

Для снижения надлишковой мощности электротранспорта с дискретным регулированием мощности розглянута можливість оперативного відключення груп тягових двигунів в режимі тяги. Виконанні розрахунки показують, що зниження надлишкової потужності тягового засобу дозволяє зменшити витрати електроенергії на тягу за рахунок зниження втрат електроенергії від нерівномірного електроспоживання в системі тяги та силовому колі тягового засобу

**Ключові слова:** *електротранспорт постійного струму, дискретне регулювання потужності, надлишкова потужність, нерівномірне електроспоживання, втрати електроенергії, вимикання тягових двигунів*

Для снижения избыточной мощности электротранспорта с дискретным регулированием мощности рассмотрена возможность оперативного отключения групп тяговых двигателей в режиме тяги. Выполненные расчеты показывают, что снижение избыточной мощности тягового средства позволяет уменьшить расход электроэнергии на тягу за счет снижения потерь электроэнергии от неравномерного электропотребления в системе тяги и силовой цепи тягового средства

**Ключевые слова:** *электротранспорт постоянного тока, дискретное регулирование мощности, избыточная мощность, неравномерное электропотребление, потери электроэнергии, отключение тяговых двигателей*

УДК 629.423.1

# СНИЖЕНИЕ ИЗБЫТОЧНОЙ МОЩНОСТИ ТЯГОВОГО СРЕДСТВА В ПРОЦЕССЕ ДВИЖЕНИЯ

**О. И. Саблин**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра электротехники и электромеханики\*  
Контактный тел.: (056) 373-15-37  
E-mail: olegsss@i.ua

**В. В. Артемчук**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра электроподвижного состава железных дорог\*  
Контактный тел.: 067-565-98-03  
E-mail: art\_vv@ukr.net  
\*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. ак. В. Лазаряна  
ул. Академика Лазаряна, 2, г. Днепропетровск, Украина, 49010

## 1. Введение

На эксплуатируемых в Украине электровозах постоянного тока (ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11, ДЭ1, ЧС2, ЧС7) регулирование силы тяги и скорости осуществляется дискретной (ступенчатой) системой регулирования мощности, предусматривающей в тяговом режиме три схемы соединений тяговых электродвигателей (ТЭД) – последовательная (С), последовательно-параллельная (СП) и параллельная (П), а также четыре ступени ослабления возбуждения ТЭД в пределах каждого соединения, т.е. пятнадцать ступеней мощности электровоза. Однако с точки зрения потерь электроэнергии в тяговой сети от неравномерного электропотребления такая система является весьма неэффективной [1] и существенно проигрывает системам плавного регулирования мощности, что общеизвестно.

## 2. Основная часть

Очень часто при неполновесных составах электровоз с дискретным регулированием мощности обладает избыточной мощностью [2, 3]. Рассматривая тяговые характеристики электровоза ВЛ8 (рис. 1), и сопоставляя их, например, для схемы СП-соединения (возбуждение ТЭД 36%) и П (возбуждение ТЭД 100%) видно, что на плоскости возможных мощностей  $F \times v$  электро-

воза существует так называемая не перекрытая область регулирования мощности (заштрихованная), в которой отсутствуют естественные характеристики.

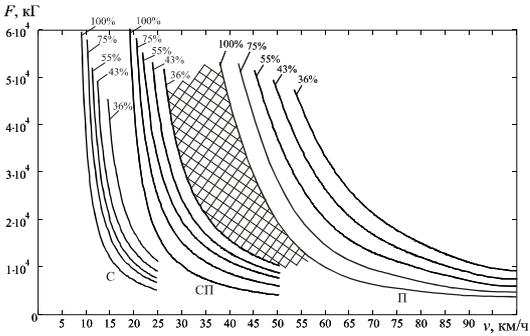


Рис. 1. Тяговые характеристики электровоза ВЛ8 для напряжений на тяговых двигателях 375 В, 750 В, 1500 В

Реостатные характеристики, существующие в этой области, предназначены лишь для кратковременной работы, поскольку неэкономичны и длительность работы на них ограничена нагревом резисторов. В результате этого при установившейся работе электровоза с поездом в определенном диапазоне скоростей в этой области существует значительное расхождение между возможной силой сопротивления движению  $W$  и реализуемой силой тяги  $F$ , что в данном диапазоне ско-

