

Ж.Д. ДАВИДЯН, А.П. МАНУКЯН**РЕГУЛИРУЕМЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ГЛУБОКОГО
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ВВОДА**

Показана высокая технико-экономическая эффективность регулируемых трансформаторов глубокого высоковольтного ввода в распределительных сетях 0,4 кВ. Внедрение систем глубокого высоковольтного ввода предусматривает создание специальных однофазных высоковольтных маломощных трансформаторов для индивидуальных или групповых потребителей. Разработаны способ и устройство для автоматического фазового быстродействующего регулирования действующего значения напряжения на выходе трансформатора, обеспечивающие высокую точность и быстродействие. Способ основан на автоматическом бесконтактном переключении отпаек трансформаторов в пределах полупериода напряжения сети. Показана целесообразность реализации вышеуказанных способа и устройства фазового регулирования в индивидуальных трансформаторах глубокого высоковольтного ввода.

Ключевые слова: глубокий высоковольтный ввод, действующее напряжение, фазовое регулирование, тиристорный коммутатор.

Введение. Суть глубокого высоковольтного ввода в системе электропитания заключается в следующем. Высокое напряжение 6, 10, 35 или 110 кВ посредством отдельной линии электропередачи (ЛЭП) подводится непосредственно к потребителю и используется этим потребителем на данном напряжении, если напряжение потребителя соответствует подведенному напряжению (обычно 6, 10 кВ). Если напряжение потребителя ниже подведенного, то используется дополнительный понижающий трансформатор на напряжение и мощность данного потребителя. Это соответствует определению глубокого ввода, изложенного в Государственном стандарте [1].

Применение глубокого высоковольтного ввода позволяет:

- резко сократить протяженность электрических сетей низковольтным напряжением, а следовательно, уменьшить потери мощности, энергии, напряжения в этих сетях [2];
- значительно уменьшить потери на потребительском напряжении 380/220 В вследствие исключения низковольтной распределительной сети 380/220 В;
- стабилизировать напряжение на шинах потребителей в большей степени, чем при традиционной схеме электропитания, вследствие исключения протяженных низковольтных линий от трансформатора до потребителя;

- исключить промежуточные распределительные подстанции, так как их функции выполняют распределительные устройства вторичного напряжения глубокого ввода;

- осуществить питание характерных групп электроприемников с нелинейными, резкопеременными, ударными нагрузками отдельными линиями непосредственно от подстанций глубокого ввода, что позволяет значительно уменьшить влияние данных нагрузок на систему электроснабжения и повысить качество электрической энергии [3, 4];

- повысить надежность электроснабжения вследствие децентрализации.

ГОСТом на качество электроэнергии [5] установлены допустимые отклонения медленных изменений напряжения в “точке передачи электрической энергии” на уровне $\pm 10\%$ от номинального или некоторого “согласованного” значения напряжения. Такой широкий допуск отклонений напряжения объективно диктуется принятой схемой электроснабжения и практической реальностью. В реальности напряжение на низковольтных шинах потребителей часто отклоняется в еще большей степени, чем это установлено Стандартом. Такие изменения напряжения, даже в допустимых Стандартом пределах $\pm 10\%$, приводят к большим потерям электроэнергии и снижению технических характеристик потребителей [6].

В известных схемах глубокого высоковольтного ввода стабильность напряжения у потребителя повышается за счет исключения падения напряжения в линиях потребительского напряжения от подстанции до потребителя, однако допустимые Стандартом достаточно большие отклонения напряжения ($\pm 10\%$ и более) в “точке передачи электрической энергии” беспрепятственно проходят по линии высоковольтного ввода непосредственно на вход потребителя.

Целью исследования является обоснование целесообразности глубокого высоковольтного ввода на примере группы бытовых потребителей – жилых домов городской или сельской застройки, а также разработка устройства быстродействующего бесконтактного фазового регулирования и стабилизации выходного напряжения трансформаторов глубокого высоковольтного ввода.

1. Обоснование целесообразности глубокого высоковольтного ввода.

Ниже приводится расчет технико-экономического эффекта глубокого высоковольтного ввода на примере электроснабжения группы бытовых потребителей мощностью 250 кВА. Расчет выполняется методом определения и сравнения потерь энергии в традиционной низковольтной схеме электроснабжения (рис.1) и высоковольтной схеме глубокого ввода (рис.2).

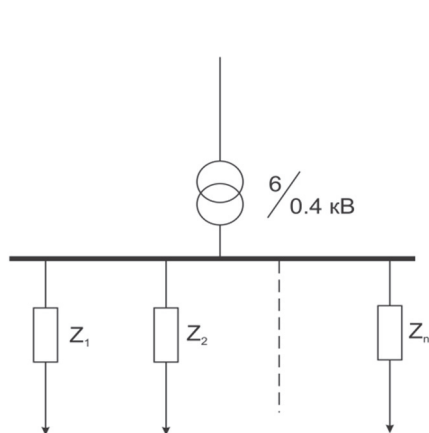


Рис.1. Низковольтная схема электроснабжения

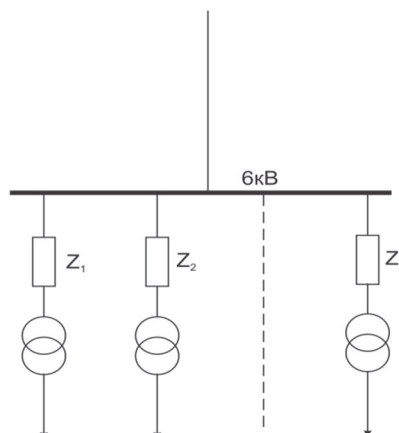


Рис.2. Высоковольтная схема глубокого ввода электроснабжения

В качестве потребителя рассматривается группа жилых домов, соединенных с распределительной подстанцией посредством 10 фидеров по 25 кВА. Каждый фидер питает 10 квартир (домов) с установленной мощностью электропотребителей по 2,5 кВА.

