



Кузнецов В. В.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫБОРА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕКАЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Статья посвящена проблемам принятия решения о выборе устройств обеспечения защиты асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии. Рассмотрена комплексная модель асинхронного двигателя, позволяющая оценивать энергетические показатели, а также тепловое состояние на основе вероятностных характеристик показателей качества электроэнергии, позволяющая обосновать экономическую целесообразность использования предложенных мероприятий.

Ключевые слова: электросети промышленных предприятий, некачественная электроэнергия, асинхронный двигатель, показатели качества электроэнергии.

1. Введение

Отрицательное влияние некачественной электроэнергии на эксплуатационные показатели электроустановок хорошо изучено [1–3]. Так известно, что при наличии искажений питающего напряжения особое внимание следует уделять системам электроприводов, поскольку это приводит к снижению их надежности и эффективности и, как следствие, к существенному снижению технико-экономических показателей многих производств. При снижении качества электроэнергии происходит увеличение потерь мощности в асинхронных двигателях (АД), что обуславливает их повышенный нагрев. А это, в свою очередь, способствует интенсивному старению изоляции и, в конечном итоге, ее пробоем.

К сожалению, опубликованные результаты исследований не содержат экономической оценки получаемых при этом потерь. Рассмотренное в них влияние некачественной электроэнергии на работу двигателя не затрагивают главного — финансового аспекта проблемы. Вопросы стоимостного характера до настоящего времени практически не изучены и, как следствие, нет возможности произвести сравнительную оценку экономических потерь, связанных с некачественной электроэнергией, и необходимых для обеспечения этого качества затрат.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Как известно, наличие некачественной электроэнергии в цеховых сетях предприятий является причиной значительного экономического ущерба, который возникает при изготовлении продукции. Затраты на электроэнергию является главной составляющей денежных средств, необходимых на эксплуатацию электрооборудования. По различным оценкам, данная величина составляет 77–82 % [1, 2]. Поэтому даже незначительное увеличение потерь электроэнергии, связанных со снижением ее качества приводит к значительному увеличению годовых затрат на содержание систем электроприводов. Таким образом, промыш-

ленным комбинатам необходимо предпринимать мероприятия по предупреждению убытков, обусловленных низким качеством электроэнергии в их сетях.

Поэтому, внедрение соответствующих технических устройств должно быть экономически обосновано, учитывать технологический цикл производства и задействованного оборудования в технологическом процессе. В настоящее время не существует универсальной методики экономического обоснования мероприятий по ликвидации отрицательных последствий эксплуатации электромеханических преобразователей, работающих в условиях некачественной электроэнергии [3]. Это связано с невозможностью точного прогноза ущерба, причиненного некачественной электроэнергией.

Вопросам определения экономического ущерба связанного с работой электромеханических преобразователей в условиях некачественной электроэнергии посвящены работы как отечественных [3–5], так и зарубежных авторов [6, 7]. Однако подходы к оценке ущерба достаточно противоречивы.

Как известно [8], использование общепринятых формул определения ущерба, причиненного несимметрией и несинусоидальностью напряжения питания электротехнических устройств, дает, как правило, его приемлемую оценку, только в случае, когда показатели качества электроэнергии (ПКЭ) несущественно превышают допустимые значения. При этом, задача усложняется необходимостью учета изменения всех параметров электро-механической системы, вызванных применением того или иного технического устройства защиты.

Исходя из вышесказанного следует, что возникла необходимость в разработке нового универсального инструментария, позволяющего персоналу предприятий в кратчайшие временные сроки производить оценку экономических показателей асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии и осуществлять выбор приемлемых средств их защиты с учетом вероятностных характеристик ПКЭ в цеховой сети и специфики технического и технологического оборудования.

3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — электромагнитные и тепловые процессы в асинхронном электродвигателе, работающего в сети с некачественной электроэнергией.

Целью исследования является разработка универсального инструментария выбора эффективных и экономически целесообразных средств повышения энергоэффективности АД, работающих в конкретных цеховых сетях с некачественной электроэнергией.