ростей на СП-соединении ТЭД будет обусловлено недостаточной, а на П – избыточной мощностью тягового средства [4]. Это приводит к тому, что для поддержания постоянной скорости движения машинисту приходится регулярно переходить с высшего соединения ТЭД на низшее, что приводит к существенным колебаниям тяговой нагрузки и повышению уровню потерь в контактной сети. Иными словами потери электроэнергии от неравномерного электропотребления в определенной степени пропорциональны избыточной мощности тягового средства. На рис. 2 представлена регистрограмма тягового тока электровоза ВЛ8 на одном из участков Приднепровской железной дороги, график скорости и управления, из которых видно, что для длительного поддержания скорости около 50 км/ч (рис. 2, б) имели место многократные переходы со схемы П-соединения ТЭД на СП и наоборот (рис. 2, в), что сопровождалось бросками и колебаниями тягового тока (рис. 2, а). Это отчетливо видно на интервалах времени 4450...5100 с, а также 6250...6800 с (рис. 2).

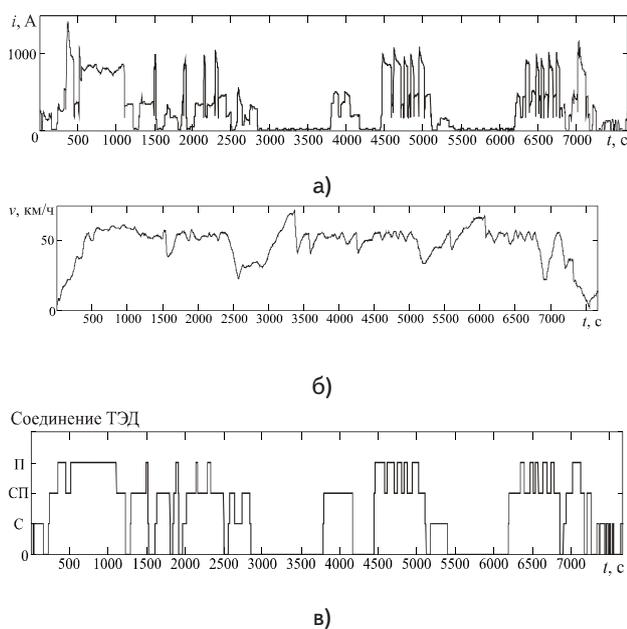


Рис. 2. Реализации тягового тока (а), скорости движения (б) и схемы соединения ТЭД силовой цепи (в) электровоза ВЛ8 при его работе на одном из участков Приднепровской железной дороги

С другой стороны известно, что у широкорегулируемого тягового электропривода при номинальном напряжении максимум КПД, а соответственно и минимум потерь имеют место при номинальной нагрузке двигателя. Например, для ТЭД НБ-406 номинальные величины составляют [5]: напряжение на зажимах двигателя  $U_{ном} = 1500$  В; ток якоря двигателя  $I_{яном} = 340$  А; КПД при этом  $\eta_{ном} = 93,2\%$ . Таким образом, наиболее экономичный режим работы ТЭД возможен на П-соединении, т.е. при номинальном напряжении на зажимах двигателя.

Зависимость КПД от тока  $\eta(I)$  ТЭД для номинального напряжения  $U_{ном} = 1500$  В рассчитывают при помощи выражения [6]

$$\eta(I) = \frac{F_{кл}(I)v(I)}{U_{ном}I}$$

где зависимости силы тяги ТЭД и скорости от тока, соответственно  $F_{кл}(I)$  и  $v(I)$ , получают на основании пересчета зависимостей момента на валу ТЭД  $M(I)$  и частоты вращения вала  $n(I)$  от тока по выражениям

$$F_{кл}(I) = \frac{2\mu}{D}M(I), \quad v(I) = 0,188 \frac{D}{m}n(I),$$

где  $D$  – диаметр бандажа колесной пары;  $m$  – передаточное отношение зубчатой передачи.

Электромеханические характеристики  $M(I)$  и  $n(I)$  двигателя на валу получают экспериментально или из магнитной характеристики  $c\Phi(I)$  [6].