На рис.3 приведены графики нагрузки для наиболее распространенных потребителей электроэнергии [7]: на рис. 3а – суточные графики для зимнего и летнего сезонов, на рис.3б – приведенный годовой график продолжительности нагрузок, построенный на основании суточных графиков нагрузки – зимнего (183 дня) и летнего (182 дня). Данные графиков нагрузки и рассчитанные по ним величины потребляемой мощности и потерь энергии приведены в таблице.

Потери в трансформаторах в низковольтной и высоковольтной схемах (рис.1 и 2) в первом приближении принимаются примерно одинаковыми и в расчете не учитываются, принимая, что суммарные установленные мощности трансформаторов и их КПД практически одинаковы.

А. Низковольтная схема электроснабжения (рис.1)

Электропитание группы выполняется от подстанции, где установлен стандартный трехфазный трансформатор 250 кВА, 6/0,4 кВ. Электроснабжение выполняется десятью однофазными фидерами по 25 кВА на потребительском напряжении 220 В. Пересоединение трехфазного выхода трансформатора на однофазные фидеры выполняется на низковольтных шинах подстанции.

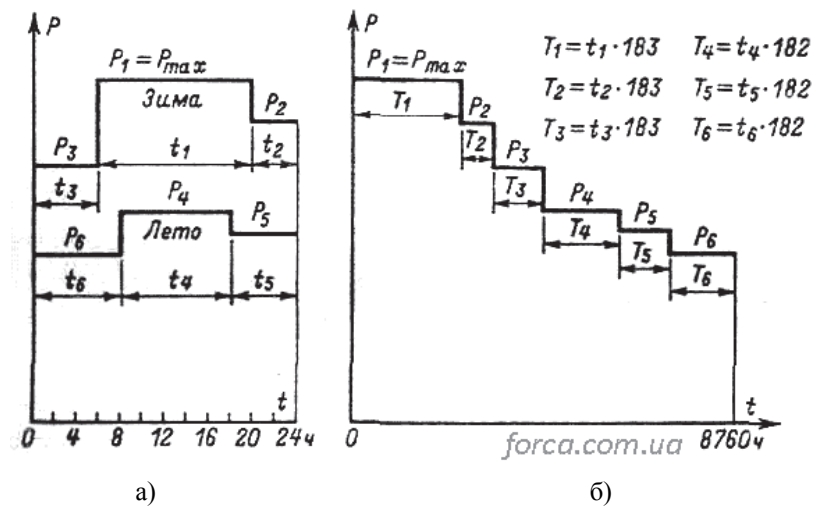


Рис. 3. Графики нагрузки для наиболее распространенных потребителей электроэнергии:

а - суточные графики нагрузки для зимнего и летнего сезонов, б - приведенный годовой график нагрузки

Характеристики фидеров: напряжение - $U = 220 \text{ В}$, мощность номинальная $S_{ном} = 25 \text{ кВА}$, коэффициент мощности - $\cos \varphi = 0.9$, ток номинальный - $I_{ном} = 25000 \text{ ВА} / 220 \text{ В} = 113,6 \text{ А}$, сечение кабеля - $S = 50 \text{ мм}^2$, плотность тока - $\delta = 113,6 \text{ А} / 50 \text{ мм}^2 = 2,27 \text{ А} / \text{мм}^2$ (сечение кабеля выбрано по допустимому нагреву $I_{доп} = 175 \text{ А}$ [8] и допустимой плотности тока $\delta_{доп} = 2,5 \text{ А} / \text{мм}^2$ [9]), сопротивление кабеля - $R_0 = 0,694 \text{ Ом/км}$, средняя длина кабеля от подстанции до потребителя - 60 м .

Активная энергия, потребленная данной группой потребителей за 1 год:

$$W = \sum_{i=1}^6 P_i T_i = \sum_{i=1}^6 10 \cdot S_H \cos \varphi K_p [\% / 100]_i \cdot t_i [\text{час}] \cdot n_i [\text{кВт}], \quad (1)$$

где $S = 25 \text{ кВА}$ - полная потребляемая номинальная мощность фидера; 10 - количество фидеров; $\cos \varphi = 0,9$ - коэффициент мощности нагрузки фидера; $K_p [\% / 100]_i$ - коэффициент потребления мощности на i -ом участке графика нагрузки, в долях единицы (рис.3, табл.); P_i - потребляемая активная мощность на i -ом участке графика нагрузки $[\text{кВт}]$; $T_i = t_i n_i$ - продолжительность i -го участка времени за год $[\text{час}]$; t_i - продолжительность i -го участка времени за сутки $[\text{час}]$; $n_i = T (\text{год}) [\text{час}] / 2 T (\text{сут}) [\text{час}] = 8760 / 2 \cdot 24 = 182,5$ - коэффициент перехода от продолжительности суток к количеству часов за сезон; принимается: для зимнего сезона $n_i (\text{зима}) = 183$, для летнего сезона $n_i (\text{лето}) = 182$.