Основной задачей данного исследования является синтез алгоритма выбора и обоснования наиболее эффективного метода фильтрации питающего напряжения в цеховых сетях.

4. Синтез алгоритма выбора экономически целесообразных средств повышения энергоэффективности асинхронного двигателя, работающего в условиях электроэнергии низкого качества

На сегодняшний день синтезированы и экспериментально проверены все составляющие комплексного технико-экономического аналога электропривода, работающего в условиях некачественной электроэнергии [9–12]. Укрупненная структура такого аналога представлена на рис. 1. Он состоит из следующих блоков:

- имитация ПКЭ в цеховой сети;
- модель АД, позволяющая определять его механические и энергетические показатели в условиях электроэнергии низкого качества [9–11];
- тепловая модель АД, учитывающая нестационарность ПКЭ [12];
- модель ущерба, связанного с эксплуатацией АД в указанных условиях;
- блок оценки эффективности использования технических устройств (активных и пассивных фильтров, фильтро-компенсирующих устройств и т. п.).

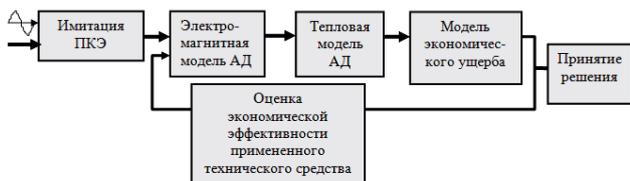


Рис. 1. Комплексный технико-экономический аналог АД

Данный комплексный аналог позволяет осуществить прогноз экономических показателей эксплуатации электромеханического преобразователя с учетом предложенных устройств защиты. Сравнение полученных результатов предоставляет информационные данные для корректного выбора экономически целесообразных мероприятий по ликвидации с отрицательными последствиями эксплуатации АД в условиях электроэнергии низкого качества. Алгоритм представленного выбора соответствует последовательности расчетов, приведенных в табл. 1. Применяемые обозначения в табл. 1 соответствуют принятым в выше упомянутых работах.

Таблица 1

Последовательность расчетов в алгоритме выбора устройств защиты асинхронных двигателей, работающих в условиях электроэнергии низкого качества

№ этапа	Вычислительный субблок	Выходные параметры		
		Обозначение	Расчетная формула	Описание
1	Имитация ПКЭ	k_U	$K_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2} \cdot \frac{100}{U_{ном}}$	коэффициент искажения синусоидальности
		$k_{U(n)}$	$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} \cdot 100$	коэффициент отдельных гармонических составляющих
		ϵ_2	$\epsilon_2 = \frac{A_2}{A_1}$	коэффициент обратной последовательности
		ϵ_0	$\epsilon_0 = \frac{A_2}{A_1}$	коэффициент нулевой последовательности
2	Электромагнитная модель АД	$I_{стат. экв}$	$I_{Авq} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N (I_{An})^2}$	эквивалентное значение тока статора (рассчитывается для каждой фазы)
		$I_{рот. экв}$	то же для тока ротора	то же для ротора
		I_M	$I_{Mn} = I_{стат. n} + I_{рот. n}$	ток намагничивания
		$\Delta P_{м1}$	$\Delta P_{m1} = (I_{Авq}^2 + I_{Ввq}^2 + I_{Свq}^2) R_{стат}$	потери в меди статора
		$\Delta P_{м2}$	то же для ротора	то же для ротора
		ΔP_c	$\Delta P_c = 3 \cdot I_M^2 \cdot R_c$	потери в стали
		ΔP_Σ	$\Delta P_\Sigma = \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} + \Delta P_c$	потери в стали
		P_1	$P_1 = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C$	потребляемая активная мощность
		Q_1	$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2}$	потребляемая реактивная мощность
		S_1	$S_1 = U_{Авq} I_{Авq} + U_{Ввq} I_{Ввq} + \dots + U_{Свq} I_{Свq}$	потребляемая полная мощность
		P_2	$P_2 = \omega_{cp} \cdot M_{cp}$	мощность на валу
		η	$\eta = \frac{P_2}{P_1}$	КПД
		$\cos \varphi$	$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}$	коэффициент мощности (с учетом искажений)
		THD_I	$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^N (I_{cp n})^2}$	коэффициент гармонических искажений тока
THD_T	то же для момента	то же для момента		