Для повышения КПД тяговых двигателей, выравнивания тяговой нагрузки в системе тягового электропитания, и тем самым для повышения коэффициента мощности тягового средства, в незаполненную область регулирования мощности между характеристиками СП (возбуждение 36 %) и П (возбуждение 100 %) предлагается ввести дополнительные промежуточные естественные (ходовые) тяговые характеристики. Они могут быть получены оперативным выведением (временным, в процессе движения, с последующим, при необходимости оперативным восстановлением) групп двигателей (по два двигателя в ветви) при П-соединении согласно схеме рис. 3. Это повысит регулируемость и расширит диапазон регулирования мощности тягового средства.

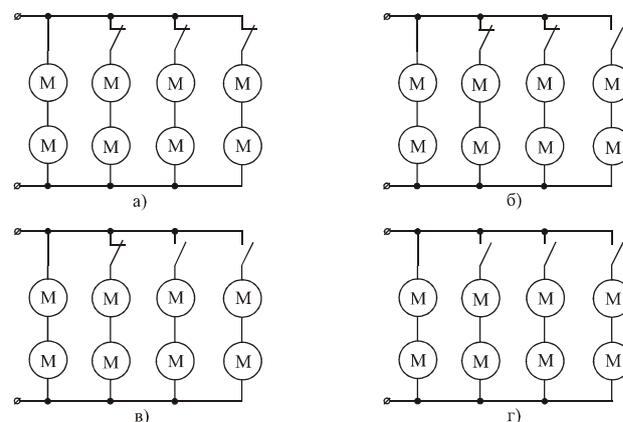


Рис. 3. Схемы выведения групп тяговых двигателей при номинальном напряжении на двигателе 1500 В

В результате получаем, что схема рис. 3 (а) – это обычное П-соединение ТЭД, когда электровоз работает на 8 двигателях; схема рис. 3 (б) – схема с выведенной одной группой двигателей, когда электровоз работает на 6 двигателях при том же напряжении, и т.д. Минимальное количество двигателей в данном случае – два (рис. 3, г). В результате получаем, что сила тяги  $F'$  на измененной схеме (для приведенных 4 случаев рис. 3) электровоза определяется как отношение силы тяги  $F$  на П-соединении к общему числу параллельных ветвей ТЭД (четыре) умноженных на количество оставленных ветвей:

$$а) F' = F; б) F' = \frac{3}{4}F; в) F' = \frac{1}{2}F; г) F' = \frac{1}{4}F.$$

На тяговых характеристиках электровоза, таким образом, появляются дополнительные естественные характеристики  $F'(v)$ , а незаполненная естественными характеристиками область частично заполняется (рис. 4).

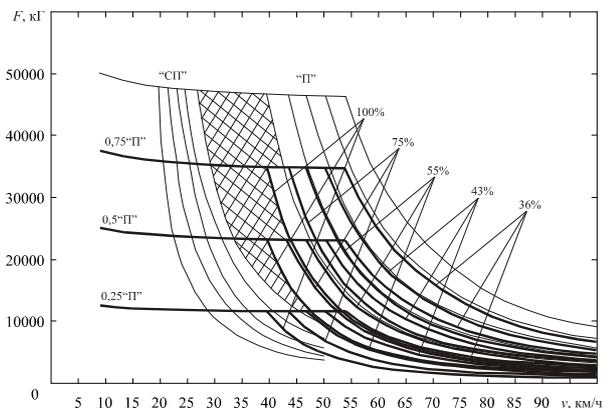


Рис. 4. Дополнительные тяговые характеристики электровоза ВЛ8, полученные выведением одной группы двигателей при номинальном напряжении на двигателе 1500 В

Как видно, полученные дополнительные характеристики приблизительно на 40 % заполняют нерегулируемую область мощности в области скоростей 40...70 км/ч, и таким образом расширяют диапазон рационального регулирования мощности тягового средства в этой области. Кроме этого, некоторые новые характеристики в определенной области скоростей практически совпадают с исходными характеристиками, например (П, ОП1) и (0,75П, ОП2) и т.д., из чего следует, что при равных скоростях движения электровоза на 8 двигателях с полным возбуждением будет реализовываться та же мощность (сила тяги), что и при работе электровоза на 6 двигателях без перегрузки с ослаблением возбуждения 55 %.