Результаты расчета по (1) приведены в таблице.

Потери электроэнергии в кабельных линиях за 1 год:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^6 10(I_H \cdot K_{Pi}[\%/100])^2 \cdot 2R_0 \cdot l \cdot t_i [\text{час}] \cdot n_i [\text{кВт} \cdot \text{ч}], \quad (2)$$

где $I_{ном} = 113,6 \text{ А}$ – номинальный ток нагрузки, подключенной к фидеру; $\cos \varphi = 0,9$ – коэффициент мощности нагрузки; $2R_0 = 2 \cdot 0,694 \text{ Ом/км}$ – сопротивление двух жил кабеля; $l = 0,06 \text{ км}$ – длина кабеля от подстанции до потребителя; 10 – количество фидеров.

Результаты расчета по (2) приведены в таблице.

Потери энергии в кабельных линиях за 1 год, выраженные в процентах от потребленной энергии:

$$\Delta W\% = (\Delta W / W_o) 100\% = (52260 / 1\,445\,238) 100\% = 3,65\%. \quad (3)$$

Б. Высоковольтная схема электроснабжения глубокого ввода (рис.2)

Электропитание группы выполняется от подстанции непосредственным бестрансформаторным подключением к подводящей линии 6 кВ . Электроснабжение выполняется десятью однофазными фидерами по 25 кВА на напряжении 6 кВ . Пересоединение подводящей трехфазной линии на однофазные фидеры выполняется на шинах подстанции.

Характеристики фидеров: напряжение - $U = 6 \text{ кВ}$, мощность номинальная - $S_{ном} = 25 \text{ кВА}$, коэффициент мощности - $\cos \varphi = 0,9$, ток номинальный - $I_{ном} = 25000 \text{ ВА} / 6000 \text{ В} = 4,2 \text{ А}$, сечение кабеля (проводов воздушной линии) - $S = 25 \text{ мм}^2$, плотность тока - $\delta = 4,2 \text{ А} / 25 \text{ мм}^2 = 0,17 \text{ А/мм}^2$, сечение кабеля (проводов воздушной линии) выбрано из условия механической прочности (при этом допустимый по условиям нагрева ток $I_{доп} = 115 \text{ А}$ [8] и допустимая плотность тока $\delta_{доп} = 2,5 \text{ А/мм}^2$ [9] обеспечиваются с большим запасом), сопротивление кабеля - $R_0 = 1,298 \text{ Ом/км}$ [9], средняя длина кабеля от подстанции до потребителя – 60 м .

Активная энергия, потребленная данной группой потребителей за 1 год, определяется так же, как и в низковольтной схеме, по (1) и составляет ту же величину $W_o = 1\,445\,238 \text{ кВт.ч}$.

Потери энергии в кабельных линиях за 1 год определяются по тому же выражению (2), как и в низковольтной схеме, при отличающихся номинальном токе $I_{ном} = 4,2 \text{ А}$ и сопротивлении кабеля $R_0 = 1,298 \text{ Ом/км}$ и составляют величину $\Delta W = 71,39 \text{ кВт.ч}$.

Потери энергии в кабельных линиях за 1 год, выраженные в процентах от потребленной энергии:

$$\Delta W\% = (\Delta W / W_o) 100\% = (71,39 / 1\,445\,238) 100\% = 0,0049\%. \quad (4)$$

Таблица

Результаты расчета потерь электроэнергии в низковольтной и высоковольтной схемах электроснабжения

Сезон		Зима			Лето		
Нагрузка	P_i	$P1$	$P2$	$P3$	$P4$	$P5$	$P6$
	$k_{pi}, \%$	100	87,4	74,7	60,9	54	48,3
	t_i	$t1$	$t2$	$t3$	$t4$	$t5$	$t6$
Продолжительность за сутки,	час	14	4	6	10	6	8
Продолжительность за год, T_i	час	2562	732	1098	1820	1092	1456
Потребление на ступени, W_i	кВт.ч	576450	143948	184546	249385	132678	158231
Потребление за год, W_σ	кВт.ч	1 445 238					
Потери электроэнергии							
Низковольтная схема	ΔW_i	кВт.ч	27534	6010	4390	7254	3422
	за год ΔW_σ	52 260 кВт.ч					
		3,65 %					
Высоковольтная схема глубокого ввода	ΔW_i	кВт.ч	37,6	8,21	6,0	9,91	4,68
	за год ΔW_σ	71,39 кВт.ч					
		0,0049 %					

По результатам расчета можно сделать следующие выводы.

1. Учитывая, что общие потери энергии в сетях, включая потери в высоковольтных ЛЭП, составляют порядка 11...13% от потребляемой энергии, потери в кабельной сети низковольтной схемы электроснабжения составляют весьма большую величину – 4,78% от потребляемой энергии, т.е. более трети потерь во всей сети приходится на низковольтную распределительную сеть.

2. Высоковольтная схема электроснабжения глубокого ввода обеспечивает резкое уменьшение потерь в распределительной сети – до 0,012% против 4,78% от потребляемой энергии, практически сводя эти потери к нулю. Это, естественно, приводит к уменьшению общих потерь в сетях на указанную величину.