Окончание табл. 1

№ эта-па	Вычисли-тельный субблок	Выходные параметры		
		Обо-значе-ние	Расчетная формула	Описание
3	Тепловая модель АД	$\tau(t)$	$\tau_k = \tau_{(k-1)} + 1 / C \times (\Delta P - A\tau_{(k-1)})$	зависимость превышения температуры от времени
		$\tau_{ср}$	$\tau_{ср} = \frac{1}{M} \sum_k \tau_k$	средняя температура изоляции
		α'	$\alpha' = \frac{1}{T_{Ц}} \sum_n (\Delta\tau_n \cdot t_n)$	эквивалентная продолжительность работы АД с перегревом
		$T_{и}$	$T = T_{Н} \cdot e^{-\beta} \cdot \alpha'$	срок службы изоляции
4	Модель экономического ущерба	$E_{сумм}$	$E_{сумм} = \Delta P_{\Sigma доп} \cdot C \cdot T_{работы}$	дополнительный ущерб
		$E_{год}$	$E_{год} = E_{сумм1} - E_{сумм2} - e \cdot K$	годовой ущерб
5	Определе-ние параме-тров вы-бранного техни-ческого средства защиты	C_1	задается 1 мФ	емкость в за-градительном фильтре
		L_1	$L_1 = \frac{1}{\omega^2 C}$	индуктивность заградительного фильтра
		C_2	находится итеративно	емкость в ча-сти «звезды» комбини-рованного фильтра
		$E_{ТС}$	вводится вручную	стоимость технических средств
6	Пере-смотр вариан-тов техни-ческих средств	повторение шагов 2–4 с учетом техни-ческих средств	оценка уменьшения ущерба, оцен-ка годового эффекта	
7	Принятие решения	$E_{сумм} < C_{двиг}?$ $T_{и} \approx T_{ном}?$ => эксплуа-тация без ТС $E_{сумм} > E_{год}$ => внедрение ТС	сопоставле-ние ущерба, стоимости технических средств и годового эффекта	

В табл. 2 представлены результаты использования предложенного алгоритма при эксплуатации электро-механических преобразователей (мощность 22 кВт, номинальная скорость 1000 об/мин) в условиях различных промышленных предприятий. При эксплуатации данного электрооборудования в условиях идеального напряжения питания, не требуется применения ника-ких технических устройств. При показателях качества электроэнергии, зарегистрированных в сварочном цеху ОАО «ЗТЗ», дополнительный годовой ущерб, обуслов-ленный ростом электрических потерь, составляет около 6100 грн. В данном случае целесообразно применение заградительного фильтра, состоящего из параллельно включенной индуктивности и емкости с параметрами, приведенными в табл. 2.

В случае, когда показатели качества электроэнергии приближаются к предельно допустимым нормам для сетей 0,4 кВ, дополнительный годовой ущерб равен 10560 грн. При этом экономически обосновано примене-ние комбинированного фильтра, представляющего собой последовательное включение заградительного фильтра и соединенных в звезду емкостных элементов. Такие типы фильтров обеспечивают одновременно явление резонанса токов, «запирая» наиболее весомую в спектре гармоническую составляющую, и явление резонанса на-пряжений на другой частоте, образуя для нее контур короткого замыкания.