Энергоэффективный из рассмотренных двух равных по мощности режимов работы электровоза определим на основании КПД тяговых двигателей. При равных весах поездов и сопротивлении движению при работе электровоза на шести тяговых двигателях вместо восьми (при  $U_{ТЭД} = 1500В$ ), двигатели будут на 25 % более загружены и т.о. потреблять большие токи. Тем не менее, работая в области допустимых токов (без перегрузки), согласно электромеханическим характеристикам имеем:  $\eta(I)_{ОП1} > \eta(I)_{П}$ ,  $\eta(I)_{ОП2} > \eta(I)_{ОП1}$  и т.д. в области больших токов двигателя. То есть, при неполновесных поездах применение данного алгоритма регулирования целесообразно. В случае работы электровоза на восьми двигателях они могут быть недогружены, работая в зоне пониженных КПД. Для сравнения эффективности равных тяговых характеристик определим КПД электровоза ВЛ8 при помощи электромеханических характеристик ТЭД  $F_{кл}(I)$  и  $v(I)$  для случая работы на восьми ТЭД на характеристике П, ОП1 и для того же электровоза при работе на шести ТЭД на характеристике 0,75П, ОП2 согласно выражению [6]

$$\eta_o(I_o) = \frac{nF_{кл}(I)v(I_o)}{UI_o} \quad (*)$$

где  $n$  – количество задействованных ТЭД;  $I_o$  – ток электровоза;  $I$  – ток тягового двигателя;  $U$  – напряжение на токоприемнике электровоза (3000 В);  $F_{кл}$  – сила тяги одного ТЭД.

При работе электровоза на восьми ТЭД (четырёх ветвях)  $I_o = 4I$ ; при работе на шести ТЭД (трех ветвях)  $I_o = 3I$ .

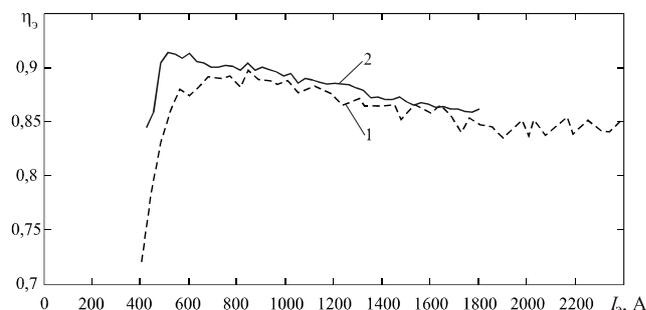


Рис. 5. Зависимости КПД электровоза от потребляемого тока при напряжении на ТЭД 1500 В: 1 – при работе на восьми тяговых двигателях с ОП1; 2 – при работе на шести тяговых двигателях с ОП2

Как видно из рис. 5, полученная по выражению (\*) характеристика  $\eta_o(I_o)$  для случая работы электровоза ВЛ8 в режиме ОП1 на восьми ТЭД (при напряжении на двигателе 1500 В) лежит несколько ниже той же характеристики электровоза при работе на шести двигателях в режиме ОП2 при том же напряжении на ТЭД, а поэтому второй режим будет более экономичным – с более высоким КПД.

Таким образом, применяя изложенный принцип оперативного временного отключения (по необходимости) параллельных ветвей ТЭД при параллельном соединении можно улучшить регулировочные свойства тягового средства, осуществить его работу в зоне более высоких КПД, а также создать рациональную загрузку ТЭД при неполновесных поездах и на участках с легким профилем, что особенно эффективно для поддержания скорости движения поезда.

Для сравнения, на примере электровоза ВЛ8 были осуществлены тяговые расчеты для обычной системы регулирования мощности и предложенной расширенной для одного из участков Приднепровской железной дороги (Пятихатки-Чаплино). Графики тягового тока электровоза  $i(t)$  приведены на рис. 6.

Из рис. 6 следует, что при схеме с возможностью отключения ТЭД форма тягового тока электровоза  $i(t)$  улучшается (рис. 6, б), т.е. имеет менее импульсный колебательный характер и более равномерный в сравнении с формой тока  $i(t)$  при обычной схеме регулирования (рис. 6, а), т.е. выравнивается тяговая нагрузка. Необходимо отметить, что время хода поезда не изменилось, поскольку дополнительные схемы (рис. 3, б – г) не исключают основную (рис. 3, а), а лишь дополняют ее и используются при необходимости. Дополнительные характеристики позволяют не переходить часто из тяги на выбег при превышении силы тяги над сопротивлением движению, поскольку позволяют подобрать силу тяги с меньшим отклонением от силы сопротивления движению и работать в тяге, потребляя равномерно меньшие токи. Сравнительные характеристики для приведенного тягового расчета приведены в

табл. 1, где схема 1 – это существующая схема регулирования скорости электровоза ВЛ8, а схема 2 – схема возможностью отключения ТЭД.