3. Указанный расчет подтверждает высокую экономическую эффективность использования глубокого высоковольтного ввода в распределительных сетях электроснабжения.

Глубокий высоковольтный ввод может быть реализован в системах электроснабжения как мощных производственных потребителей, так и мало-мощных бытовых потребителей – жилых зданий и отдельных домов в городской и сельской местности. Однако в его реализации имеются следующие принципиальные отличия.

Глубокий высоковольтный ввод для мощных производственных потребителей характеризуется высокой концентрацией потребления электроэнергии – как по мощности, так и по территориальному размещению. В большинстве случаев электроэнергия потребляется непосредственно на напряжениях 6, 10 кВ.

В случаях, когда потребители низковольтные $380/220\text{ В}$, на входе потребителей используются распространенные понижающие трехфазные трансформаторы $6, 10 / 0,4\text{ кВ}$ стандартных мощностей $100, 250, 400\text{ кВА}$ и др. Реализация глубокого высоковольтного ввода в указанных случаях не представляет принципиальных сложностей. В связи с этим глубокий высоковольтный ввод для мощных производственных потребителей достаточно широко распространен.

Глубокий высоковольтный ввод для маломощных бытовых потребителей принципиально отличается от мощных потребителей по следующим обстоятельствам. Установленная мощность бытовых потребителей (подъезд жилого дома городской застройки, отдельный дом в сельской местности) относительно невелика – порядка нескольких киловатт или нескольких десятков киловатт. Однако суммарная установленная мощность этих потребителей в объеме электроснабжения городов и поселков может быть весьма велика – несоизмеримо больше, чем производственных потребителей. Потребление электроэнергии бытовыми потребителями выполняется на низком напряжении $380/220\text{ В}$. Эти потребители децентрализованы. В этих условиях для каждого укрупненного потребителя (подъезд жилого дома, отдельный дом в сельской местности) должен быть выполнен отдельный однофазный высоковольтный ввод малой мощности (не более нескольких кВт или десятков кВт) с трансформацией напряжения $6, 10 / 0,4\text{ кВ}$ на шинах потребителя.

Эти специфические условия бытовых потребителей требуют для реализации глубоких высоковольтных вводов в масштабах распределительных сетей большое количество трансформаторов (по числу укрупненных потребителей) со специфическими техническими характеристиками, а именно: маломощные (не более $10 \dots 20\text{ кВт}$), высоковольтные ($6, 10 / 0,4\text{ кВ}$), однофазные, желательно в сухом, безмасленном исполнении.

Глубокий высоковольтный ввод для бытовых потребителей в странах постсоветского пространства практически не используется. Косвенной причиной этого является отсутствие массового производства маломощных высоковольтных трансформаторов с указанными техническими характеристиками.

Недополученный экономический эффект весьма велик, учитывая массовость бытовых потребителей.

В дополнение к изложенному весьма важным обстоятельством является то, что использование отдельного трансформатора для каждого укрупненного потребителя в системах глубокого высоковольтного ввода дает возможность независимой стабилизации напряжения на шинах каждого потребителя. Но для получения высокого качества и автоматического регулирования напряже-

ния необходимо создание специальных регулирующих устройств у трансформаторов. Эта задача также не решена в существующих трансформаторах.

2. Разработка устройства автоматического быстродействующего бесконтактного фазового регулирования и стабилизации выходного напряжения трансформаторов глубокого высоковольтного ввода. Способ “бесконтактного фазового регулирования” напряжения трансформаторов разработан по специальному алгоритму при одной отпайке обмотки трансформатора с использованием силовых коммутационных тиристоров [10].

Для реализации способа “бесконтактного фазового регулирования” разработан тиристорный регулятор напряжения трансформатора. При соединении этого регулятора с существующими или вновь разработанными трансформаторами глубоко высоковольтного ввода обеспечиваются стабилизация и регулирование напряжения на вторичной стороне трансформатора на заданном уровне с высокой точностью и быстродействием при изменениях напряжения на первичной стороне и нагрузки трансформатора. При этом недостатки, присущие существующим способам и устройствам регулирования напряжения трансформаторов, исключаются посредством механического переключения отпайки, тем самым обеспечивая значительные преимущества и высокие технико-экономические характеристики, а именно:

- высокая точность стабилизации напряжения на выходе трансформатора;
- автоматическое регулирование и высокое быстродействие;
- простота конструкции по сравнению с существующими механическими переключателями отпайки;
- использование одной отпайки трансформатора.

Работа трансформатора с разработанным регулятором описывается ниже на примере однофазного трансформатора с отпайкой на стороне низкого напряжения. Данный способ регулирования применим также для трехфазных трансформаторов, либо при выполнении отпайки на стороне высокого напряжения (на входе со стороны питающей сети).

Схема трансформатора с тиристорным регулятором напряжения приведена на рис.4.

Первичная обмотка трансформатора подключена непосредственно к высоковольтной сети. На вторичной обмотке трансформатора используется одна отпайка. Напряжение между концом обмотки и отпайкой принимается равным максимально возможному отклонению напряжения, которое подлежит компенсации с целью поддержания на выходе трансформатора номинального напряжения. Конец вторичной обмотки 1 и отпайка 2 присоединены к нагрузке 3 через тиристорные коммутаторы 4, 5, представляющие собой

встречно-параллельно соединенные тиристоры. Тиристорные коммутаторы управляются системой управления 6, вход которой соединен с нагрузкой, а выходы 7 и 8 - с управляющими входами тиристорных коммутаторов отпайки и конца обмотки. В зависимости от состояния коммутаторов к нагрузке может быть подключено либо напряжение всей обмотки, либо напряжение отпайки.