Таблица 2

Иллюстрация применения предложенного алгоритма

Расчетные параметры	Предприятия	Колесопр-катный цех ОАО «Ин-терпайп НТЗ»	Сварочный цех ОАО «ЗТЗ»	Цех механи-ческой об-работки «Завод монтажных изделий»
	Значения ПКЗ	$\epsilon_2, \%$	0	2
	$k_{НС}, \%$	0,1	3	5
Доля рабочего цикла с за-данными ПКЗ	$\%$	100	48	77
Энергети-ческие и тепловые по-казатели АД	$\Delta P, \text{кВт}$	2,44	3,29	4,19
	$\cos\phi, \text{о.е.}$	0,87	0,84	0,79
	$\eta, \%$	90	87	84
	$\tau_{ср}, \text{°C}$	58	92	113
	$\tau_{max}, \text{°C}$	61	114	132
Дополнитель-ный годовой ущерб	$E_{год}, \text{грн}$	42,00	6097,93	10560,00
Предложен-ные техниче-ские средства защиты	—	эксплуа-тация в штатном режиме	Заградитель-ный фильтр; $L = 0,025 \text{ Гн}$, $C = 1 \text{ мФ}$	Комбинирован-ный фильтр; $L_1 = 0,025 \text{ Гн}$, $C_1 = 100 \text{ мкФ}$, $C_2 = 0,55 \text{ мФ}$

5. Обсуждение результатов применения алгоритма выбора средств защиты асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии

Ранее автором [8–12] были разработаны вычисли-тельные средства уточненной оценки составляющих эконо-мического ущерба, причиненного эксплуатацией АД в условиях некачественной электроэнергии. Совокупность предложенных математических методов и программного обеспечения представляют собой технико-экономическую модель электродвигателя, предназначенную для принятия более обоснованного решения о выборе мер по борьбе с от-рицательными последствиями влияния некачественной электроэнергии на технико-экономические показатели.

Входными данными для модели являются следую-щие параметры:

- временные зависимости цеховых напряжений и вероятностные характеристики показателей качества электроэнергии;

- стоимость и технические параметры установленного электрооборудования (номинальные параметры и параметры схем замещения асинхронных двигателей, их тепловые параметры, режим работы);
- алгоритм оценки вариантов технических решений заключается в следующем.

Сначала оценивается технологический ущерб, связанный с эксплуатацией асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии. Для этого необходима дополнительная информация о вероятности отказа асинхронного двигателя, сроке его эксплуатации и влиянии качества питающего напряжения на производительность механизма, приводом которого служит рассматриваемый АД.

Затем на основе предложенной в работе модели электродвигателя, работающего в условиях произвольной формы питающего напряжения, рассчитываются энергетические параметры АД — полезная мощность и потери электроэнергии. Расчет ведется для двух случаев: идеальное и реальное напряжения. Полученные данные об уровнях потерь электроэнергии в случае идеального и искаженного питания служат основой для расчета энергетической составляющей ущерба. Далее прогнозируется тепловое состояние асинхронного двигателя: рассчитывается кривая превышения температуры изоляции в течение рабочего цикла. По полученным данным оценивается составляющая ущерба, связанная с сокращением срока службы изоляции. Основные расчетные формулы представлены в табл. 1.

Суммарный экономический ущерб, полученный по предложенному выше алгоритму, необходимо сопоставить со стоимостью предлагаемых мер и технических средств по борьбе с отрицательным влиянием некачественной электроэнергии. Для этого рассчитываются, например, оптимальные параметры фильтрующих устройств и проводится моделирование работы АД с учетом наличия последних. Опять же, прогнозируются показатели надежности работы АД с учетом фильтров и оцениваются полученные энергетические показатели. Стоимость средств защиты не должна превышать величину суммарного экономического эффекта, обусловленного их внедрением, в течение предварительно заданного срока окупаемости (например, три-пять лет).

Затем рассматривается вариант применения «общехозяйственного» метода коррекции питающего напряжения — установка активных либо пассивных компенсирующих устройств. Экономический эффект применения различных мероприятий должен быть сопоставлен с затратами для принятия экономически обоснованного технического решения.