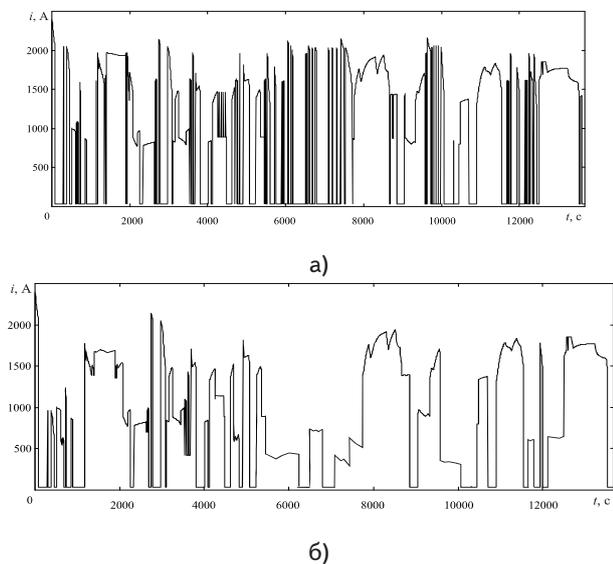


Рис. 6. Графики изменения потребляемого тягового тока электровоза ВЛ8 при обычной схеме регулирования скорости (а) и при возможности в схеме отключать ветви тяговых двигателей (б)

Таблица 1

Схема	Действующее значение тока электровоза за поездку, А	Среднее значение КПД	Среднее значение коа. эффективности мощности	Расход электро-энергии в относительных единицах
1	1229	0,82	0,70	1,0
2	1054	0,84	0,79	0,98

В рассматриваемом примере не учитывалось увеличение потерь в оставшихся в работе двигателях, поэтому реальная величина КПД ТЭД будет несколько ниже. Однако необходимо заметить, что главное снижение потерь от уменьшения избыточной мощности тягового средства ожидается не в самом тяговом средстве, а в тяговой сети, поскольку снижение расхода электроэнергии на тягу, составляющее порядка нескольких процентов может быть сомнительным ввиду погрешностей при расчетах КПД и в данном вопросе второстепенно.

Таким образом, предложенная система регулирования позволяет повысить коэффициент мощности тягового средства, стабилизировать тяговую нагрузку, снизить действующее значение потребляемого тока, а тем самым и потери электроэнергии в контактной сети, особенно при неполновесных составах. Для реализации данного принципа отключения групп ТЭД на параллельном соединении необходимо лишь для существующих в силовой цепи контакторов (их блокировок) предусмотреть на пульте машиниста три кнопки оперативного вывода по одной группе ТЭД, для чего в цепях управления электровоза необходимо произвести несущественные изменения.

Отключение части ветвей с ТЭД имеет также своим преимуществом возможность перехода с одной группы работающих двигателей, у которых температура близка к максимально допустимой, на другую группу двигателей, до этого отключенных (холодных), что облегчает работу ТЭД. Повреждение политуры коллектора отключенного ТЭД щетками сомнительно, поскольку режим работы электровоза на выбеге является нормой и аналогичен отключению ТЭД. Также отключение части ТЭД позволяет минимизировать число коммутаций в силовой цепи, что в свою очередь, продлевает ресурс силовых контакторов.

### Литература

1. Бабич, В. М. Оптимальное регулирование мощности многоосного сцепа в тяге / В. М. Бабич, А. Н. Крыгин // Тезисы докладов «Состояние и перспективы развития электровозостроения в стране». – Новочеркасск, 1991. – С. 12-13.
2. Гетьман, Г. К. Выбор оптимальных параметров электровозов для грузовых перевозок / Г. К. Гетьман // Залізничний транспорт України. – 2000. – №3. – С. 47-51.
3. Гетьман, Г. К. Метод расчета оптимальных мощностей тягового подвижного состава при дискретном распределении массы поездов / Г. К. Гетьман // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1999. – № 2. – С. 44-47.
4. Сорокин, С.В. Анализ потерь электроэнергии в электровозе ВЛ80С и экономия энергозатрат при секционном регулировании / С. В. Сорокин, В. В. Ширяев // Тезисы докладов «Состояние и перспективы развития электровозостроения в стране». – Новочеркасск, 1991. – С. 13-14.
5. Электровоз ВЛ8. Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1973. – 311 с.
6. Теория электрической тяги: учебник [для студ. вузов] / Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н., Озеров М. И. – М.: Транспорт, 1995. – 328 с.