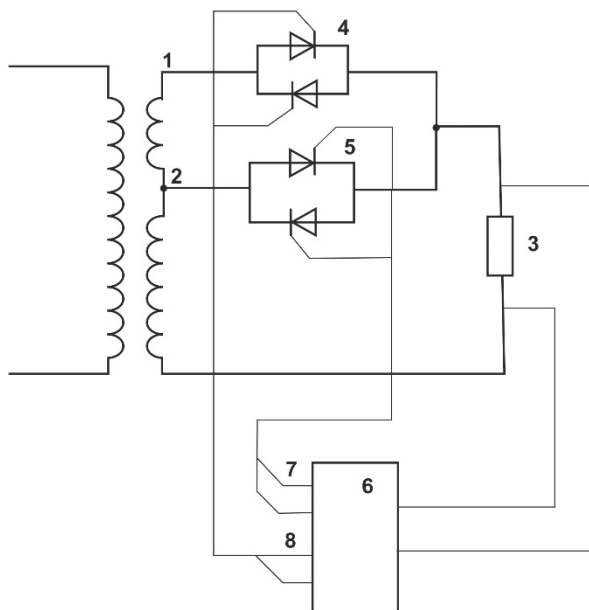


Рис. 4. Схема трансформатора с регулятором напряжения

На каждом полупериоде напряжения в определенные моменты времени на нагрузку подается напряжение конца обмотки или отпайки в зависимости от состояния их тиристорных коммутаторов. Фаза переключения коммутаторов автоматически регулируется в пределах каждого полупериода напряжения сети таким образом, что действующее значение результирующего напряжения на выходе трансформатора поддерживается равным номинальному или заданному напряжению при изменении напряжения сети на входе трансформатора или изменениях тока нагрузки.

Угол управления α регулируется автоматически посредством системы управления (рис. 4).

Величина и вид напряжения на нагрузке (рис.5) зависят от состояния тиристорных коммутаторов:

- при включенном состоянии коммутатора 4 на конце обмотки и отключенном состоянии коммутатора 5 отпайки напряжение на нагрузке максимально и имеет вид UI ;

- при включенном состоянии коммутатора 5 на отпайке обмотки и отключенном состоянии коммутатора 4 конца обмотки напряжение на нагрузке минимально и имеет вид U_2 .

В разработанном устройстве на нагрузку подается напряжение, регулируемое в пределах каждого полупериода, в зависимости от фазы переключения тиристорных коммутаторов, по сигналу системы управления следующим образом.

Если принять фазу переключения коммутаторов (угол управления) равной α (рис.5), то:

- на фазовых интервалах от 0 до α и от π до $(\pi + \alpha)$ (соответственно на интервалах времени от 0 до t_1 и от t_2 до t_3) включен тиристорный коммутатор 5 на отпайке обмотки и отключен тиристорный коммутатор 4 на конце обмотки; на этих интервалах мгновенные значения напряжения на нагрузке следуют по синусоидальной кривой минимального напряжения U_2 ;

- на фазовых интервалах от α до π и от $(\pi + \alpha)$ до 2π (соответственно на интервалах времени от t_1 до t_2 и от t_3 до t_4) включен тиристорный коммутатор 4 на конце обмотки и отключен тиристорный коммутатор 5 на отпайке; на этих интервалах мгновенные значения напряжения на нагрузке следуют по синусоидальной кривой максимального напряжения U_1 .

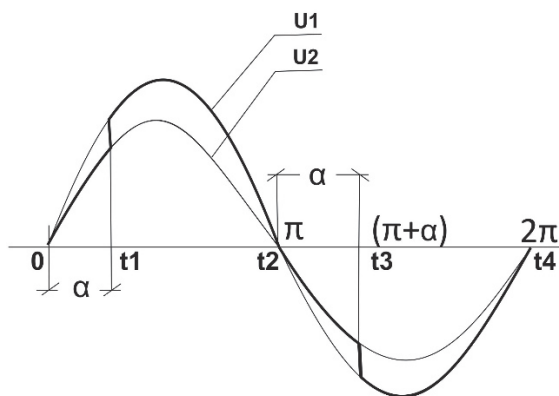


Рис. 5. Напряжения на нагрузке в зависимости от состояния тиристорных коммутаторов

При фазах переключения α (в момент времени t_1) и $(\pi + \alpha)$ (в момент времени t_3) происходит переход напряжения с синусоидальной кривой минимального напряжения U_2 на кривую максимального напряжения U_1 . Функция напряжения на выходе трансформатора (на нагрузке) при указанном регулировании в соответствии с рис. 5 выражается следующим образом:

$$u = U_2 \sin \omega t | \quad + U_1 \sin \omega t | \quad (5)$$

$$0 < \omega t < \alpha \quad \alpha < \omega t < \pi$$

Действующее значение напряжения на выходе трансформатора (на нагрузке) определяется выражением

$$U = \sqrt{1/\pi \int_0^\pi U^2 d(\omega t)} = \sqrt{\int_0^\pi [U_2 \sin \omega t / (0 < \omega t < \alpha) + U_1 \sin \omega t / (\alpha < \omega t < \pi)]^2 d(\omega t)}, \quad (6)$$