6. Выводы

Решение о принятии мер по повышению энергоэффективности АД должно приниматься исходя из сопоставления величины ущерба, стоимости электродвигателя и предлагаемых технических средств его защиты. При этом используется метод расчета ущерба, учитывающий увеличение потребления электроэнергии двигателем, а также сокращение срока службы его изоляции вследствие перегрева, обусловленного некачественной электроэнергией.

Разработанный в статье алгоритм выбора экономически целесообразных средств повышения энерго-

эффективности АД при работе последнего в условиях некачественной электроэнергии позволяют принять экономически обоснованное решение о выборе средств компенсации отрицательного влияния некачественной электроэнергии на технико-экономические показатели АД, которое принимается исходя из сопоставления величины ущерба, стоимости электродвигателя и предлагаемых технических средств его защиты.

Таким образом, выбор экономически целесообразного устройства защиты асинхронного двигателя, работающего в условиях электроэнергии низкого качества может быть выполнен с помощью предложенного алгоритма, синтезированного на базе комплексного технико-экономического аналога указанного электродвигателя. Данный алгоритм может применяться как инструмент службы энергоменеджмента любого предприятия Украины.

Литература

1. United States Industrial Motor Systems Market Opportunities Assessment: Executive Summary [Text] / Xenergy Inc, Oak Ridge National Laboratory, United States. Department of Energy. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Office of Industrial Technologies, Motor Challenge Program (U.S.). — U.S. Department of Energy, Office of Industrial Technologies, 1998. — 22 p.
2. Energy distribution annual report 2009 [Electronic resource]. — U.S. Department of Energy data storage and statistic service, 2009. — Available at: \www/URL: www.doe.gov/stat/enreport2009. — 17.10.2013.
3. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. — М.: Энергоатомиздат, 2000. — 340 с.
4. Лесных, А. В. Оценка ущерба и регулирование ответственности за перерывы в электроснабжении: зарубежный опыт [Текст] / А. В. Лесных, В. В. Лесных // Проблемы анализа риска. — 2005. — Т. 2, № 1. — С. 33.
5. Герасимов, С. Е. Надежность и оценка ущербов от перерывов электроснабжения [Текст] / С. Е. Герасимов, С. Ю. Чекмарев // Elektroenergetika Journal. — Technical University of Košice, December 2008. — Vol. 1, No. 2. — С. 16–17.
6. Kolcun, M. Systémové poruchy v elektrizačných sústavách [Text]: IVth International Scientific Symposium / M. Kolcun, E. Jahnátek // ELEKTROENERGETIKA. — 2007. — № 19–21. — P. 723–728.
7. Jahnátek, E. Strategia rozwoju energetyki w Europie — Energochłonność przemysłów Polski i Słowacji [Text] / E. Jahnátek, J. Szkutnik // Energia Elektryczna Wydawnictwo Polskiego Towarzystwa Przesytu i Rozdziału Energii Elektrycznej. — 2008. — № 2. — P. 8–10.
8. Качан, Ю. Г. О методике выбора экономически целесообразных средств защиты асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. — Кременчук: КДПУ, 2011. — Вип. 4(16). — С. 56–59.
9. Качан, Ю. Г. О моделях функционирования асинхронного двигателя в условиях некачественного питания [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Гірничі електромеханіка та автоматика. — 2008. — Вип. 81. — С. 97–99.
10. Качан, Ю. Г. Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. — Кременчук, 2009. — № 3. — С. 56–58.
11. Качан, Ю. Г. Оценка адекватности математической модели асинхронного двигателя в условиях некачественного питания [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Інтегровані технології та енергозбереження. — Харків: НТУ «ХПІ», 2009. — № 3. — С. 67–69.
12. Качан, Ю. Г. тепловая составляющая экономического ущерба от работы асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко,

В. В. Кузнецов // Гірничі електромеханіка та автоматика. — Дніпропетровськ, 2010. — Вип. 85. — С. 113–118.