### Abstract

*On Ukrainian DC electric locomotives the control of propulsive force and speed is carried out by the discrete (step) Power Management System, which provides three diagrams of connections of traction motors in the traction mode. However, in terms of energy losses in traction network from the irregular energy consumption such control system is very inefficient. Often, especially with non full-weight trains the electric locomotive with discrete power control in a certain range of speeds and oppositions to movement has excess capacity, which leads to irregular*

power consumption and increase of energy losses in traction network and power chain of traction mechanism.

In this mode the control of traction mechanism consists in alternating change of higher connection of traction motor to the lower one, leading to surges and fluctuations of energy consumption. To improve the coefficient of efficiency of traction motors, balancing a traction load in a traction power supply system, and thus improving the power coefficient of traction mechanism, it is suggested to input into unfilled area of power control between the highest and lowest characteristics, the additional intermediate native (running) traction characteristics.

They can be obtained by operative shutdown (temporary, in motion, and then, if necessary, an operative regeneration) of groups of motors (two engines in the branches) with P-connection. This will improve the controllability and expand the range of power control of traction mechanism. The running time of the locomotive will not change as the additional diagrams do not exclude the principal one, but complement it and are used if necessary

**Keywords:** DC electric locomotives, discrete power control, excess power, irregular power consumption, power losses, traction motors shutdown

УДК: 541.136

## СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗРЯДУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ КОМІРКИ СТРУМУ З КАТОДОМ НА ОСНОВІ $MgF_2$

І. М. Гасюк

Доктор фізико-математичних наук, професор\*,  
декан фізико-технічного факультета  
E-mail: gasyukim@rambler.ru

М. Я. Січка\*

Контактний тел.: 097-790-15-84, 099-321-70-02  
E-mail: mishasichka@rambler.ru

С. В. Войтків  
Аспірант\*О. М. Угорчук  
Аспірант

\*Кафедра матеріалознавства і новітніх технологій  
Прикарпатський національний університет  
ім. Василя Стефаника

вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76018

Представлено можливість моделювання гальваностатичного розряду джерел живлення циклічного типу роботи за допомогою емпіричних співвідношень. Проаналізовано структурні компоненти, які описують форму розрядної кривої

Ключові слова: структурне моделювання, гальваностатичний розряд, інтеркаляція

Представлена возможность моделирования гальваностатического разряда источников питания циклического типа работы с помощью эмпирических соотношений. Проанализированы структурные компоненты, которые описывают форму разрядной кривой

Ключевые слова: структурное моделирование, гальваностатический разряд, интеркаляция

### 1. Вступ

У теорії імпедансу досить широко використовується структурне моделювання при дослідженні різних електрохімічних процесів і систем [1].

Структурне моделювання ґрунтується на системному підході, при якому досліджуваний об'єкт розглядається як система, що складається з підсистем або елементів [2]. Окремі модельні компоненти знаходяться в безпосередній близькості, не проникаючи при цьому один в один. Взаємодія між ними здійснюється через поверхні, що розділяють їх, і зв'язки, таким чином, структурна модель електрохімічної системи є деякою електротехнічною схемою. Структурні імпедансні моделі будуються з елементів, які за своїм фізичним змістом відповідають модельованим процесам. При

цьому елементами структурної моделі можуть бути як стандартні електротехнічні елементи, так і специфічні електрохімічні. Структурні моделі завжди дуже наочні і зрозумілі як з електротехнічної точки зору, так і з електрохімічної, що є їх безперечною перевагою. Проте до недавнього часу структурне моделювання використовувалося тільки в теорії імпедансу, тобто в моделях з малими струмами. У роботі [3] показано, що методи структурного моделювання можуть бути з успіхом застосовані і при моделюванні процесів розряду в акумуляторах при великих робочих струмах.

Експериментально доведено [3], що в загальному випадку рівняння, що описує розрядні характеристики хімічних джерел струму, повинне мати вигляд:

$$u = E_0 - Ri - Kf_2(i, q) + Af_3(q), \quad (1)$$