которое после интегрирования принимает вид

$$U = \sqrt{(U_2^2/4\pi) \cdot (\alpha - 0,5 \sin 2\alpha) + (U_1^2/4\pi) \cdot (\pi - \alpha + 0,5 \sin 2\alpha)}. \quad (7)$$

Предельные отклонения входного напряжения, при которых возможна стабилизация выходного напряжения на уровне номинального напряжения $U = U_{ном}$, определяются уровнями напряжения вторичной обмотки и ее отпайки U_1 и U_2 (7) (рис.5), что является ресурсом регулирования $\Delta U = U_1 - U_2$, заложенным в трансформатор.

При минимальном напряжении на входе на выход подается полное приведенное напряжение вторичной обмотки $U_1 = (1 + k_{max}) U_{ном}$, при максимальном напряжении на входе на выход – напряжение отпайки вторичной обмотки $U_2 = (1 - k_{max}) U_{ном}$, где k_{max} – предельное отклонение входного напряжения, выраженное в долях единицы. Так, при допустимых Стандартом отклонениях входного напряжения $\pm 10\% U_{ном}$ величина полного напряжения вторичной обмотки - $U_1 = 1,1 U_{ном}$, величина напряжения отпайки $-U_2 = 0,9 U_{ном}$. В выражениях (6) и (7) напряжения полной вторичной обмотки и ее отпайки выражены их амплитудными значениями.

Действующее напряжение на выходе трансформатора (на нагрузке) U при заданном напряжении на входе однозначно определяется величиной угла управления α . Следовательно, при плавном изменении угла управления α в пределах от 0 до π (на положительном полупериоде напряжения) и от π до 2π (на отрицательном полупериоде напряжения) действующее напряжение на выходе трансформатора (на нагрузке) может плавно регулироваться от величины U_2 до величины U_1 . При этом могут быть обеспечены следующие режимы регулирования:

Режим 1: стабилизация выходного напряжения трансформатора на заданном уровне при изменении напряжения на входе в пределах от U_2 до U_1 , или

Режим 2: регулирование выходного напряжения трансформатора в пределах от U_2 до U_1 при неизменном номинальном напряжении на входе.

Таким образом, система “трансформатор – тиристорные коммутаторы – система управления” (рис.4), управляемая по изложенному алгоритму, представляет собой трансформатор с регулируемым коэффициентом трансформации и названа нами “регулируемый трансформатор”.

Зависимость угла управления α от регулируемого параметра представляет собой регулировочную характеристику системы.

В режиме 1 регулировочная характеристика есть функция

$$\alpha = f(U_{\text{вх}}) \text{ при } U_{\text{вых}} = U_{\text{ном}} = \text{const};$$

в режиме 2 регулировочная характеристика есть функция

$$\alpha = f(U_{\text{вых}}) \text{ при } U_{\text{вх}} = U_{\text{ном}} = \text{const},$$

где $U_{\text{вх}}$ – напряжение на входе первичной обмотки трансформатора; $U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе трансформатора (на нагрузке).

По регулировочным возможностям и ресурсу регулирования регулировочные характеристики в режимах 1 и 2 идентичны. Регулировочная характеристика определяется в режиме 2 решением уравнения (7) в виде $\alpha = f(U)$.

Регулировочная характеристика для режима стабилизации напряжения, т.е. функция необходимой величины угла управления α , которая обеспечивает стабильное напряжение на выходе трансформатора (на нагрузке) при данных отклонениях напряжения на входе трансформатора, приведена в обращенном виде на рис.6.

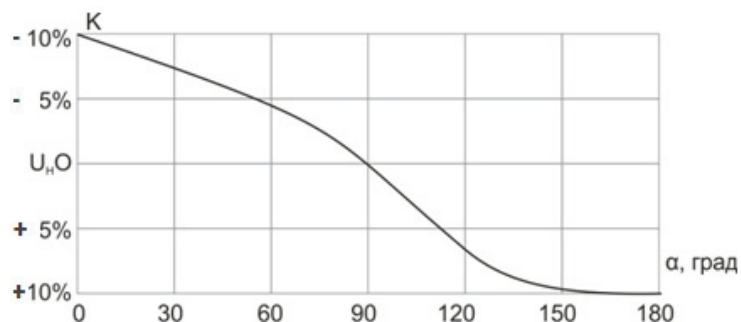


Рис.6. Регулировочная характеристика трансформатора при фазовом управлении

Разработан и изготовлен опытно-экспериментальный образец регулируемого трансформатора в составе: трансформатор – тиристорный коммутатор – система управления по схеме рис.4. Параметры образца: мощность - 2 кВА,

однофазный, номинальное выходное напряжение - $U_{ном} = 220 \text{ В}$, пределы отклонения напряжения на входе, при которых должна обеспечиваться наибольшая стабильность выходного напряжения, $\pm 10\% U_{номвх}$ – в соответствии с ГОСТом [5]. Опытно-экспериментальный образец моделирует регулируемый трансформатор глубокого высоковольтного ввода с тем лишь отличием, что входная обмотка выполнена на напряжение 220 В , а не высоковольтной. Это сделано с целью возможности проведения испытаний в условиях низковольтной лаборатории. Величина номинала первичной обмотки для определения регулировочной способности трансформатора не имеет принципиального значения. Проведены испытания опытно-экспериментального образца трансформатора.

