руководитель ПНИЛ «Цифровая электротехника», заслуженный изобретатель ЧР. Автор 57 изобретений в области электротехники, противоаварийной автоматики и релейной защиты. Имеет более 100 научных публикаций в области нелинейной электротехники, электроэнергетики и микропроцессорной техники.*



##### ***Харитонов Кирил Владимирович***

*В 2014 г. окончил бакалавриат факультета энергетики и электротехники ЧГУ, тема ВКР: «Проверка защит блочно-го трансформатора на программно-аппаратном комплексе RTDS». Инженер технического отдела. Магистрант ЧГУ.*

## ГЛОССАРИЙ

(избранные основные термины)

**Smart Grid** – «Умные сети». Электрические сети, удовлетворяющие требованиям энергоэффективного и экономического функционирования энергосистемы за счет скоординированного управления и при помощи современных двухсторонних коммуникаций между элементами электрических сетей, электрическими станциями, аккумулирующими источниками и потребителями.

**FACTS** (Flexible Alternating Current Transmission System) – Гибкая система передачи переменного тока.

**WAMS** (Wide Area Measurement System) – Система мониторинга переходных режимов (СМПП).

**WAPS** (Wide Area Protection System) – Распределенные системы защиты и противоаварийной автоматики.

**WACS** (Wide Area Control System) – Система распределенного противоаварийного управления.

**PMU** (Phasor Measurement Unit) – Устройство синхронизированных векторных измерений.

**HVDC** (High-Voltage Direct Current) – Система передачи электроэнергии постоянного тока.

**SVC** (Static Variable Compensator) – Статический тиристорный компенсатор реактивной мощности.

**SCADA** (Supervisory Control and Data Acquisition) – Диспетчерское управление и сбор данных.

**GPS** (Global Positioning System) – Система глобального позиционирования.

**ГЛОНАСС** (GLONASS – Global Navigation Satellite System) – Глобальная навигационная спутниковая система.

**Digital Substation** – Цифровая подстанция (ЦПС). Подстанция, на которой доступ к информации, ее передача и обработка производятся в цифровом виде.



**IEC** (International Electrotechnical Commission) – Международная электротехническая комиссия (МЭК) – международная некоммерческая организация по стандартизации в области электрических, электронных и смежных технологий.

**IED** (Intellectual Electronic Device) – Интеллектуальное электронное устройство ИЭУ. К ним относятся терминалы МПРЗА, контроллеры присоединения и другие многофункциональные микропроцессорные устройства.

**NCIT** (Non-Conventional Instrument Transformer) – Нетрадиционный измерительный трансформатор (электронный или оптический).

**MU** (Merging Unit) – Объединяющее устройство (мультиплексор). Предназначено для сбора, оцифровки и передачи в протоколе МЭК 61850-9-2 данных от нетрадиционных трансформаторов тока и напряжения.

**SAMU** (Stand-Alone Merging Unit) – Измерительное объединяющее устройство (ИОУ) – объединяющее устройство с цифровым интерфейсом в соответствии с IEC 61869-9, но подключаемое к обмоткам 1 А / 5 А / 100 В традиционных измерительных трансформаторов.

**Process Bus** – Технологическая шина (шина процесса). Обеспечивает передачу данных измерений с первичных преобразователей тока и напряжения устройствам нижнего уровня АСУ ТП и интегрированных в АСУ ТП смежных систем ЦПС (устройствам РЗА, ПА, РАС, ОМП, контроля качества электроэнергии и т.п.) по протоколу IEC 61850-9-2.

**Station Bus** – Подстанционная шина. Используется не только для связи «клиент-сервер» между АСУ ТП и ИЭУ, но и для горизонтального обмена информацией между ИЭУ при помощи GOOSE-сообщений, включая высокоприоритетные сигналы релейной защиты.

Подстанционные шины предназначены для информационного обмена средней интенсивности. Технологические шины – это шины высокоскоростного обмена, через которые проходит весь поток первичных цифровых измерений.

**MMS** (Manufacturing Message Specification) – Протокол передачи данных реального времени и команд диспетчерского управления между сетевыми устройствами и/или программными приложениями.

**GOOSE** (Generic Object Oriented Substation Event) – Протокол передачи данных о

событиях на подстанции в объектно-ориентированном виде. Фактически данный протокол служит для замены медных кабельных связей, предназначенных для передачи дискретных сигналов между устройствами.

**SV** (Sampled Values) – Протокол передачи оцифрованных мгновенных значений от измерительных трансформаторов тока и напряжения (ТТ и ТН). Данный протокол позволяет заменить цепи переменного тока, соединяющие устройства РЗА с ТТ и ТН.

**IEC 61850** – Стандарт МЭК 61850. Набор, включающий стандарты: по одноранговой связи и связи «клиент-сервер»; по конструкции и конфигурации подстанций; по методике испытаний; по экологическим требованиям; по проектированию.

Основные свойства данного стандарта:

- отделяет собственно данные (информацию) от методов их передачи;
- определяет точные модели данных и методы работы с ними, обеспечивая их возможное расширение;
- определяет единый язык конфигурирования;
- определяет использование широко распространенных протоколов Ethernet и TCP/IP для связи внутри ПС, одновременно обеспечивая высокую скорость связи (не менее 100 Мбит/с) и открытость будущих концепций связи;
- поддерживает свободное распределение функций и их комбинацию для различных устройств и таким образом позволяет реализовать различные философии систем;
- обеспечивает высокую скорость передачи данных от одного устройства к другому на одном («горизонтальные» связи) и нескольких («вертикальные» связи) иерархических уровнях.

**Micro RTU** (Remote Terminal Unit) – Выносной модуль или устройство связи с объектом (УСО). Предназначен для сбора дискретной информации (положение коммутационных аппаратов, положение ключей режима управления, состояние цепей обогрева проводов и др.) и управления коммутационными аппаратами.

**LAN** (Local Area Network) – Локальная вычислительная сеть (ЛВС) – компьютерная сеть, покрывающая обычно относительно небольшую территорию или небольшую группу зданий (дом, офис, фирму, институт). Наиболее широко применяемой технологией для построения ЛВС является Ethernet.

**Ethernet** (от англ. Ether «эфир») – семейство технологий пакетной передачи данных для компьютерных сетей.

*Составители: Понамарев Е.А., Харитонов К.В., Шевцов В.М.*

## ДЛЯ ЗАМЕТОК

*Научное издание*

**Цифровая электротехника:  
проблемы и достижения**

Сборник научных трудов НПП «ЭКРА»  
Выпуск IV

**Отв. за выпуск: В.М. Шевцов, Н.А. Иванова**

Компьютерная верстка: Т.Б. Романенко

Подписано в печать 29.12.2015.

Формат: 64x94/16. Печать офсетная. Бумага офсетная.

Физ. печ. л. 6,62. Усл. печ. л. 7,37.

Тираж 300 экз.

Заказ 163509.

Отпечатано в ООО «Типография «НН Пресс»,  
428022, РФ, Чувашская Республика, г. Чебоксары,  
пр-д Машиностроителей, д. 1с



ISBN 978-5-9907177-1-8



9 785990 717718