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИБОРУ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ НЕЯКІСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Стаття присвячена проблемам прийняття рішення про вибір пристроїв захисту асинхронних двигунів, що працюють в умовах неякісної електроенергії. Розглянуто комплексну модель асинхронного двигуна, що дозволяє оцінювати енергетичні показники, а також тепловий стан на основі імовірнісних характеристик показників якості електроенергії, що дозволяє обґрунтувати економічну доцільність використання запропонованих заходів.

Ключові слова: електромережі промислових підприємств, неякісна електроенергія, асинхронний двигун, показники якості електроенергії.

Кузнецов Виталий Вадимович, кандидат технических наук, доцент, кафедра электротехники и электропривода, Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск, Украина, e-mail: wit_jane2000@mail.ru.

Кузнецов Віталій Вадимович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра електротехніки та електропривода, Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ, Україна.

Kuznetsov Vitalii, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: wit_jane2000@mail.ru

УДК 621.314.54

DOI: 10.15587/2312-8372.2015

**Бржезицький В. О.,
Десятов О. М.,
Сулейманов В. М.,
Хомініч В. І.**

АНАЛІЗ ПУЛЬСАЦІЙ ВИСОКОВОЛЬТНОГО КАСКАДНОГО ГЕНЕРАТОРА НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

В статті вирішене питання розрахунку режимів напруги високовольтного каскадного генератора з нелінійним навантаженням за допомогою аналітичного методу. Для каскадного високовольтного джерела постійного струму знайдено аналітичне рішення для його напруги та її нелінійної пульсації. Проведено дослідження залежності амплітуди пульсацій від параметрів схеми генератора.

Ключові слова: каскадне джерело високої напруги, аналітичний метод, амплітуда пульсацій напруги, нелінійне навантаження.

1. Вступ

Ряд електротехнічних пристроїв і технологічних процесів пов'язаний з використанням сильних електростатичних полів та енергії постійного струму високої напруги. До них належать пристрої прямого прискорення заряджених частинок, генератори, призначені для випробування ізоляції електроустаткування ЛЕП (ліній електропередач) постійного струму, блоки живлення радіотехнічних схем, промислових електрофільтрів, рентгенівських апаратів і томографів, установок магнітно-імпульсної обробки металів, електронно-іонної технології, зарядних пристроїв, емнісних нагромаджувачів енергії.

Постійну високу напругу одержують за допомогою різноманітних схем випрямлення змінної напруги, основними елементами яких є високовольтний трансформатор, конденсаторно-діодна група, фільтр вищих гармонік і струмообмежувальні резистори [1].

Актуальність запропонованої роботи полягає в тому, що в ній вперше побудована аналітична теорія високовольтних каскадних установок, яка дозволяє враховувати нелінійність параметрів та визначати форму і амплітуду пульсацій їх вихідної напруги. Точне, аналітичне визначення даних факторів, особливо важливе для забезпечення якості технологічних процесів, побудованих з використанням подібних високовольтних установок.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вперше схема каскадних генераторів була запропонована Грейнахером в 1920 році [2], проте практичне застосування вони знайшли лише на початку 30-х років, коли виникла необхідність створення джерел надвисоких напруг для прискорювачів заряджених частинок. У 1932 р. Кокрофт і Уолтон опублікували опис емнісного каскадного генератора з послідовним живленням на напругу 700 кВ [3]. Відтоді такі установки зазвичай називають генераторами Кокрофта-Уолтона. Пульсації напруги на виході в таких генераторах виявилися вельми значимими, іноді навіть за відсутності навантаження. Надалі з метою усунення цих недоліків було запропоновано декілька удосконалених каскадних генераторів даного типу. Певного зниження пульсацій напруги вдалося домогтися, перейшовши до симетричних схем, запропонованих Гельперном [4]. До сьогоднішнього дня науковці вказують у своїх роботах про вплив пульсацій напруги [5], але кінцевого рішення, за допомогою якого можна було б точно визначати значення амплітуди та форми пульсацій не було знайдено.

Дослідження режимів високовольтних каскадних установок постійного струму звичайно виконуються наближеними методами [1, 6] у допущенні незмінності