На рис.7 приведены осциллограммы формы кривой выходного напряжения при различных отклонениях входного напряжения при номинальной нагрузке трансформатора.

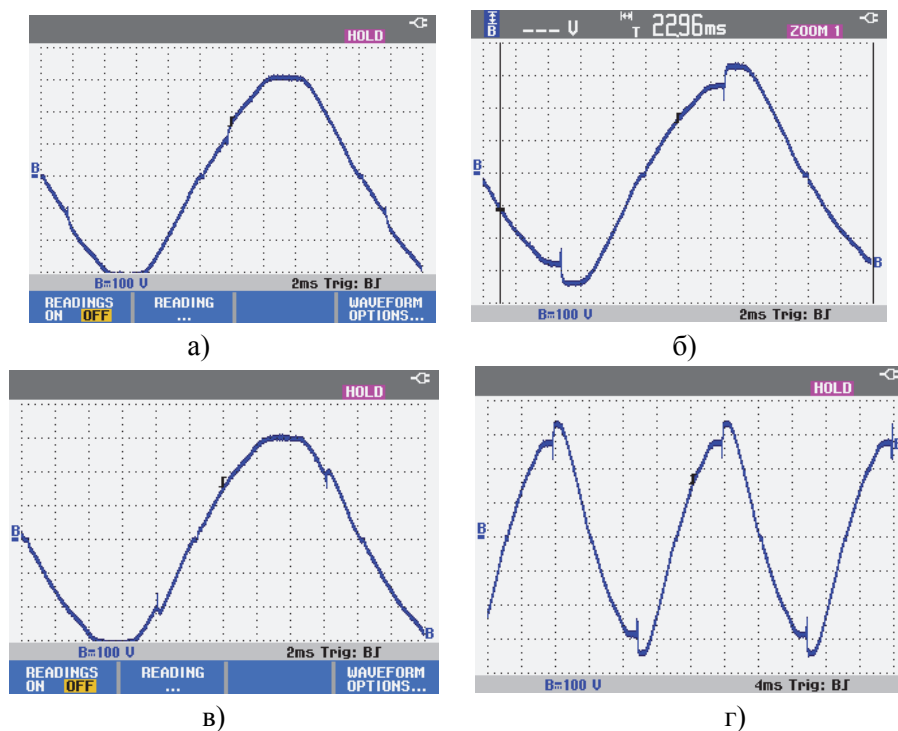


Рис.7. Осциллограммы формы кривой выходного напряжения трансформатора:

- а) $U_{вх} = 198 \text{ В}$ ($U_{ном} - 10\%$), $\alpha = 28,8^\circ$, $U_{вых} = 218,5 \text{ В}$;
- б) $U_{вх} = 220 \text{ В}$ ($U_{ном}$), $\alpha = 86,4^\circ$, $U_{вых} = 220 \text{ В}$;
- в) $U_{вх} = 242 \text{ В}$ ($U_{ном} + 10\%$), $\alpha = 144^\circ$, $U_{вых} = 219,5 \text{ В}$;
- г) $U_{вх} = 220 \text{ В}$ ($U_{ном}$), $\alpha = 105^\circ$, масштаб по оси абсцисс сжат.

Примечание. Регулятор напряжения настроен с некоторым запасом относительно расчетной регулировочной характеристики.

Приведенные осциллограммы подтверждают протекание процесса регулирования в соответствии с изложенным алгоритмом.

При изменении входного напряжения в пределах от 198 В ($U_{ном} - 10\%$) до 242 В ($U_{ном} + 10\%$) и нагрузки от холостого хода до номинальной действующее значение выходного напряжения автоматически поддерживается в пределах 218,5...220 В (рис. 7а, б, в), что соответствует точности стабилизации напряжения $\pm 0,46\%$ от номинального значения. Это весьма высокая точность, значительно превосходящая точность стабилизации напряжения трансформаторов с автоматическим переключением отпаяк, которая составляет величину порядка 2,5...5%, и автономных дизель-генераторов, точность стабилизации напряжения которых составляет величину порядка 2%.

Обеспечивается высокое быстродействие регулирования напряжения – в пределах одного полупериода напряжения сети. Во всех указанных пределах изменения входного напряжения и нагрузки коэффициент искажения синусоидальности кривой выходного напряжения не превосходит установленную Стандартом величину 8% [5].

Предлагаемый способ регулирования может быть реализован как на существующих, так и на вновь проектируемых трансформаторах. Способ регулирования наиболее эффективен на высоковольтных трансформаторах глубокого ввода, когда трансформатор устанавливается в максимальном приближении к нагрузке, вследствие чего обеспечиваются высокая стабилизация и регулируемость напряжения непосредственно на нагрузке.

Выводы

1. Существующая централизованная схема распределения электроэнергии в распределительных сетях 0,4 кВ во многих случаях не в состоянии обеспечить на шинах потребителей отклонение напряжения в пределах $\pm 10\%$ от номинального, предусмотренного Стандартом, вследствие использования автоматически нерегулируемых трансформаторов, разноудаленности отдельных потребителей от трансформаторной подстанции, резкопеременных графиков нагрузки и пр., а также имеет высокий уровень потерь энергии в низковольтной сети.

2. Применение глубокого высоковольтного ввода, т.е. подведение высокого напряжения 6, 10 кВ непосредственно к потребителю, обеспечивает:

- резкое уменьшение потерь в распределительной сети – до 0,012% против 4,78% от потребляемой мощности;
- возможность индивидуальной стабилизации напряжения у каждого потребителя.

3. Разработаны способ и устройство автоматического быстродействующего фазового регулирования действующего напряжения на выходе трансформатора, обеспечивающие точность стабилизации порядка $\pm 0,5\%$ от номинального значения.

4. Для широкого внедрения систем глубокого высоковольтного ввода необходима разработка специальных однофазных высоковольтных (6, 10 или 35 кВ / 220 В) маломощных (2...20 кВА) трансформаторов для индивидуальных или групповых потребителей. В указанных трансформаторах целесообразна реализация вышеуказанного способа и устройства фазового регулирования действующего напряжения.

Литература

1. **ГОСТ 24291-90.** Электрическая часть электростанции и электрической сети. Термины и определения.
2. **Подстанции глубокого ввода.** <http://forca.ru/spravka/spravka/podstancii-glubokogo-vvoda.html>
3. **Шарманова Г.Ю., Гончар Л.А.** Использование глубокого ввода в городских электрических сетях// Инновации в технологиях и образовании: Сборник статей VII Международной научно-практической конференции. - Белово, Великотырново, 2014. - Ч.1. - С. 230-233.
4. **Схемы глубоких вводов 110—220 кВ.** Электроснабжение промышленных предприятий. <http://forca.ru/knigi/arhiv/elektrosnabzhenie-promyshlennyh-predpriyatiy-5.html>
5. **Межгосударственный Стандарт ГОСТ 32144-2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. [www.GOST.523144-2013\(2\)](http://www.GOST.523144-2013(2)).
6. **Манукян А.П.** Влияние отклонения напряжения на шинах 0,4 кВ распределительных сетей на работу потребителей //Вестник ИАА.- 2017. - Том 14, N 2. - С. 234-237.
7. **Графики электрических нагрузок.** <http://forca.com.ua/knigi/navchannya/grafiki-elektricheskikh-nagruzok.html>
8. **Выбор сечения провода.** <http://www.malahit-irk.ru/index.php/2011-01-13-09-04-43/156-2011-05-18-15-34-49.html>
9. **Межгосударственный Стандарт ГОСТ Р МЭК 60287-3-2-2011.** Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. gost-r-mek-60287-3-2-2011.
10. **Պալիդիան Ժ.Դ.** Տրանսֆորմատորի լարման կարգավորման եղանակ: N 3161A ՀՀ գյուղի արտոնագիր: Գյուղի առաջնությունը 11.07.2016: Գրանցված է պետական գրանցատվանում 01.02.2018:

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 12.09.2018.

Ժ.Դ. ԴԱՎԻԴՅԱՆ, Ա.Պ. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ

**ԲԱՐՁՐԱՎՈԼՏ ԽՈՐ ՄՈՒՏՔՈՎ ԼԱՐՄԱՆ ԿԱՐԳԱՎՈՐՄԱՍԲ
ՏՐԱՆՍՖՈՐՄԱՏՈՐՆԵՐ**

Ցուցադրված է 0,4 կՎ բաշխիչ ցանցերում խոր մուտքով բարձր լարման տեխնիկական և տնտեսական բարձր արդյունավետությունը: Բարձր լարման խոր մուտք ունեցող համակարգերի ներմուծումը նախատեսում է հատուկ միաֆազ բարձր լարման ցածր հզորությամբ տրանսֆորմատորների ստեղծում անհատական կամ խմբային սպառողների համար: Մշակված են տրանսֆորմատորի ելքում գործող լարման ավտոմատ փուլային արագագործ կարգավորման մեթոդ և սարք, որոնք ապահովում են բարձր ճշգրտություն և արագագործություն: Մեթոդը հիմնված է ցանցի լարման կիսապարբերության սահմաններում տրանսֆորմատորային ոլորունի ավտոմատ, առանց հպման փոխանջատման վրա: Նպատակահարմար է վերը նշված մեթոդի և փուլային կարգավորման սարքի իրականացումը խոր բարձր լարման մուտքով անհատական տրանսֆորմատորներում:

Առանցքային բառեր. խոր բարձր լարման ներմուծում, գործող լարում, փուլային կարգավորում, տիրիստորային անջատիչ:

J.D. DAVIDYAN, A.P. MANUKYAN

REGULATED TRANSFORMERS OF A DEEP HIGH VOLTAGE INPUT

High technical and economic efficiency of regulated transformers of deep high-voltage inputs is demonstrated in 0.4 kV distribution networks. The introduction of deep high-voltage input envisages creation of a special single-phase, high-voltage and low-power transformers for individual or group consumers. A method and a device for automatic and high-speed phase controlling of the transformer output voltage, providing high precision and speed are developed. The method is based on the automatic non-contact switching of transformer taps within the half-period of the mains voltage. The expedience of realization of the above-mentioned method and the device of phase regulation in individual transformers of deep high-voltage input are shown.

Keywords: deep high-voltage input, operating voltage, phase adjustment, thyristor switch.